

ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

Кузьменко Олександр Анатольович

АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТУРБІННИХ
ЛОПАТОК З ЛАМІНАРІЗОВАНИМИ ПРОФІЛЯМИ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ
ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК

05.04.12 – турбомашини та турбоустановки

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків-1993

№ 26. 909

Робота виконана на кафедрі турбінобудування Харківського
політехнічного інституту

Науковий керівник - доктор технічних наук,
професор Слітенко А.Ф.

Офіційні опоненти : доктор технічних наук,
професор Гнесін В.І;
кандидат технічних наук,
доцент Гончаренко Л.В.

Провідна організація - Виробниче об'єднання "Харківський
турбінний завод" ім.С.М.Кірова

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00815297 (W)

Захист відбудеться "___" _____ 1993 р. в _____ год.
на засіданні спеціалізованої ради Д. 068.039.01 при
Харківському політехнічному інституті
(310002, Харків, ГСН, вул. Фрунзе, 21).

Із дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського
політехнічного інституту.

Автореферат розісланий "___" _____ 1993 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради

Зайченко Е.Т.

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАКТЕРИСТИКА РОБОТЫ

При проектуванні турбомашин однією з важливих задач є створення лопаточних апаратів з високими аеродинамічними характеристиками при забезпеченні умов прочності та технологічності. Проектування охолоджуємих лопаток газових турбін налагає додаткові вимоги, пов'язані із зменшенням витрат охолоджуючого повітря. В зв'язку з цим важливою та актуальною проблемою є створення ламінарізованих профілей турбінних лопаток, оскільки подальшення ламінарного пограничного шару приводить к зниженню профільних витрат та к зменшенню середньої інтенсивності теплопідводу з боку гарячого газу, в результаті чого зменшується розхід охолоджуючого повітря, необхідний для забезпечення допустимого температурного рівня лопаток.

Другою важливою проблемою є розробка автоматизованих систем проектування (САПР) лопаток турбомашин, які, базуючись на використуванні сучасних ЕОМ, дозволили створювати нові засоби аналітичного опису профільних поверхней турбінних лопаток які забезпечують високу точність їх виготовлення на верстатах з числовим програмним управлінням.

Ціль роботи:

-розробка метода аналітичного профілювання, забезпечуючого неперервність та плавність змінення кривізни вздовж спинки та коритця профілю турбінної лопатки;

-розробка метода многокритеріальної оптимізації профілей лопаток, забезпечуючого створення високоекономічних ламінарізованих профілей при забезпеченні умов прочності та технологічності;

-розробка метода аналітичного опису всієї профільної поверхні лопатки в вигляді зручнот для її виготовлення на верстатах з ЧПУ та внутрішньої поверхні оболонки охолоджуємої лопатки;

-створення програмного комплексу для реалізації на ЕОМ розроблених методів;

-автоматизоване проектування соплових та робочих турбінних лопаток з ламінарізованими профілями, випробування розрахункових та експериментальних досліджень їх аеродинамічних

характеристик.

Наукова новизна роботи:

- розроблен метод аналітичного профілювання лопаток турбомашин з плавною зміною кривизни без ізломів та скачків на опуклій та ввігнутій поверхнях лопатки, дозволяючий цілеспрямовано управляти законом змінення кривизни;
- вирішена багатокритеріальна оптимізаційна задача в багатовимірному просторі параметрів з обліком параметричних та функціональних обмежень при профілюванні турбінних лопаток;
- створен програмний комплекс, реалізуючий оптимізацію профілей лопаток на базі фізичних закономірностей розвитку пограничного шару вздовж спинки та коритця лопатки;
- розроблен метод будування пера лопатки та її внутрішньої порожнини за допомогою поверхні Безье;

Практична цінність роботи.

На базі розроблених методів розроблена система автоматизованого проектування лопаток, яка дозволяє з високою оперативністю проектувати лопатки турбомашин, що мають високі аеродинамічні характеристики при забезпеченні прочносних та технологічних обмежень, та в зручній аналітичній формі задавати поверхні лопаток для їх обробки на верстатах з ЧПУ.

Створені високоєкономічні соплові та робочі турбінні лопатки з ламінаризованими профілями.

Реалізація результатів роботи. Оптимізовані профілі соплових та робочих охолоджувачих лопаток першої ступені газової турбіни використані для модернізації ГТЕ-115. Проведені розрахункові дослідження по створенню ламінаризованих профілей направляючої лопатки, передані на НІО "Турбоатом" для модернізації парової турбіни. Розроблений програмний комплекс впроваджен на НІО "Турбоатом" та використовується при проектуванні охолоджуємих лопаточних апаратів газових турбін.

Апробація роботи. Основні розділи дисертації докладались:

- на Республіканській науково-технічній конференції "Математичне моделювання процесів та конструкції енергетичних і транспортних турбінних установок у системах їх автоматизованого

проекування". м. Готвальд, вересень 1988 г.;

- на 6 Всесоюзній школі-семинарі "Сучасні проблеми газодинаміки та тепломасообміну та шляхи підвищення ефективності енергетичних установок". м. Канів, травень 1989 р.;

- на 37 Всесоюзній науково-технічній сесії по проблемам газових турбін". м. Николаїв, вересень 1990 р.;

на Всесоюзній науково-технічній конференції по газотурбінним та комбінованим установкам. м. Москва, 1991 р.;

на Республіканській науково-технічній конференції.
м. Зів 18-20 вересень 1991 р..

- на кожнорічних науково-технічних конференціях професорського складу, співробітників та аспірантів ХПІ.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 8 друкованих роботах.

Обсяг та структура роботи. Дисертація складається із вступу, п'яти глав, заключення та списку використаних джерел (64 найменувань). Дисертація викладана на 87 сторінках машинописного тексту вміщує 37 малюнків та 5 таблиць.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми.

Перша глава вміщує огляд літературних джерел.

Аналіз методів профілювання турбінних лопаток показав, що вони не забезпечують можливості цілеспрямованого управління законом змінення кривизни вздовж профілю та отримання бажаного розподілу її локальних значень так, щоб не було не тільки скачків, але й ізломів кривизни уздовж спинки та коритця лопатки, які сприяють ранній втраті стійкості ламінарного пограничного шару та його переходу в турбулентний, а в інших випадках навіть можуть привести к локальному відриву.

Використані в дійсний час методи оптимізації профілю лопаток турбін використовують геометричні критерії якості або базуються на приблизному розрахунку коефіцієнтів профільних та кінцевих витрат, що приводить к значним труднощам в отриманні оптимального рішення. Окрім того, традиційні методи не

гарантують знаходження глобального екстремуму для багатоекстремальних цільових функцій, особливо при наліку великої кількості параметричних та функціональних обмежень.

На базі здійсненого аналізу сформульовані основні задачі досліджень.

Друга глава посв'ячена розгляду методів оптимального проектування лопаток.

Запропонован метод аналітичного профілювання, при якому на спинці та коритці профілю відсутні точки спряження і для опису вхідної кромки, на відміну від традиційних методів не використовується дуга окружності, котру необхідно спрягати з спинков та коритцем.

Пропонований метод аналітичного побудування зовнішних обводів турбінних лопаток зоснован на використуванні поліномів Безье-Бернштейна. Крива Безье визначається полігоном, який єдиним образом задає форму кривої. Поліноми Безье будуються в базисі Бернштейна. Базисна функція задається:

$$B_{n,i}(U) = \binom{n}{i} U^i (1-U)^{n-i}, \quad (1)$$

де $\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}$, $0 \leq i \leq n$

n - ступінь поліному, i - порядковий номер вершини.

В цьому випадку радіус-вектор будь-якої точки кривої задається

$$\vec{r}_k(U) = \sum_{i=0}^n R_i B_{n,i}(U), \quad (2)$$

де R_i - радіус-вектор вершин полігону;

U - безрозмірний параметр що змінюється від 0 до 1.

Таким чином, для того щоб задати поліном Безье-Бернштейна, необхідно задати вершини полігону та, використовую рівняння (1) (2), обчислити радіуси-вектори усіх точок поліному.

Для опису профілю турбінної лопатки використовуються два полінома Безье-Бернштейна, які спрягаються в точці зустрічі при рівні значень функцій, перших та других похідних. Для розрахунку координат умовних точок полігонів використовуються такі дані, яким повинна задовольняти побудована решітка профілей: хорда b ,

шаг t , горло a , радіус вихідної кромки r_2 , радіус у точці спряження поліномів на вхідній кромці лопатки r_1 , геометричні кути входу β_{1r} та виходу β_{2r} з решітки, кут заострення вихідної кромки ω_2 , кут відгибу δ , кут установки β_y . За допомогою цих даних розраховуються координати полігону:

$$X_o = P_o \times r_1 \times (1 - \sin \beta_{1r}); \quad (3)$$

$$Y_o = r_2 + (b - P_o \times r_1 - r_2) \times \cos \beta_y + (P_o \times r_1 - r_2) \times \sin \beta_y - P_o \times r_1 \times \cos \beta_{1r},$$

$$X_{oc} = S - r_2 \times \left(1 - \cos\left(\beta_{2r} - \frac{\omega_2}{2}\right)\right);$$

$$Y_{oc} = r_2 \times \left(1 + \sin\left(\beta_{2r} - \frac{\omega_2}{2}\right)\right),$$

де S - ширина решітки :

$$S = b \times \sin \beta_y + P_o \times r_1 \times (1 - \sin \beta_y - \cos \beta_y) + r_2 \times (1 - \sin \beta_y + \cos \beta_y).$$

$$X_{1c} = X_o - (Y_{1c} - Y_o) \times \operatorname{ctg} \beta_{1r}; \quad (4)$$

$$Y_{1c} = Y_o + P_1 \times b;$$

$$X_{3c} = X_{oc} - (Y_{3c} - Y_{oc}) \times \operatorname{tg}(\beta_{2r} - 0,5\omega_2); \quad (5)$$

$$Y_{3c} = Y_{oc} + P_2 \times (Y_b - Y_{oc}),$$

де Y_b - координата точки, яка належить поліному спинки :

$$Y_{2c} = Y_{1c} + 1,2(Y_{1c} - Y_o)^2 \times \sin(\varphi_b - \beta_{1r}) / (r_1 \times \sin^2 \beta_{1r}); \quad (6)$$

$$X_{2c} = X_{1c} + (Y_{2c} - Y_{1c}) \times \operatorname{ctg}(\varphi_b - \beta_{1r}),$$

де φ_b - кут полігону спинки с вершиной в точці 1с.

Для знаходження координат точок 3с и 4с необхідно вирішити систему лінійних рівнянь:

$$S - r_2 - (a + r_2) \cos(\beta_{2r} - 0,5\omega_2 + \delta) = \sum_{i=0}^n X_i B_i^n(u);$$

$$t + r_2 - (a + r_2) \sin(\beta_{2r} - 0,5\omega_2 + \delta) = \sum_{i=0}^n Y_i B_i^n(u);$$

$$Y_{4c} = Y_B + (X_{4c} - X_B) \operatorname{tg}(\beta_{2r} - 0,5\omega_2 + \delta);$$

(7)

$$\frac{d}{du} \left[\sum_{i=0}^n Y_i B_i^n(u) \right] = -\operatorname{ctg}(\beta_{2r} - 0,5\omega_2 + \delta) \times$$

$$\times \frac{d}{du} \left[\sum_{i=0}^n X_i B_i^n(u) \right].$$

Координати коритця обчислюються аналогічно, однак у зв'язку з тим, що на полігон коритця не накладаються обмеження, зв'язані з виконанням заданого горла решітки, систему подібну (7) вирішувати не треба.

В рівняння, для полігонів спинки та коритця входять безрозмірні параметри P_0, \dots, P_n , зміненням яких можна впливати на форму профілю. Ці параметри використовуються при оптимізації зовнішніх обводів профілю. Окрім цього, використання кривих Безье дозволяє точно описувати раніш зпрофільовані профілі турбінних лопаток щоб задавати їх в аналітичному стані для обробки на верстатах с ЧПУ.

Таким чином, даний метод дозволяє аналітично у вигляді двох поліномів Безье-Бернштейна описати профіль лопатки так, що забезпечується плавне змінення кривізни профілю без скачків та ізломів на всій поверхні спинки та коритця. При цьому, шляхом варіювання ряду параметрів, можна цілеспрямовано управлять законом зміни кривізни.

Для побудови оптимальних профілей турбінних лопаток, з високими аеродинамічними характеристиками, розроблен метод оптимізації, заснований на рішенні багатокритеріальної оптимізаційної задачі в багатовимірному просторі параметрів на підставі необхідних функціональних та параметричних обмежень.

Критеріями оптимізації є: координата початку переходу ламінарного пограничного шару в турбулентний на спинці та

коритці профілю, градієнт тиску в косом зрізі. З підвищенням значення координати початку переходу зростає протяг зони профілю з ламінарним режимом течії в пограничному шарі, а із зменшенням градієнта тиску зменшується зріст товщини втрати імпульсу на ділянці спинки лопатки в зоні косоного зрізу. Завдяки цим факторам, зменшується коефіцієнт профільних витрат. Методика знаходження координати початку переходу ламінарного пограничного шару в турбулентний розроблена на кафедрі турбінобудування ХІІ. За оптимізуемі критерії, при бажанні, можна взяти коефіцієнти профільних та кінцевих витрат.

Оптимізаційна задача вирішується при наяві ряду параметричних та функціональних обмежень. Параметричні обмеження визначені геометричними характеристиками турбінної решітки та технологічними можливостями виготовлення лопаток, а функціональні - можливостями прочності.

При рішенні данної задачі оптимізується багатопараметрична система з n -вимірним вектором входу

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (8)$$

де n - кількість варіюваних параметрів, та m -вимірним вектором вихіду:

$$Q(x) = (q_1(x), q_2(x), \dots, q_m(x)), \quad (9)$$

де m -число оптимізуваних критеріїв.

Для генерації пробних точок в багатовимірному просторі параметрів застосовується ЛІТ послідовність.

Для кожної розрахункової точки з обліком параметричних обмежень визначаються значення проєкцій вектора входу, які є ісходними даними для розрахунку. Кожний варіант перевіряється по функціональним обмеженням та з іншими варіантами по значенню оптимізуваних критеріїв. Варіанти, які не пройшли по обмеженням або є гіршими по значенням критеріїв - відбракуються. В результаті рішення формується паретовська множина ефективних рішень $Q(x)$ в m -вимірному просторі критеріїв, відповідне паретівській множині векторів X в n -вимірному просторі параметрів.

Для здобичі глобального критерія $G(x)$, в мінімізації якого зводиться рішення багатокритеріальної задачі, здійснюється зворотка вектора вихіду системи:

$$G(x) = \sum_{i=1}^m \alpha_i \frac{q_i(x) - q_i^*}{q_i^{**} - q_i^*}, \quad (10)$$

де

$$q_i^* = \min q_i(x);$$

$$q_i^{**} = \max q_i(x);$$

q_i - значення критеріїв з паретівської множини;

α_i - вагові коефіцієнти, які враховують ступінь важливості критерія.

Ісходними даними для оптимізації зовнішніх обводів профілю є геометричні характеристики турбінної решітки, параметричні та функціональні обмеження.

В результаті рішення оптимізаційної задачі отримуємо оптимальний варіант профілю з максимальним значенням координати початку переходу ламінарного пограничного шару в турбулентний та мінімальним градієнтом тиску у косому зрізі решітки, що забезпечує низький коефіцієнт профільних витрат.

Окрім оптимального варіанту визначається ще й найбільш ефективні з всієї паретівської множини. Для кожного з них визначається значення варіюваних параметрів, аналізованих функцій та критеріїв якості. Проводиться аналіз по кожному критерію якості та встановлюється послідовність розміщення ефективних варіантів по угіршенню їх критеріїв. Це дозволяє прийняти обосноване рішення по вибіру варіанта, який може бути не оптимальним, але більш простим в виготовленні або більш надійним в експлуатації.

Використання кривих Безье надає зручний інструмент для опису поверхні пара лопатки. Радіус-вектор будь-якої точки поверхні лопатки описується рівнянням:

$$\bar{P}(u, w) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \bar{R}_{i,j} J_{n,i}(u) K_{n,j}(w), \quad (11)$$

де

$$J_{n,i} = \begin{bmatrix} n \\ i \end{bmatrix} u^i (1-u)^{n-i}; \quad 0 \leq i \leq n;$$

$$K_{n,j} = \begin{bmatrix} n \\ j \end{bmatrix} w^j (1-w)^{n-j}; \quad 0 \leq j \leq n;$$

R_{ij} - радіуси-вектори узлових точок полігонів базових січень;

w - напрямок по висоті лопатки ; $0 \leq w \leq 1$;

u - напрямок по ширині лопатки ; $0 \leq u \leq 1$;

p - кількість точок плоского полігону базового січення;

m - кількість базових січень.

Проміжні січення, отримані в результаті опису лопатки поверхнею Безье завжди задовольняють перевірки на гладкість, т.я. вони одержуються не в результаті інтерполяції по базовим січенням, а в результаті рішення рівняння (11). Окрім цього, зрушуючи січення одне відносно одного, можна отримати різну конфігурацію пера лопатки навіть саблевидну. Аналогічно можна описати внутрішню поверхню оболонки охолоджуємих лопаток дефлекторного типу.

Таким чином, поліноми та поверхні Безье-Бернштейна дозволяють достатньо просто формувати не тільки внутрішні обводи профілей, але й отримувати аналітичні залежності, опасаючи перо турбінної лопатки та внутрішню полость для дефлекторних лопаток.

У третій главі розглянута система автоматизованого проектування турбінних лопаток.

Для автоматизації процесу створення нових профілей лопаток була розроблена система автоматизованого проектування (САПР). САПР вмістить до себе декілька підсистем:

- 1 підсистема аналітичної побудови профілей лопаток з плавною зміною кривизни;
- 2 підсистема оптимізації профілей турбінних лопаток;
- 3 підсистема розрахунку потенціального обтіку профілей;
- 4 підсистема розрахунку координат переходу ламінарного пограничного шару в турбулентний;
- 5 підсистема розрахунку змішаного пограничного шару;
- 6 підсистема розрахунку коефіцієнтів профільних та кінцевих витрат;
- 7 підсистема розрахунку геометричних характеристик профілей;
- 8 підсистема формування пера лопатки.
- 9 підсистема побудови внутрішньої полості охолоджуємих лопаток;

10 підсистема перевірки на прочність спроектованих лопаток.

САПР функціонує під керівництвом операційної системи MS-DOS на персональних ЕОМ типу АТ/РС та являє собою функціональну оболонку, розроблену на мовах високого рівня, таких як С та ФОРТРАН 5.0.

Підсистема аналітичного опису профілей застосовується для побудови профілей за допомогою поліномів Безье-Бернштейна, коли повністю задан увесь комплекс ісходних даних для конкретного варіанту. Для завдання необхідних даних, характеризуючих профіль, підсистема наділена інтерактивним пристроєм формування ісходних даних та занесення їх в базу даних. Для аналітичного опису профілей підсистема надає три можливості :

автоматичне проектування;

полуавтоматичне проектування;

ручне проектування з використанням інтерактивних засобів.

При розробці нових профілей з високими аеродинамічними характеристиками необхідно використовувати підсистему оптимального профілювання лопаток.

До підсистеми оптимізації підключаються підсистеми 4-6, за допомогою яких визначаються критерії якості, а потім підключаються підсистеми 7-8 для перевірки по функціональним обмеженням.

Підсистема формування пера лопатки включає до себе модуль аналітичного опису поверхні лопатки з оптимальних базових січень з перевіркою на прочність. Вона також має можливість коректировки профілей, коли лопатка не проходить по прочності.

При проектуванні охолоджуємих дефлекторних лопаток використовується підсистема побудови внутрішньої порожнини. Для цієї підсистеми з бази даних обираються вже спроектовані профілі та в інтерактивному режимі, за допомогою поверхні Безье, створюється внутрішня порожнина та перо лопатки з перевіркою на прочність.

Кінцевим результатом роботи САПР є повністю спроектована та аналітично описана поверхня лопатки. При цьому в зручній формі видається необхідна інформація о поверхневому полігоні для обробки на верстаті з ЧПУ.

У четвертій главі приведені дані практичного застосування розроблених методів та результати досліджень профілей різного типу.

За прототип був прийнят профіль Н4У, застосуваний в парових турбінах ХТЗ.

Профіль НВ був спроектован за допомогою розробленої САПР.

Розрахунки обтіку профілей Н4У та НВ виконані для умов проведення досліджень на експериментальному стенді: температура на вході в решітку лопаток $T_0^* = 330$ К, тиск на вході в решітку лопаток $P_0^* = 0,112$ МПа, $t = 62,5$ мм, $\alpha_{1,2\phi} = 16,6^\circ$.

На мал. 1 приведено розрахований розподіл швидкостей вздовж профілю НВ. На ввігнутій поверхні швидкість неперервно нарастає, що обусловлює ламінарний режим течі на усьому коритці лопатки. На спинці ускорена течя спостерігається до $\bar{X} = 0,37$, а потім швидкість плавно зменшується. Внаслідок чого, на спинці ламінарний режим течі в пограничному шарі затягується до $\bar{X}_{n,n} = 0,47$, а кінець переходу відсутен. В той час, як на коритці профілю Н4У $\bar{X}_{n,n} = 0,085$; $\bar{X}_{k,n} = 0,141$, а на спинці - $\bar{X}_{n,n} = 0,35$; $\bar{X}_{k,n} = 0,41$. Все це створює умови зменшення профільних витрат в решітці з лопатками НВ по зрівнянню с Н4У. В результаті зроблених розрахунків для профілей НВ та Н4У при додержуванні рівнопрочності, одержані слідуочі значення коефіцієнтів профільних та кінцевих витрат: профіль Н4У - $\zeta_{np} = 2,52$ %; $\zeta_k = 2,23$ %; профіль НВ - $\zeta_{np} = 1,85$ %; $\zeta_k = 1,9$ %.

Таким чином, завдяки розрахункам профіль НВ має більш високі аеродинамічні характеристики.

З застосуванням САПР були також спроектовані охолоджуемі соплова та робоча лопатки 1 ступені газової турбіни ГТЕ-115 НПО "Турбоатом". За прототип були обрані лопатки, представлені у робочому проекті цієї турбіни.

В результаті зроблених розрахунків були отримані слідуочі значення коефіцієнтів профільних витрат: для направляючої лопатки у середній сечі: існуючий профіль - 2,16 %; оптимізований профіль - 1,67 %.

В результаті проведеної оптимізації отримані профілі в трьох сечах робочої лопатки: корневої, середньої та периферійної

та поверхня лопатки з внутрішньою полостью (мал. 3). У оптимізованому варіанті робочої лопатки (середня сеча) на коритці швидкість неперервно нарастає (мал. 2), що обусловлює ламінарний режим течі, в тот час, як в ісходному варіанті ублиз координати $\bar{X}=0,135$ спостерігається дифузозна теча, яка визиває перехід ламінарного погранічного шару в турбулентний ($\bar{X}_{\text{н.н}} = -0,135$; $\bar{X}_{\text{к.н}} = 0,151$). На спинці в оптимізованом варіанті ламінарний погранічний шар затянут до $\bar{X}_{\text{н.н}} = 0,47$, а в ісходному варіанті координати початку та кінця переходу дорівнюються $\bar{X}_{\text{н.н}} = -0,164$; $\bar{X}_{\text{к.н}} = 0,195$. Таким чином, в результаті оптимізації в середньої сечі робочої лопатки отриман практично повністю ламінаризований профіль, у якого коефіцієнт сумарних витрат на 0,92% нижче по зрівнянню з ісходним варіантом.

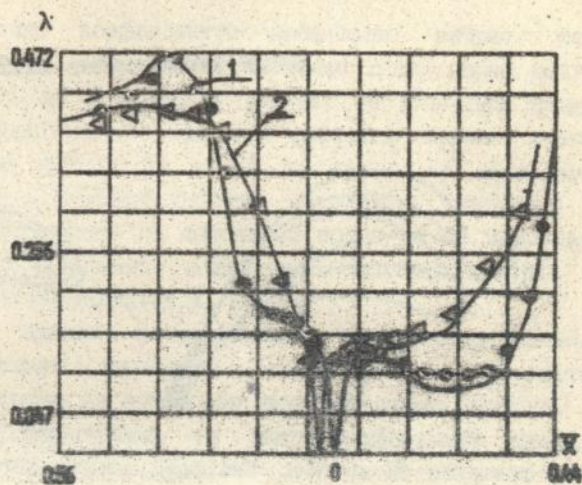
Окрім того, — були розраховані локальні коефіцієнти тепловіддачі вздовж профілю ісходного та оптимізованого варіанту. Так як в оптимізованій лопатці ламінарний режим течі затянут дальш ніж в ісходній, то середній рівень коефіцієнтів тепловіддачі значно нижче. В результаті цього зменшується сумарна кількість теплоти, підводима від горячого газу до охолоджуемой лопатки. Внаслідок цього зменшується розхід охолоджуючого повітря, необхідний для забезпечення заданого температурного рівня лопатки, що приводить до додаткового підвищення К.П.Д цієї ступені на 0,4%.

Як показало розрахункове дослідження, спроектована робоча лопатка є більш економічна, по зрівнянню з прототипом, та забезпечує задані прочносні характеристики.

У п'ятій главі викладені результати експериментального дослідження та зіставлення їх з результатами розрахункових досліджень.

Експериментальне дослідження проводилось при слідуєчих параметрах: тиск на вході в решітку $P_0^* = 0,11$ МПа; температура повітря на вході в решітку $T_0^* = 330^\circ\text{K}$; ступінь турбулентності набігаючого потоку $Tu_0 = 1,2\%$; відносна швидкість на виході з решітки $\lambda_{\text{вих}} = 0,4$; число Рейнольдса по параметрам виходу $Re = 6,4 \cdot 10^5$, що відповідає області автомодельності.

Розподіл швидкостей виходу профілю



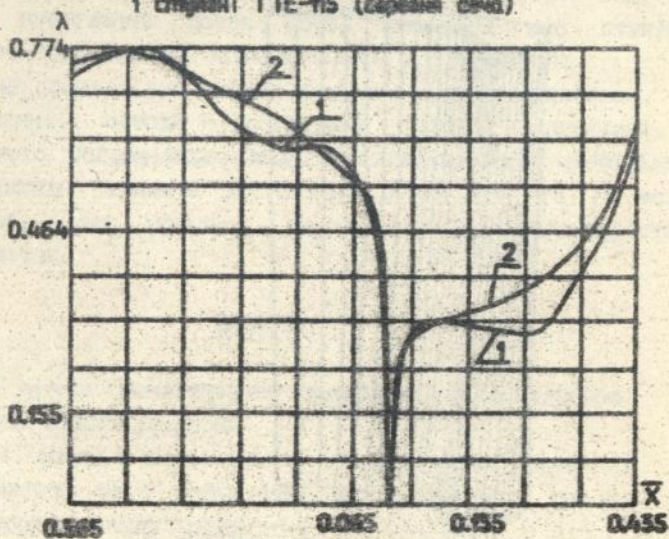
— Розрахунок 1-НМД; 2-НБ.

Експеримент ◊ НМД; ◁ НБ.

Мал. 1

Розподіл швидкостей виходу профілю робочої лопатки

1 ступені ГТЭ-115 (середня сітка).

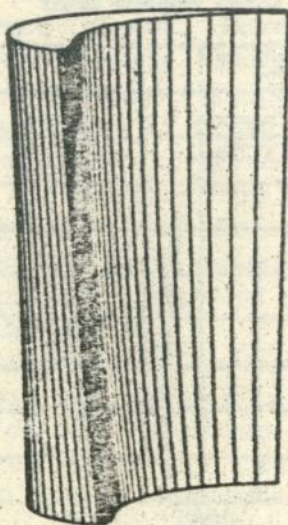
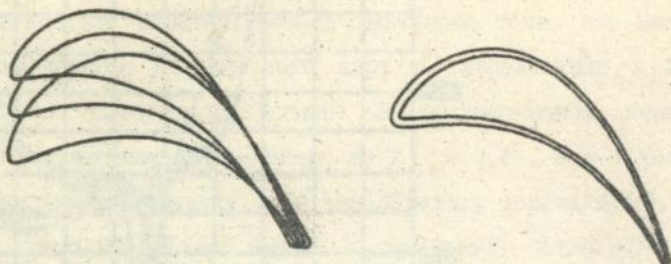


1- Експеримент;

2- розрахунок.

Мал. 2

Оптимальная рабочая лопатка



Для визначення коефіцієнтів профільних витрат, шляхом траверсування потоку, визначались значення тиску перед решіткою P_{1}^* на відстані 50 мм від фронту решітки та значення тиску за решіткою P_{2}^* на відстані 16 мм від вихідних кромek лопаток. Виміри параметрів потоку на вході та виході з досліджуваної решітки проводились пневмометричними насадками. Статичний тиск за решіткою P_{2} визначався за допомогою зонда та по відборам на верхній та нижній пластинах. Відзначення похибки вимірів було впроваджено по рекомендаціям Х. Шенка.

Зрівняльний аналіз розрахункових та експериментальних досліджень дозволив визначити достовірність результатів розрахунку, отриманого за допомогою використаних методів.

Зрівняння розрахункових та експериментальних даних по розподілу швидкостей вздовж профілей Н4У та НБ показало (мал. 1), що точність розрахунку є достатньо гарна.

Також випроводжувалось зрівняння розрахункових та експериментальних значень коефіцієнтів профільних витрат. По результатам експериментальних досліджень осереднені значення коефіцієнтів профільних витрат рівнялись: профіль Н4У - 2,75%; профіль НБ - 2,05%. Більш високі значення коефіцієнтів профільних витрат, отриманих у експерименті пояснюється тим, що в дослідях навігающий потік перед решіткою мав ступінь турбулентності 1,2%, яка не враховувалась у розрахунках.

Зроблений зрівняльний аналіз дозволяє зробити висновок, що використані методи розрахунку обтіку профілей, гідродинамічного пограничного шару та коефіцієнтів профільних витрат дозволяють отримати достовірні результати та їх можна використовувати для аналізу аеродинамічних характеристик турбінних решіток.

ВИСНОВКИ

1. Розроблен метод аналітичного профілювання з плавною зміною кривизни вздовж профілю.
2. Розроблен метод оптимального проектування профілей турбінних лопаток, як з точки зору аеродинамічних, так і прочносних характеристик.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

3. Розроблен метод аналітичного формування пера лопатки за допомогою поверхні Безье у широкому діапазоні змінення форми лопатки хоч до саблевідної, дозволяючій також описувати внутрішню полость охолоджуемой дефлекторной лопатки.
4. Створена САПР та комплекс програм на базі IBM PC/AT, які дозволяють з високою оперативністю розроблювати високоекономічні турбінні лопатки.
5. На базі розроблених методів спроектована серія ефективних турбінних лопаток з ламінарізованими профілями, обладаючи високими аеродинамічними характеристиками.
6. Здійснено експериментальне дослідження аеродинамічних характеристик спроектованих профілів, підтверджуюче надійність розроблених методів.
7. Отримано позитивне рішення на винахід направляючої лопатки з плавною зміною кривізни вздовж спинки та коритця без скачків та ізломів кривізни.

Публикації по роботі

1. Слитенко А.Ф., Кузьменко А.А. Расчетное исследование и анализ влияния различных факторов на переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный // Вища школа / Энергетическое машиностроение. -1988.-вып.46.

2. Слитенко А.Ф., Кузьменко А.А. Влияние изменения формы полигонов при автоматизированном построении профилей турбинных лопаток на их характеристики // Математическое моделирование процессов и конструкций энергетических и транспортных турбинных установок в системах автоматизированного проектирования : Тезисы доклада на республиканской конференции (Готвальд, 7-9 сентября 1988.)- Харьков, 1988.

3. Слитенко А.Ф., Кузьменко А.А. Построение решеток турбинных профилей с помощью полиномов Безье-Бернштейна // Известия вузов / Машиностроение. -1988.-N 9.-С. 77-81.

4. Слитенко А.Ф., Кузьменко А.А. Метод автоматизированного профилирования турбинных лопаток // Современные проблемы газодинамики и теплообмена и пути повышения эффективности энергетических установок: Тезисы доклада на 7 Всесоюзной

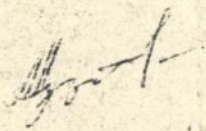
школы-семинара (Канев, 9-19 мая 1989). - Киев, 1989.

5. Слитенко А.Ф., Кузьменко А.А., Челака В.И., Зарубин Л.А., Бумарсков А.О., Мороз Л.И. Исследование эффективности тепло-вой защиты ротора и корпуса газовой турбины высокотемпера- турной установки ГТЭ-115 // Совершенствование теории и техники тепловой защиты энергетических устройств: Тезисы докладов II республиканской конференции (Житомир, сентябрь 1990) с.31-32.

6. Слитенко А.Ф., Кузьменко А.А. Создание высокоскоростных охлаждаемых лопаток с ламинаризованными профилями // Совершенствование схем, параметров и элементов конструкций газотурбинных и комбинированных установок: Тезисы доклада на 37 Всесоюзной научно-технической сессии по проблемам газовых турбин. - Николаев, 1990.

7. Слитенко А.Ф., Кузьменко А.А. Автоматизированное проектирование и исследование совершенства турбинных лопаток с ламинаризованными профилями : Тезисы доклада на Всесоюзной научно-технической конференции по газотурбинным и комбинированным установкам. - Москва, 1991.

8. Слитенко А.Ф., Кузьменко А.А. Повышение экономичности проточных частей турбин за счет применения лопаток с ламинаризованными профилями // Математическое моделирование и вычислительный эксперимент для совершенствования энергетических и транспортных турбоустановок в процессе исследования, проектирования, диагностирования и безопасного функционирования: Тезисы доклада, на республиканской научно-технической конференции (18-20 сентября 1991, г. Зиев). - Харьков, 1991.



Відповідний за випуск д.т.н., проф. Гаркуша А.В.

Підписано к друку 1993 р. Формат 60x84 1/16.

Папір тип. Обсяг 1 п.л. Тираж 100 прим.

Ротапринт ПРОМТРАНСПРОЕКТ
г.Харьков, ул. Тобольска, 42

471404

AB 26.909

AB 26.909