

ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОБУДУВАННЯ
ім. А.М. ПІДГОРНОГО

Юдін Олександр Юрійович

УДК 621.165:533.6

**ПРЯМА, ГІБРИДНА ТА ОБЕРНЕНА ЗАДАЧІ
ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ
ТУРБОМАШИН**

Спеціальність 05.05.16 – Турбомашини та турбоустановки

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2006

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
Сухінін Віктор Павлович,
Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків,
професор кафедри ТЕУ ТЕС и АЕС;
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Дьомін Олександр Євгенович,
Національний аерокосмічний університет
ім. М.Є. Жуковського “ХАІ”, м. Харків,
старший науковий співробітник
кафедри теорії авіаційних двигунів;

Провідна установа: Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут” Міністерство освіти та науки України, кафедра атомних електричних станцій і інженерної теплофізики, м. Київ

Захист відбудеться “18” _____ травня 2006 р. о 15_годині на засіданні спеціалізованої ради Д64.180.02 в Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України за адресою 61046, м. Харків, вул. Д. Пожарського , 2/10

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, адреса 61046, м. Харків, вул. Д. Пожарського , 2/10

Автореферат розісланий “___ 6 ___” квітня 2006 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук

О.Е. Ковальський

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. Запропонована робота присвячена вирішенню цієї актуальної проблеми.

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

Розроблені в дисертації методи аеродинамічних досліджень, розрахункові алгоритми і програмні модулі використовувалися під час виконання кафедрою турбінобудування НТУ “ХПІ” держбюджетної наукової теми М2831 “Вирішення фундаментальних проблем оптимізації газодинамічних, режимних і конструктивних параметрів проточної частини парових турбін з метою розроблення високоекономічних і надійних проточних частин для модернізації турбін, які виробили ресурс, для створення нових паротурбінних агрегатів” (№ ГР 0100U001659, 2001-2002 рр.) і держбюджетної наукової теми М2834 “Розрахунково-теоретичні і експериментальні дослідження з метою створення високоекономічних і надійних проточних частин турбомашин” (№ ГР 0103U001503 2003-2005 рр.), у яких здобувач брав безпосередню участь як виконавець.

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення методів розв'язування прямої, гібридної і оберненої задач розрахунку квазітривимірної дозвукової безвідривної течії в міжлопаткових каналах решіток турбомашин, що ураховують особливості організації розрахункового процесу під час розв'язування задач оптимального проектування решіток з урахуванням профільних і вторинних втрат. Для досягнення цієї мети були поставлені і вирішені наступні задачі наукового дослідження:

– удосконалити метод розв'язування оберненої осесиметричної задачі розрахунку ступеня для визначення граничних умов задачі проектування решіток профілів турбомашин;

– доповнити обчислювальну схему методу проектування турбінного ступеня алгоритмом визначення коефіцієнтів профільних і вторинних втрат лопаткових решіток, втрат від витоку в

радіальний зазор над робочим колесом і додаткових кінцевих втрат, пов'язаних з використанням форми меридіональних контурів проточної частини, відмінної від циліндрової;

– розробити методи розв'язування прямої, гібридної і оберненої задач розрахунку течії в шарі змінної товщини;

– розв'язати задачу оптимального профілювання турбінної решітки, використовуючи розроблені методи розв'язування задач розрахунку течії в шарі змінної товщини.

Об'єкт дослідження: проточна частина турбомашини.

Предмет дослідження: газодинамічні характеристики турбінного ступеня і його лопаткових решіток.

Методи дослідження: розрахунково-теоретичні методи дослідження течії в осьових зазорах ступеня і в міжлопаткових каналах решіток.

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

– вдосконалений метод розв'язування оберненої осесиметричної задачі розрахунку ступеня для визначення граничних умов проектування решіток профілів турбомашин завдяки вибору нової, запропонованої автором, аналітичної залежності для функції течії і доповненню обчислювальної схеми алгоритмом визначення втрат енергії;

– запропоновані нові методи розрахунку, які дозволяють з єдиної методологічної позиції розв'язувати як обернені, так гібридні і прямі задачі розрахунку квазітривимірної течії в міжлопаткових каналах турбомашин;

– вперше задача розрахунку течії в окремому поперечному перерізі шару змінної товщини сформульована як задача, яка розв'язана методами нелінійного програмування, що дозволило здійснити оптимізацію профілю турбінної решітки;

– вперше за допомогою розв'язування оберненої задачі одержав теоретичне підтвердження раніше емпірично визначений вплив локальних хвилеподібних контурів профілю на зниження вторинних втрат в решітках турбомашини.

Практичне значення одержаних результатів:

розроблений комплекс комп'ютерних програм для розв'язування задач проектування ступенів турбомашин в рамках осесиметричної моделі течії;

розроблені методи розв'язування прямої, гібридної і оберненої квазітривимірних задач розрахунку течії в міжлопаткових каналах решіток турбомашин;

розроблений комплекс комп'ютерних програм для розрахунку течії в шарі змінної товщини в межах прямої, гібридної і оберненої задач і для розв'язування задачі оптимального профілювання решіток турбомашин;

виконане вдосконалення конструкції атласного профілю соплової решітки турбіни, внаслідок чого забезпечений низький рівень як профільних, так і вторинних втрат решітки.

Результати досліджень використовуються на підприємстві ВАТ “Турбоатом” (акт від 1.11.2005 р.) і в навчальному процесі кафедри турбінобудування НТУ “ХП” (акт від 21.11.2005 р.).

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертації, що виносяться на захист, одержані автором самостійно. У роботах, написаних і опублікованих у співавторстві, авторові належать такі результати: розроблений алгоритм і програмний модуль для розрахунку втрат енергії в турбінному ступені, вибрана нова аналітична залежність для функції течії і виконані оптимізаційні розрахункові дослідження передостаннього ступеня ЦНТ потужної парової турбіни [1]; комплекс програм для розрахунку групи ступенів у межах осесиметричної моделі течії доповнений програмним модулем розрахунку втрат, виконані тестування цього комплексу і розрахункові дослідження триступінчастого відсіку останніх ступенів ЦНТ потужної парової турбіни [2]; розроблений алгоритм методу розв'язування прямої задачі в шарі змінної товщини і комплекс комп'ютерних програм для розрахунку течії в міжлопаткових каналах кільцевих решіток [3]; уніфікований алгоритм методу розв'язування прямої задачі розрахунку течії в шарі змінної товщини і комплекс комп'ютерних програм для розв'язування гібридних задач [4]; розроблений алгоритм методу розв'язування оберненої задачі розрахунку течії в шарі змінної товщини і комплекс комп'ютерних програм для розрахунку течії в міжлопаткових каналах кільцевих решіток турбомашин [5].

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати досліджень за темою дисертації доповідалися й обговорювалися на: X, XI, XII, XIII міжнародних науково-практичних конференціях “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я” (м. Харків, 2002р., 2003р., 2004р., 2005р.), науковому семінарі, присвяченому 75-річчю кафедри турбінобудування НТУ “ХП” (м. Харків, 2005 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 5-х спеціальних наукових виданнях, що входять до переліку ВАК України.

Структура й обсяг дисертації. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів основного тексту, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації становить 135 сторінок машинописного тексту і містить 43 ілюстрації, 1 з них на окремій сторінці, 2 таблиці, список використаних літературних джерел із 185 найменувань на 19 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 проточної частини турбомашин. Обґрунтовано, що розроблення методів розв'язування задач розрахунку течії, які враховують вимоги і особливості організації обчислювального процесу в задачах оптимального проектування елементів проточних частин турбомашин, є актуальним. Розділ завершується обґрунтуванням і формулюванням мети і задачі дисертаційної роботи.

У другому розділі наведений метод розв'язування оберненої осесиметричної задачі розрахунку ступеня осьової турбіни, який пропонується для визначення граничних умов задач проектування решіток профілів турбомашин.

Розрахунок течії робиться повинцево (спочатку направляючий апарат, а потім робоче колесо) в торцевих перерізах міжвінцевого і міжступінчастого зазорів проточної частини, де робоче тіло, що стискується, вважається нев'язким, течія стала, адіабатична, осесиметрична і безвідривна, а повна ентальпія, ентропія і показник ізоентропи залишаються постійними уздовж лінії течії. Система координат – нерухома циліндрична.

Задача розрахунку течії в зазорі за лопатковим вінцем сформульована таким чином: задані функції розподілу уздовж радіуса масової витрати, швидкості потоку, статичного тиску і питомого об'єму перед вінцем лопатки і розподілу статичного тиску за вінцем лопатки; знайти на всіх радіусах перерізу за вінцем питомий об'єм робочого тіла, осьові, окружні та радіальні складові швидкості потоку в абсолютному та відносному русі.

Система рівнянь, що описує рух робочого тіла і перетворення енергії у вінці ступеня турбіни, складається з п'яти відомих рівнянь: (1) - рівняння закону збереження енергії в абсолютному (для нерухомої решітки) і відносному (для решітки, що обертається) русі уздовж лінії течії; (2) - рівняння ізоентропного процесу уздовж лінії течії; (3) - рівняння Ейлера в проекції на радіальний напрям; (4) - рівняння Ейлера в проекції на осьовий напрям; (5) - рівняння нерозривності.

Завдяки застосуванню функції масової витрати $G \llcorner, R _$ диференціальні рівняння (3), (4) і (5) зводяться до одного рівняння

$$v^2 \frac{dG}{dF} \left(\frac{d}{dz} \left(\frac{dG}{dF} \right) \right) \operatorname{tg} \gamma + \frac{d}{dz} (\operatorname{tg} \gamma) \frac{dG}{dF} - \left(\frac{\partial P}{\partial z} + \operatorname{tg} \gamma \frac{\partial P}{\partial R} \right) \frac{v}{a^2} \operatorname{tg} \gamma \Big) C_z -$$

$$-\frac{1}{R} \left(C^2 - v^2 \left(\frac{dG}{dF} \right)^2 + tg^2 \gamma \right) = -v \frac{\partial P}{\partial R} \quad (6)$$

$$\text{де } \frac{\partial P}{\partial z} = \frac{v \cdot a^2 \frac{dG}{dF}}{\left(v \cdot \frac{dG}{dF} \right)^2 - a^2} \left(\frac{d}{dz} \left(\frac{dG}{dF} \right) \cdot v - \frac{v}{a^2} \frac{dG}{dF} \frac{\partial P}{\partial R} \cdot tg \gamma \right),$$

γ – кут нахилу лінії рівної витрати в меридіональній площині,

a – швидкість звуку.

Система рівнянь (1), (2), (6) розв'язується методами нелінійного програмування.

Функція масової витрати має вигляд $G_{\Sigma, R} = G_I \cdot \Psi_{\Sigma, R}$, де G_I – відома сумарна витрата робочого тіла через вінець, $\Psi_{\Sigma, R} = f(F_{\Sigma, R}, x_{\Sigma, R})$ – функція, що описує розподіл безрозмірної функції течії в межах зазору, $x_{\Sigma, R}$ – безперервна функція, що двічі диференціюється. Пошук її дійсних коефіцієнтів відбувається під час розв'язування задачі розрахунку течії в перерізі $z = const$ у зазорі за вінцем. Запропоновано новий вигляд безрозмірної функції течії

$$\Psi_{\Sigma, R} = \frac{F_{\Sigma, R} + x_{\Sigma, R} F_{\Sigma, R}}{1 + x_{\Sigma, R} F_{\Sigma, R}} \quad (7)$$

Для визначення витрат у ступеню турбіни вибрана методика розрахунку витрат Kasker&Осарич, яка отримала найвищі оцінки при порівняльному аналізі існуючих методик розрахунку витрат на основі експериментальних та розрахункових досліджень окремих ступенів та дво-, три- і чотиріступінчастих турбін. Методика була доповнена розробленою на кафедрі турбінобудування НТУ „ХП” методикою оцінки додаткових кінцевих витрат, які викликані застосуванням складних форм периферійних меридіональних контурів ступенів.

У третьому розділі розглянуті нові методи розв'язування прямої, гібридної і оберненої задач розрахунку течії в міжлопаткових каналах решіток турбомашин в шарі змінної товщини на поверхні обертання S_1 .

Робоче тіло, що стискується, вважається нев'язким, течія стала, адіабатична, осесиметрична і безвідривна, а повна ентальпія, ентропія і показник ізоентропи залишаються постійними уздовж лінії течії. Математична модель течії містить відомі рівняння, які записані у циліндричній системі

координат \bar{r}, \bar{z} : (8) – рівняння закону збереження енергії уздовж лінії течії; (9) – рівняння ізоентропного процесу уздовж лінії течії; (10) – рівняння нерозривності для шару, товщиною h ; (11) – рівняння Ейлера в проекції на осьовий напрям; (12) – рівняння Ейлера в проекції на окружний напрям.

Обмежимося розглядом випадку циліндричної поверхні обертання S_1 , тому що розроблені методи розв'язування задач розрахунку течії не залежать від виду поверхні обертання. Диференціальні рівняння (10), (11), (12) зведемо до одного рівняння

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} = \frac{v \left[M_{w_z}^2 - 1 \left(\frac{\partial^2 G}{\partial z^2} \frac{\partial G}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 G}{\partial \theta \partial z} \frac{\partial G}{\partial z} \right) - M_{w_z}^2 \frac{\partial G}{\partial z} \left(\frac{\text{ctg} \beta}{R} \frac{\partial^2 G}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial \theta \partial z} \right) \right]}{h^2 M_{w_z}^2 - 1 + \frac{v^2}{a^2} \left(\frac{\partial G}{\partial z} \right)^2}, \quad (13)$$

де M_{w_z} – число Маха, визначене за осьовою складовою швидкості w_z ;

$G(\bar{r}, \bar{z}) = m \Psi(\bar{r}, \bar{z})$ – функція масової витрати;

m – масова витрата крізь шар;

Ψ – безрозмірна функція течії, $\Psi \in [0, 1]$;

β – кут потоку на поверхні обертання S_1 .

Тепер математична модель течії складається з трьох рівнянь (8), (9) і (13), з яких два алгебраїчних і одне диференціальне.

Абсолютна і відносна площі перерізу шару $z = \text{const}$ змінюються від сторони розрідження каналу φ_s до сторони тиску каналу φ_p : $F(\bar{\theta}, \bar{z}) = hr(\bar{\theta} - \varphi_s)$, $\bar{F}(\bar{\theta}, \bar{z}) = \frac{\bar{\theta} - \varphi_s}{\varphi_p - \varphi_s}$

$0 \leq \bar{F}(\bar{\theta}, \bar{z}) \leq 1$, $\varphi_s \leq \bar{\theta} \leq \varphi_p$. Для апроксимації функції течії використовуватимемо функцію того ж виду, що і функція (7)

$$\Psi(\bar{\theta}, \bar{z}) = \frac{\bar{F}(\bar{\theta}, \bar{z}) + x(\bar{\theta}, \bar{z}) \bar{F}(\bar{\theta}, \bar{z})}{1 + x(\bar{\theta}, \bar{z}) \bar{F}(\bar{\theta}, \bar{z})}, \quad (14)$$

де $x(\bar{\theta}, \bar{z})$ – безперервна функція, що двічі диференціюється, з ділянкою зміни $-1 < x(\bar{\theta}, \bar{z}) < \infty$.

Якщо $x \in \mathbb{R}, z \in \mathbb{R}, f \in \mathbb{R}, a_0 \in \mathbb{R}, a_1 \in \mathbb{R}, \dots, a_l \in \mathbb{R}$, тоді в будь-якій точці θ_j перерізу каналу $z = z_j$ величини $a_0 \in \mathbb{R}, a_1 \in \mathbb{R}, \dots, a_l \in \mathbb{R}, \frac{\partial a_0}{\partial z} \in \mathbb{R}, \frac{\partial a_1}{\partial z} \in \mathbb{R}, \dots, \frac{\partial a_l}{\partial z} \in \mathbb{R}, \frac{\partial^2 a_0}{\partial z^2} \in \mathbb{R}, \frac{\partial^2 a_1}{\partial z^2} \in \mathbb{R}, \dots, \frac{\partial^2 a_l}{\partial z^2} \in \mathbb{R}$ дійсні числа, а функція $\Psi \in \mathbb{R}, z \in \mathbb{R}$ – функція 3l дійсних змінних.

Пряма і гібридна задачі є окремими випадками оберненої задачі. Тому виклад розроблених методів розрахунку течії почнемо з методу розв'язування оберненої задачі.

Обернена задача. Задані: 1) масова витрата крізь шар m ; 2) повні тиск p^* і питомий об'єм v^* робочого тіла перед або за каналом; 3) геометрія однієї з ліній течії $\varphi = \varphi \in \mathbb{R}$ (окрім ліній течії $\Psi \in \mathbb{R}, z \in \mathbb{R} = 0$ і $\Psi \in \mathbb{R}, z \in \mathbb{R} = 1$, у разі вибору яких задача переходить в клас гібридних задач) і похідні $\frac{d\varphi}{dz} \in \mathbb{R}, \frac{d^2\varphi}{dz^2} \in \mathbb{R}, \frac{d^3\varphi}{dz^3} \in \mathbb{R}$; 4) швидкість уздовж вибраної лінії течії $W = W \in \mathbb{R}$ і її похідні $\frac{dW}{dz} \in \mathbb{R}, \frac{d^2W}{dz^2} \in \mathbb{R}$. Визначити на поверхні S_1 : 1) межі каналу $\varphi_s = \varphi_s \in \mathbb{R}$ і $\varphi_p = \varphi_p \in \mathbb{R}$; 2) параметри робочого тіла в будь-якій точці шару (рис.1.).

Розділимо задачу на дві підзадачі: 1) для частини масової витрати m_1 знайти геометрію сторони тиску $\varphi_p = \varphi_p \in \mathbb{R}$ і визначити в будь-якій точці шару між лінією течії $\varphi = \varphi \in \mathbb{R}$ і стороною тиску параметри робочого тіла; 2) для частини масової витрати m_2 знайти геометрію сторони розрідження $\varphi_s = \varphi_s \in \mathbb{R}$ і визначити в будь-якій точці шару між лінією течії $\varphi = \varphi \in \mathbb{R}$ і стороною розрідження 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.

Виберемо будь-який з перерізів шару $z = const$. Хай заданий вектор незалежних змінних X функції течії (14). У точці $\theta_1 = \varphi \in \mathbb{R}$ на поверхні S_1 відомі величини $W = W \in \mathbb{R}, \frac{dW}{dz} \in \mathbb{R}, \frac{d^2W}{dz^2} \in \mathbb{R}$ і повинна виконуватися система трьох алгебраїчних рівнянь (15) з трьома невідомими $\varphi_p, \frac{d\varphi_p}{dz}, \frac{d^2\varphi_p}{dz^2}$, яка розв'язується аналітично.

$$\left\{ \begin{aligned}
& W^2 - \frac{\nu^2}{h^2} \left[\frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial G}{\partial \theta} \right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial z} \right)^2 \right] = 0, \\
& M_w^2 - 1 \frac{dP}{dz} - \frac{\nu}{h^2 R} \frac{\partial G}{\partial \theta} \left[\operatorname{ctg} \beta \left(\frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 G}{\partial \theta^2} - \frac{\partial^2 G}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 G}{\partial z \partial \theta} \right] - \operatorname{ctg}^2 \beta = 0, \\
& \left(\frac{dW}{dz} \right)^2 + W \frac{d^2 W}{dz^2} + \frac{1}{k} \left[\frac{1}{P} W^2 \frac{d^2 P}{dz^2} + 2W \frac{1}{P} \frac{dP}{dz} \frac{dW}{dz} - \frac{1}{P^2} \left(\frac{dP}{dz} \right)^2 W^2 \right] - \\
& - \left(\frac{1}{hR} \right)^2 \left[2\nu \frac{d\nu}{dz} \frac{\partial G}{\partial \theta} \frac{\partial^2 G}{\partial z \partial \theta} + \nu^2 \frac{\partial^2 G}{\partial z \partial \theta} \left(\frac{\partial^2 G}{\partial z \partial \theta} + \frac{\operatorname{ctg} \beta}{R} \frac{\partial^2 G}{\partial \theta^2} \right) \right] - \\
& - \left(\frac{1}{hR} \right)^2 \nu^2 \frac{\partial G}{\partial \theta} \left(\frac{\partial^3 G}{\partial z^2 \partial \theta} + \frac{\operatorname{ctg} \beta}{R} \frac{\partial^3 G}{\partial \theta^2 \partial z} \right) + \\
& + \left(\frac{1}{hR} \right)^2 \left[2\nu \frac{d\nu}{dz} \frac{\partial G}{\partial z} \frac{\partial^2 G}{\partial \theta^2} + \nu^2 \frac{\partial^2 G}{\partial \theta^2} \left(\frac{\partial^2 G}{\partial z^2} + \frac{\operatorname{ctg} \beta}{R} \frac{\partial^2 G}{\partial z \partial \theta} \right) \right] + \\
& + \left(\frac{1}{hR} \right)^2 \nu^2 \frac{\partial G}{\partial z} \left(\frac{\partial^3 G}{\partial \theta^2 \partial z} + \frac{\operatorname{ctg} \beta}{R} \frac{\partial^3 G}{\partial \theta^3} \right) - \\
& - \left(\frac{1}{h} \right)^2 \left[2\nu \frac{d\nu}{dz} \frac{\partial G}{\partial z} \frac{\partial^2 G}{\partial z^2} + \nu^2 \frac{\partial^2 G}{\partial z^2} \left(\frac{\partial^2 G}{\partial z^2} + \frac{\operatorname{ctg} \beta}{R} \frac{\partial^2 G}{\partial z \partial \theta} \right) \right] - \\
& - \left(\frac{1}{h} \right)^2 \nu^2 \frac{\partial G}{\partial z} \left(\frac{\partial^3 G}{\partial z^3} + \frac{\operatorname{ctg} \beta}{R} \frac{\partial^3 G}{\partial z^2 \partial \theta} \right) + \left(\frac{1}{h} \right)^2 2\nu \frac{d\nu}{dz} \left(\frac{\partial G}{\partial \theta} \right)^{-1} \left(\frac{\partial G}{\partial z} \right)^2 \frac{\partial^2 G}{\partial z \partial \theta} - \\
& - \left(\frac{1}{h} \right)^2 \nu^2 \left(\frac{\partial G}{\partial \theta} \right)^{-2} \left(\frac{\partial G}{\partial z} \right)^2 \frac{\partial^2 G}{\partial z \partial \theta} \left(\frac{\partial^2 G}{\partial z \partial \theta} + \frac{\operatorname{ctg} \beta}{R} \frac{\partial^2 G}{\partial \theta^2} \right) + \\
& + \left(\frac{1}{h} \right)^2 \left[2\nu^2 \left(\frac{\partial G}{\partial \theta} \right)^{-1} \left(\frac{\partial G}{\partial z} \right) \frac{\partial^2 G}{\partial z \partial \theta} \left(\frac{\partial^2 G}{\partial z^2} + \frac{\operatorname{ctg} \beta}{R} \frac{\partial^2 G}{\partial z \partial \theta} \right) \right] + \\
& + \left(\frac{1}{h} \right)^2 \nu^2 \left(\frac{\partial G}{\partial \theta} \right)^{-1} \left(\frac{\partial G}{\partial z} \right)^2 \left(\frac{\partial^3 G}{\partial z^2 \partial \theta} + \frac{\operatorname{ctg} \beta}{R} \frac{\partial^3 G}{\partial \theta^2 \partial z} \right) = 0.
\end{aligned} \right. \quad (15)$$

Виберемо N рівновіддалених точок θ_j , $j = \overline{1, N}$. У будь-якій точці θ_j повинна виконуватися умова, що випливає з (8)

$$\frac{2k}{k-1} \rho^* \nu^* - p_j \nu_j = \left(m_1 \frac{\nu_j}{h} \right)^2 \left[\left(\frac{\partial \Psi_j}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi_j}{\partial \theta} \right)^2 \right]. \quad (16)$$

Тому, використовуючи рівняння (9) і (16), можна розв'язувати дві задачі: 1) для відомого тиску p_j , знайти очікувану масову витрату через шар

$$m_{wj} = \frac{h}{v_j} \sqrt{\left[\frac{2k}{k-1} \rho^* v^* - p_j v_j \right] / \left[\left(\frac{\partial \Psi_j}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi_j}{\partial \theta} \right)^2 \right]} \quad (17)$$

2) знайти тиск p_j , що забезпечує задану витрату m_1 . Ця задача розв'язується як задача пошуку мінімуму функції однієї змінної $g(\rho_j)$.

$$g(\rho_j) = \left\{ \frac{2k}{k-1} \rho^* v^* - p_j v_j - \left(m_1 \frac{v_j}{h} \right)^2 \left[\left(\frac{\partial \Psi_j}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi_j}{\partial \theta} \right)^2 \right] \right\}^2 \rightarrow \min \quad (18)$$

Розв'яжемо рівняння (13) як задачу Коши $\frac{dP}{d\theta} = f(\theta, P)$ у інтервалі $[\varphi_1, \varphi_N]$ з граничною умовою в точці $\theta_1 = \varphi_1$ і перевіримо в точках $\theta_j, j = \overline{1, N}$ виконання умови (16).

Обернена задача розрахунку течії в перерізі $z = const$: знайти такий вектор X , щоб величини $\varphi_p, \frac{d\varphi_p}{dz}, \frac{d^2\varphi_p}{dz^2}$, визначені з системи рівнянь (15), і тиску, одержані в результаті розв'язування рівняння (13), забезпечували виконання умови (16) в кожній точці $\theta_j, j = \overline{1, N}$.

У даній постановці задача розрахунку течії розв'язується методами нелінійного програмування. Алгоритм обчислення цільової функції: 1) визначити $\varphi_p, \frac{d\varphi_p}{dz}, \frac{d^2\varphi_p}{dz^2}$, використовуючи систему рівнянь (15); 2) у точках $\theta_j, j = \overline{1, N}$ обчислити функцію течії (14) і її похідні; 3) у точках з номерами $j = 2, 3, \dots, N-1$ визначити тиск, розв'язавши задачу Коши з граничною умовою в точці $\theta_1 = \varphi_1$, і очікувані масові витрати m_{wj}^* з рівняння (17); 4) у точках з номерами $j = N-1, N-2, \dots, 2$ визначити тиск (розв'язати задачу Коши з граничною умовою, яку знайдено як розв'язування задачі (18) в точці $\theta_N = \varphi_N$) і очікувані масові витрати m_{wj}^* з рівняння (17); 5) обчислити цільову функцію за формулою

$$S(X) = \frac{1}{2(N-2)} \left[\sum_{j=2}^{N-1} \left(\frac{m_{wj}^* - m_1}{m_1} \right)^2 + \sum_{j=2}^{N-1} \left(\frac{m_{wj}^e - m_1}{m_1} \right)^2 \right].$$

Отже, якщо вибрати L перерізів шару $z_0 < z_1 < \dots < z_i < z_{i+1} < \dots < z_L$, тоді для розв'язування оберненої задачі розрахунку течії в каналі необхідно розв'язати L відносно простих обернених задач розрахунку течії в окремих перерізах. При цьому дотримання порядку проходження перерізів не є обов'язковим, оскільки розв'язування задачі в одному з перерізів ніяк не пов'язано з розв'язуванням задачі в будь-якому іншому перерізі. Тому задачі розв'язуються в будь-якій послідовності, групами або одночасно.

Гібридна задача. Позначимо осьові координати початку і кінця шару z_a і z_d відповідно, $z_a < z_b < z_c < z_d$.

Задані: 1) масова витрата через шар m ; 2) повні тиск p^* і питомий об'єм ν^* робочого тіла перед каналом або за каналом; 3) дві частини межі сторони розрідження каналу $\varphi_s = \varphi_s^{\bar{}}$, де $z_a \leq z \leq z_b$ і $z_c \leq z \leq z_d$, і дві частини межі сторони тиску каналу $\varphi_p = \varphi_p^{\bar{}}$, де $z_a \leq z \leq z_b$ і $z_c \leq z \leq z_d$; 4) швидкості потоку $W_s = W_s^{\bar{}}$, $W_p = W_p^{\bar{}}$ і їх похідні $\frac{dW_s^{\bar{}}}{dz}$, $\frac{dW_p^{\bar{}}}{dz}$ на ділянці $z_b < z < z_c$. Визначити на поверхні S_1 : 1) межі каналу $\varphi_s = \varphi_s^{\bar{}}$ і $\varphi_p = \varphi_p^{\bar{}}$ на ділянці $z_b < z < z_c$; 2) параметри робочого тіла в будь-якій точці шару.

Виберемо n рівновіддалених перерізів $z = z_i$, $i = \overline{1, n}$ на ділянці шару $z_b < z < z_c$. У перерізі $z = z_1$ межі міжлопаткового каналу $\varphi_s^{\bar{}}$ і $\varphi_p^{\bar{}}$ оцінимо, використовуючи ряди Тейлора

$$\varphi_s^{\bar{}} = \varphi_s^{\bar{}} + \varphi_{s1} - z_b \frac{d\varphi_s^{\bar{}}}{dz} + \frac{1}{2} \varphi_{s1} - z_b^2 \frac{d^2\varphi_s^{\bar{}}}{dz^2} \quad \text{і} \quad \varphi_p^{\bar{}} = \varphi_p^{\bar{}} + \varphi_{p1} - z_b \frac{d\varphi_p^{\bar{}}}{dz} + \frac{1}{2} \varphi_{p1} - z_b^2 \frac{d^2\varphi_p^{\bar{}}}{dz^2} .$$

Тепер необхідно знайти такий вектор незалежних змінних X функції течії (14), щоб величини $\frac{d\varphi_s^{\bar{}}}{dz}$, $\frac{d^2\varphi_s^{\bar{}}}{dz^2}$, $\frac{d\varphi_p^{\bar{}}}{dz}$,

$\frac{d^2\varphi_p^{\bar{}}}{dz^2}$, які задовольняють перші дві умови системи (15), і тиск, одержаний в результаті розв'язування рівняння (13) як задачі Коші на інтервалі $[\varphi_s^{\bar{}}, \varphi_p^{\bar{}}]$, забезпечували виконання умови (16) в кожній точці θ_j , $j = \overline{1, N}$ перерізу $z = z_1$.

Після розрахунку течії в перерізі $z = z_1$ перейдемо до наступного перерізу і так далі до середини відрізка $z_b < z < z_c$. Для перерізів, що залишилися, здійснимо розрахунок, починаючи з перерізу $z = z_n$. Задача знаходження функції, що описує межу каналу на ділянці, розглядається як крайова задача, яка розв'язується методом Рітца.

Пряма задача. Задані: 1) масова витрата через шар m ; 2) повні тиск p^* і питомий об'єм ν^* перед каналом або за ним; 3) межі сторін розрідження $\varphi_s = \varphi_s^{\bar{}}$ і тиску $\varphi_p = \varphi_p^{\bar{}}$, а так само їх

похідні $\frac{d\varphi_s}{dz}$, $\frac{d^2\varphi_s}{dz^2}$, $\frac{d\varphi_p}{dz}$, $\frac{d^2\varphi_p}{dz^2}$. Визначити в будь-якій точці шару на поверхні S_1 параметри робочого тіла.

Як і для оберненої задачі, для розв'язування прямої задачі необхідно розв'язати L відносно простих задач розрахунку течії в окремих перерізах шару $z = const$ в будь-якій послідовності, групами або одночасно. Пряма задача розрахунку течії в окремому перерізі сформульована таким чином: знайти такий вектор x , щоб тиск, одержуваний в результаті розв'язування задачі Коши на інтервалі $[\varphi_s, \varphi_p]$, забезпечував виконання умови (16) в точках θ_j , $j = \overline{1, N}$.

У четвертому розділі наведені результати тестування розроблених методів і проектування решіток та оптимізації профілів турбін за допомогою оберненої задачі.

Виконані розрахунки течії в каналах атласних робочих решіток TP-1A (рис. 2), TP-2A, TP-2Ак (рис. 3), соплової решітки ТС-1А і порівняння їх з експериментальними даними. На рис.4.2 $\overline{a_m} = a_m / a_1$ – ступінь дифузорності каналу, де a_1 – ширина каналу на вході, a_m – ширина середньої частини каналу (TP-2A $\overline{a_m} = 0,92$, TP-2Ак $\overline{a_m} = 1,08; 1,23$).

Показано, що розроблений метод розв'язування прямої задачі дозволяє з задовільною точністю розраховувати течії без відриву у конфузорних, конфузорно-дифузорних і дифузорних каналах турбінних решіток і отримати розподіл параметрів течії у будь-якій точці міжлопаткового каналу (рис. 2), і в тому числі на поверхні профілю (рис. 3).

Можливості побудови профілів соплових решіток турбіни за допомогою розробленого методу розв'язування оберненої задачі розрахунку течії показані на прикладі трьох варіантів міжлопаткових каналів і відповідних до них профілів (рис. 4).

Вони одержані для трьох варіантів геометричних характеристик середньої лінії течії (AB на рис. 4) при заданому і незмінному для всіх трьох варіантів лінійному розподілі швидкості на середній лінії течії уздовж координатної осі z . Визначені також всі основні газодинамічні параметри течії в будь-якій точці каналу.

Виконане оптимальне проектування соплових решіток з широкими лопатками ($b/l=3$) при обмеженнях на локальну товщину профілю, площу профілю, моменти опору і одержані три оптимальних варіанти решіток профілів (Opt1, Opt2 і Opt3).

Як функція мети вибраний коефіцієнт сумарних втрат енергії решіток профілів. Профільні втрати визначалися з розрахунків турбулентного пограничного шару за методикою Лойцяньського Л.Г., а вторинні – за методикою Гречаніченко Ю.В. Алгоритм побудови оптимального профілю за допомогою оберненої задачі подано на рис. 5.

Під час проектування решіток профілів Opt1 варіювалася форма середньої лінії течії на ділянці від входу в канал до точки B , а розподіл швидкості потоку уздовж середньої лінії течії був таким, як у атласної решітки профілів ТС-1А.

Під час проектування решіток профілів Opt2 і Opt3 на ділянці від входу в канал до точки B одночасно варіювалися форма середньої лінії течії і розподіл швидкості уздовж неї. У вихідній

ділянці міжлопаткового каналу (в точці B і нижче за течією)

Таблиця 1
Розрахункові коефіцієнти втрат
соплових решіток ($M = 0,5$;
 $Re = 9 \cdot 10^5$)

Соплов а решітка	b/l	ζ_{np} %	$\zeta_{от}$ %	ζ %
ТС-1А	3	2,27	5,81	8,08
Opt1	3	2,45	4,18	6,63
Opt2	3	2,41	3,62	6,03
Opt3	3	2,34	4,27	6,61

для усіх варіантів решіток профілів Opt1, Opt2 і Opt3 форма середньої лінії течії і розподіл швидкості потоку уздовж неї прийняті такими, як в міжлопатковому каналі решітки профілів ТС-1А. Різниця форм профілів визначалась

геометричним обмеженням на розподіл товщини профілю, оскільки обмеження на мінімальну площу і моменти опору для профілів Opt1, Opt2 і Opt3 були однаковими, орієнтуючись на початковий профіль ТС-1А. Для Opt1 і Opt2 товщину обмежили тільки діаметром вихідної кромки, а для Opt3 посилили обмеження за цим параметром і задали розподіл товщини уздовж осі z , як у ТС-1А. При цьому площі, моменти опору і габаритні розміри трьох оптимальних решіток профілів, а для Opt3 і товщина в контрольних

перерізах, одержані не менше ніж у початкового профілю.

В результаті спроектовані профілі соплових решіток, які мають локальні хвилеподібні контури, що забезпечило істотне зниження коефіцієнтів сумарних втрат нових решіток (на 1,4 - 2%, табл.1), і таким чином теоретично підтверджений раніше емпірично встановлений (у МЕІ, Росія) вплив хвилеподібних контурів профілю на зниження вторинних і сумарних втрат у решітці турбомашини.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне задачі створення методів розв'язування прямої, гібридної і оберненої задач розрахунку квазітривимірної дозвукової безвідривної течії в решітках турбомашин для оптимального проектування елементів проточних частин турбомашин. Основні результати і висновки дисертаційної роботи полягають у такому:

1. Застосування розроблених на сьогоднішній день методів розв'язування прямої, гібридної і оберненої задач розрахунку течії для оптимального проектування решіток турбомашин пов'язане з великими обчислювальними проблемами, тому розроблення нових методів розв'язування цих задач,

при вирішенні яких не виникають ітераційні процеси, які не сходяться, і не потрібно зберігання інформації про передісторію пошуку, є актуальним.

2. Запропоновані принципи побудови і вибраний єдиний вид базової функції для апроксимації розподілу функції течії уздовж радіуса в торцевих перерізах проточної частини в межах осьових зазорів ступеня турбомашини і уздовж окружного напрямку в поперечних перерізах шару змінної товщини в міжлопаткових каналах.

3. Одержані співвідношення, що апроксимують складні експериментальні залежності втрат енергії, для їх використання в процесі оптимізації ступеня.

4. Вдосконалений метод для визначення граничних умов задачі проектування решіток профілів турбомашин.

5. Розроблені нові методи розв'язування прямої, гібридної і оберненої задач розрахунку течії в шарі змінної товщини міжлопаткового каналу решітки для їх використання в задачах оптимального проектування проточних частин турбомашин. У кожному методі загальна задача розрахунку течії в шарі змінної товщини подана як обмежена множина не зв'язаних між собою відносно простих окремих задач розрахунку течії у вибраних перерізах шару, що забезпечує можливість паралельного розв'язування окремих задач у всьому каналі. Окрема задача розв'язується методами нелінійного програмування, в яких не виникають ітераційні процеси, що не сходяться, і не потрібне зберігання інформації про передісторію пошуку.

6. Розроблений комплекс комп'ютерних програм для розрахунку течії в шарі змінної товщини в межах прямої, гібридної і оберненої задач і для розв'язування задач оптимального профілювання турбінної решітки.

7. Порівняльний аналіз експериментальних даних турбінних решіток з результатами розрахунків підтвердив адекватність розроблених математичних моделей. Визначені параметри течії в міжлопаткових каналах турбінних решіток за допомогою методу розв'язування прямої задачі. Спроектвані міжлопаткові канали соплових решіток і відповідні до них профілі за допомогою методу розв'язування оберненої задачі.

8. Розв'язана задача оптимізації профілю соплових решіток турбіни з короткими лопатками ($b/l=3$) за умов обмежень на локальні мінімальні товщини, мінімальну площу профілю і моменти опору. Спроектвані профілі соплових решіток, які мають локальні хвилеподібні контури, що забезпечило істотне зниження коефіцієнтів сумарних втрат нових решіток (на 1,4 - 2%), і таким чином теоретично підтверджено раніше емпірично встановлений вплив хвилеподібних контурів профілю на зниження вторинних і сумарних втрат у решітці турбомашини.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Субботович В.П., Юдин А.Ю. Оптимизация ступени с длинными лопатками мощной паровой турбины // Вестник Национального технического университета “ХПИ”. - Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2002. – Т. 12, №9. – С.164–169.

2. Субботович В.П., Юдин А.Ю. О решении задач оптимизации группы турбинных ступеней с длинными лопатками // Вестник Национального технического университета “ХПИ”. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2003. – Т. 2, № 9. – С.170–175.

3. Субботович В.П., Юдин А.Ю. Задача расчета скорости на поверхности лопатки турбомашин как задача оптимизации // Вестник Национального технического университета “ХПИ”. – Харьков: НТУ “ХПИ”. - 2004. – № 12. – С.101–106.

4. Субботович В.П., Юдин А.Ю. Постановка и метод решения гибридных задач расчета течения в решетках турбомашин // Вестник Национального технического университета “ХПИ”. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2005. – № 6. – С.44–48.

5. Субботович В.П., Юдин А.Ю. Постановка и метод решения обратной задачи для определения формы межлопаточных каналов кольцевых решеток турбомашин // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2005. – № 29. – С.49–56.

АНОТАЦІЯ

Юдін О. Ю. Пряма, гібридна та обернена задачі для оптимального проектування елементів проточної частини турбомашин. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.16 – Турбомашини та турбоустановки. – Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, Харків, 2006.

Дисертація присвячена розробленню методів розв'язування прямої, гібридної і оберненої задач розрахунку квазітривимірної течії в решітках турбомашин для їх оптимального проектування. У кожному розробленому методі загальна задача розрахунку течії в шарі змінної товщини подана як обмежена множина не зв'язаних між собою відносно простих задач розрахунку течії у вибраних перерізах цього шару, що забезпечує можливість паралельного розв'язування окремих задач у каналі. Ці задачі розв'язуються методами нелінійного програмування. Вдосконалений метод для визначення граничних умов задачі проектування решіток профілів турбомашин. Спроектвані нові соплові решітки, профіль яких має локальні хвилеподібні контури і його коефіцієнт сумарних втрат значно нижчий, ніж у атласних решіток профілів.

Ключові слова: проточна частина турбомашини, квазітривимірна течія, межлопатковий канал, профіль решітки, обернена задача.

АННОТАЦИЯ

Юдин А. Ю. Прямая, гибридная и обратная задачи для оптимального проектирования элементов проточной части турбомашин. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.16 – Турбомашин и турбоустановки. – Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, 2006.

Диссертация посвящена разработке методов решения прямой, гибридной и обратной задач расчета квазитрехмерного течения в решетках турбомашин для их оптимального проектирования.

Обзор литературных источников показал, что применение разработанных на сегодняшний день методов решения прямой, гибридной и обратной задач расчета течения для оптимального проектирования решеток турбомашин связано с большими вычислительными проблемами, поэтому разработка новых методов решения этих задач, учитывающих особенности организации процесса оптимизационного поиска, является актуальной.

В каждом разработанном методе общая задача расчета течения в слое переменной толщины представлена как ограниченное счетное множество не связанных между собой относительно простых частных задач расчета течения в отдельных сечениях этого слоя, что обеспечивает возможность параллельного решения частных задач во всем канале. Частные задачи решаются методами нелинейного программирования, при использовании которых не возникают несходящиеся итерационные процессы, и не требуется хранение информации о предыстории поиска. Это позволило решить проблему существенного сокращения времени расчета квазитрехмерного течения в межлопаточном канале.

Предложены принципы построения и выбран единый вид базовой функции для аппроксимации распределения функции тока вдоль радиуса в торцевых сечениях проточной части в пределах осевых зазоров ступени турбомашин и вдоль окружного направления в поперечных сечениях слоя переменной толщины в межлопаточных каналах. Эта функция позволяет обеспечить широкий спектр распределений расхода рабочего тела вдоль расчетных сечений. Получены аналитические функции, описывающие сложные графические зависимости известной и экспериментально проверенной методики расчета потерь, для ее использования в процессе оптимизационного поиска характеристик ступени. Усовершенствован метод для определения граничных условий задачи проектирования решеток профилей турбомашин.

Разработан комплекс компьютерных программ для расчета течения в слое переменной толщины в рамках прямой, гибридной и обратной задач и для решения задач оптимального профилирования турбинной решетки. Определены параметры течений в межлопаточных каналах турбинных решеток, используя метод решения прямой задачи, и спроектированы межлопаточные

каналы сопловых решеток и соответствующие им профили с помощью метода решения обратной задачи. Сравнительный анализ экспериментальных данных турбинных решеток с результатами расчетов подтвердил адекватность разработанных математических моделей.

Используя разработанный метод решения обратной задачи, решена задача оптимизации профиля сопловой решетки турбины с широкими лопатками при ограничениях на локальные толщины профиля, площадь профиля и моменты сопротивления. Спроектирована новая сопловая решетка, профиль которой имеет локальные волнообразные очертания корытца и спинки и коэффициент суммарных потерь значительно ниже, чем у исходной атласной решетки профилей. Анализ экспериментальных данных подтверждает, что сопловые решетки, спроектированные с локальными волнообразными очертаниями корытца и спинки профиля, могут иметь более низкие вторичные и суммарные потери энергии по сравнению с традиционными сопловыми решетками и удовлетворительно работают в широком диапазоне углов атаки.

Ключевые слова: проточная часть турбомшины, квазитрехмерное течение, межлопаточный канал, профиль решетки, обратная задача.

ANNOTATION

Yudin A.Yu. Direct, hybrid and inverse problems for optimal design of flowing pass elements of turbomachines. - Manuscript

Dissertation for the candidate of technical sciences degree in specialty 05.05.16 – Turbo-machines and turbo-installations. A.M. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine. – Kharkiv, 2006.

The dissertation is devoted to the development of methods for the decision of direct, hybrid and inverse problems of quasi-three-dimensional stream calculation in cascades of turbomachines for their optimum designing. In each developed method the general problem of calculation of stream in a layer of variable thickness is submitted as the limited countable set of relatively simple partial problems of calculation of stream in separate sections of this layer which are not connected among themselves that provides an opportunity of the parallel decision of partial problems in all the channel. Separate problems are solved by methods of nonlinear programming. The improved method for founding out of boundary conditions for the task of turbomachines' profile cascades designing. The new nozzle cascades are designed. Their profiles have pressure side and suction side with local wavy contours and the coefficient of total losses is much lower, than atlas cascades' profiles have.

Keywords: flowing pass of turbomachine, quasi-three-dimensional flow, blade channel, cascade profiles, inverse problem.

Підписано до друку 4.04.2006 р. Формат видання 145x215.
Формат паперу 60x84 1/16. Папір ксерокс ний 80 г/м². Друк-різографія.
Обсяг 0,9 авт.арк. наклад 100 прим. зам. №9777

Віддруковано в типографії
ТОВ СУНП "Брусоль-Курсор Фолієн"
61057, М. Харків, пр.Театральний, 11/13,
т.(057) 714-38-74, 706-31-73