

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

Жуков Юрій Маркович

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ
ТЕЧІЇ ТА ВТРАТ КІНЕТИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ
У ПРИТОРЦЕВИХ ЗОНАХ РЕШТОК
ТУРБІННИХ ЛОПАТОК

05.04.12 - турбомашини та турбоустановки

Автореферат дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

Харків 1997 р.



00751038 (O)

Робота виконана на кафедрі турбобудування Харківського
державного політехнічного університета

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

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,
професор Гнесін В.І.;
кандидат технічних наук,
доцент Дроннік Ю.М.

Провідне підприємство: Інститут технічної теплофізики
НАН України (м.Київ).

Захист відбудеться " 4 " вересня 1997 р. в ____ год. на
засіданні спеціалізованої вченої ради Д 02.09.12 у Харківському
державному політехнічному університеті
(310002, Україна, м.Харків, вул.Фрунзе, 21)

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського
державного політехнічного університета

Автореферат розіслано " 14 " липня 1997 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради

Потетенко О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Необхідність підвищення економічності сучасних та перспективних паротурбінних і газотурбінних установок вимагає розвитку та удосконалення систем автоматизованого проектування і оптимізації лопаткових апаратів турбомашин, які базуються на використанні сучасних ЕОМ. При цьому однією з найважливіших проблем є розробка ефективних методів розрахунку коефіцієнтів втрат кінетичної енергії в решітках турбінних лопаток, які б забезпечували досить високу точність з мінімальними витратами процесорного часу на ЕОМ, що дуже важливо при вирішенні оптимізаційних задач. Але, існуючі методи розрахунку течії у міжлопаткових каналах турбінних решіток з урахуванням виникаючих на обмежуючих поверхнях пограничних шарів в багатьох випадках не задовольняють сучасним вимогам або за точністю, або за витратами машинного часу. Додаткові труднощі виникають у приторцевих областях, де має місце складна тримірна течія, пов'язана з вторинними перетіканнями на торці та примикаючих до нього частинах пера лопатки. Розробка нових та удосконалення існуючих розрахункових методів потребує детального вивчення фізичних закономірностей процесів аеродинаміки в лопаткових апаратах турбомашин, аналізу впливу різноманітних факторів на досліджувані характеристики. Рішенню цих важливих наукових задач і присвячена подана дисертаційна робота.

Мета роботи - створення ефективних методів розрахунку втрат кінетичної енергії в турбінних решітках и розробка за їх допомогою високоекономічних лопаткових апаратів. Для рішення цієї задачі необхідно:

- у великомасштабній турбінній решітці детально дослідити мікро- і макроструктуру тримірних пограничних шарів на торцевій поверхні міжлопаткового каналу та на спинці лопатки в приторцевій зоні;

- визначити розташування, розміри та вплив підковоподібного і канального віхрів на закономірності течії у приторцевій зоні турбінної решітки;

- дослідити розподіл швидкостей за товщиною пограничного шару у різних зонах на торці та на спинці лопатки;

- розробити метод спільного розрахунку пограничних шарів на торцевій поверхні міжлопаткового каналу та на спинці лопатки в приторцевій зоні в квазітримірній постановці;

- удосконалити модель формування кінцевих та профільних втрат у турбінній решітці і методику їх розрахунку;
- провести порівняння результатів розрахунку з існуючими в літературі експериментальними даними;
- з використанням розроблених методів розрахунку спроектувати турбінну решітку з високими аеродинамічними характеристиками.

Наукова новизна роботи:

- істотно удосконалено метод розрахунку тримірного пограничного шару на торцевій поверхні міжлопаткового каналу та враховано вплив підковолодібного вихора на закономірності його розвитку;
- розроблено новий метод розрахунку тримірного пограничного шару на спинці профіля у приторцевій зоні з урахуванням вторинних перетікань;
- отримана нова емпірична залежність для знаходження коефіцієнта кромкових втрат, що враховує вплив пограничних шарів на спинці і коритці лопатки поблизу вихідної кромки;
- удосконалено метод розрахунку коефіцієнтів кінцевих та профільних втрат кінетичної енергії шляхом уточнення визначення величини втрат у пограничних шарах на профілі лопатки та на торцевій поверхні міжлопаткового каналу, а також оцінки втрат кінетичної енергії у каналному вихорі;
- отримані узагальнені залежності, що описують розподілення поздовжньої та поперечної складаючих швидкості за товщиною пограничного шару на торцевій поверхні міжлопаткового каналу і на спинці лопатки у приторцевій зоні;
- на базі IBM PC/AT створено комплекс розрахункових програм для знаходження коефіцієнтів профільних і кінцевих втрат кінетичної енергії в решітках турбінних лопаток.

Практична цінність роботи:

- розроблені методи розрахунку і комплекс програм на ЕОМ дозволяють з високою точністю визначати коефіцієнти профільних і кінцевих втрат кінетичної енергії в решітках турбінних лопаток при малих витратах процесорного часу, що дуже важливо при оптимізаційних розрахунках під час створення нових лопаткових профілів;

-за допомогою цього програмного комплексу створен новий ламінаризований лопатковий профіль, що володіє високими аеродинамічними та міцнісними характеристиками;

-комплекс може використовуватися як автономно, так і разом з іншими програмними продуктами як підсистема САПР турбоустановок.

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися:

-на міжнародній науково - технічній конференції "Комп'ютерна наука, техніка, технологія, здоров'я", м. Харків, 1993, 1994, 1996, 1997 р.р.;

-на міжнародній науково - технічній конференції "Удосконалення енергетичних і транспортних турбоустановок засобами математичного моделювання, обчислювального та фізичного експериментів", м. Зміїв, 1994 р.

-на 3-ій міжнародній науково - технічній конференції "Aerothermodynamics of Internal Flows", м.Пекін, Китай, 1996 р.

Публікації. Результати дисертаційної роботи відображені в 11 друкованих роботах.

Обсяг та структура роботи. Дисертація складається з вступу, чотирьох глав, висновків та списку використаних джерел, який включає 88 найменувань. Містить 134 сторінки машинописного тексту, 112 малюнків і 17 таблиць.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність розглядаємої теми.

Перша глава містить огляд літературних джерел по темі дисертаційної роботи і постановку задачі дослідження.

З наведеного літературного огляду виходить, що економічність турбінних решіток особливо при невеликій відносній висоті лопаток в значній мірі залежить від величини кінцевих втрат. Тому задача надійного визначення кінцевих втрат та їх зниження є досить актуальною. Її рішення присвячено багато експериментальних та розрахункових досліджень, створено цілий ряд розрахункових методів, які базуються на різних фізичних і математичних моделях.

Аналіз експериментальних даних, методів розрахунку пограничного шару на торцевій поверхні міжлопаткового каналу та моделей формування кінцевих втрат у турбінних решітках виявив:

Л.В. Д. Стефанів
2017 рік

-незважаючи на значну кількість проведених експериментальних досліджень, до цих пір нема єдиного чіткого уявлення про закономірності розвитку тримірного пограничного шару на торцевій поверхні міжлопаткового каналу, про структуру і розміри підковоподібного вихора, про його вплив на пограничні шари на торці та на спинці лопатки, а також на формування канального вихора;

-існують значні відмінності в запропонованих різними авторами моделях формування кінцевих втрат у турбінних решітках;

-при розрахунку профілей швидкості у пограничному шарі на торці використовуються різноманітні залежності, які дають результати, котрі значно відрізняються один від одного, а це істотно впливає на визначення характеристик торцевого пограничного шару;

-більшість авторів вирішує рівняння пограничного шару в двохмірній постановці уздовж середньої лінії току і при цьому не враховує впливу підковоподібного вихора на структуру пограничного шару за зоною його проходження;

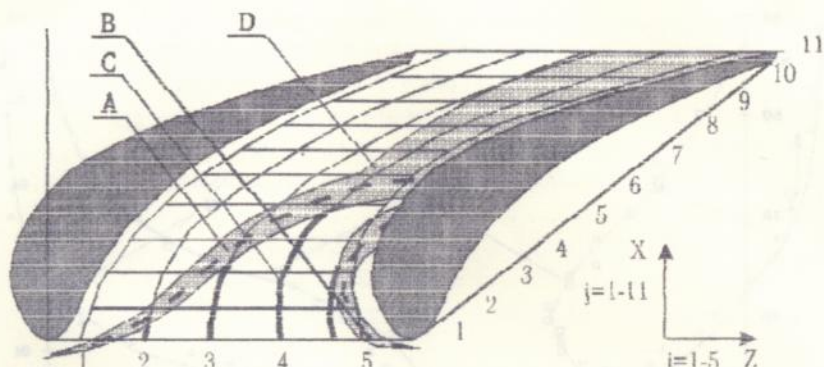
-в жоднім з відомих дисертанту інтегральних методів визначення кінцевих втрат не розраховується тримірний пограничний шар у приторцевій зоні на спинці лопатки;

-у викладених в літературі методах розрахунку, що базуються на інтегральних співвідношеннях пограничного шару, на всій торцевій поверхні розподіл швидкостей у пограничному шару визначається за єдиною залежністю, хоча в літературі є декілька таких залежностей, які отримані, видимо, при різних умовах течії: при різних сполученнях поздовжнього і поперечного градієнтів тиску та різної інтенсивності вторинних течій; тому для участків, що розташовані вище або нижче за течією від зони проходження вітки підковоподібного вихора і на різній відстані від цієї зони, що характеризуються різною інтенсивністю вторинних перетікань, розподіл швидкостей за товщиною пограничного шару має відображатися різними залежностями.

На основі виконанного аналізу сформульовані задачі дослідження.

Друга глава містить дані експериментального дослідження закономірностей течії в великомасштабній решітці турбінних лопаток.

Описано експериментальний стенд, який використано для вивчення аеродинамічних характеристик основної течії та структури



Малюнок 1 - Результати візуалізації течії на торці міжлопаткового каналу димовим методом

пограничних шарів на торці міжлопаткового каналу і на профілю лопатки.

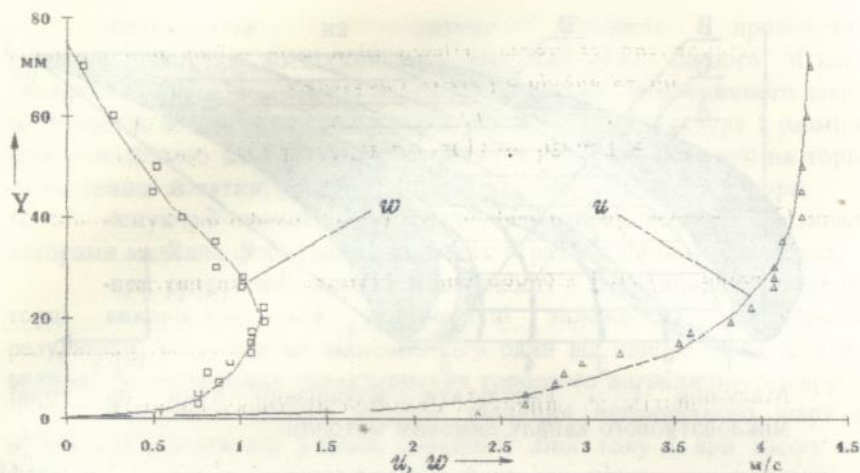
Подані результати візуалізації течії методом шовковинок і димовим методом (див. малюнок 1), виконані з метою попереднього визначення основних особливостей течії та полегшення інтерпретації експериментальних даних, отриманих зондовими та термоанемометричними вимірюваннями. Визначені аеродинамічні характеристики основної течії, а також макро- і мікροструктура пограничних шарів у різних зонах міжлопаткового каналу, отримані за допомогою триканального та п'ятиканального пневмометричних зондів і термоанемометра постійної температури конструкції ОКБ Київського НІІ ГТ і ПЗ.

Наведена методика обробки експериментальних даних.

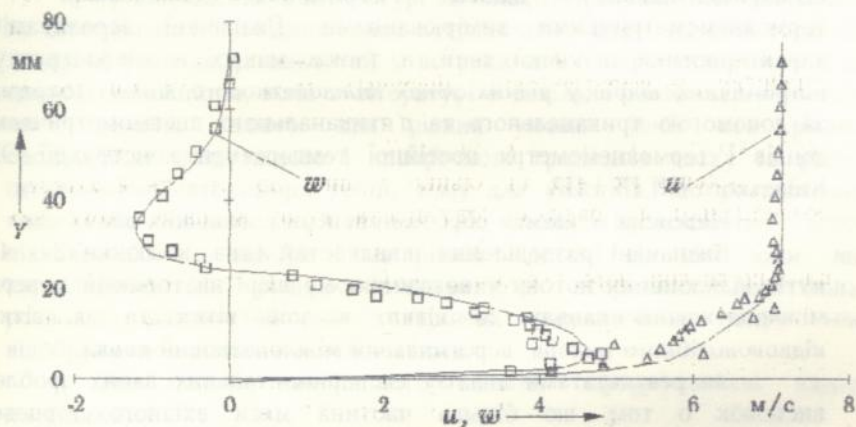
Визначені розподілення швидкостей (див. малюнки 2 - 4) і кутів відклонення потоку у пограничному шарі на торцевій поверхні міжлопаткового каналу до вітки, в зоні вітки та за віткою підковоподібного вихора, всередині міжлопаткового каналу.

За результатами аналізу експериментальних даних зроблено висновок о том, що більша частина маси вхідного торцевого пограничного шару захоплюється та відноситься віткою підковоподібного вихора, який всередині міжлопаткового каналу, а далі на торцевій поверхні утворюється новий пограничний шар.

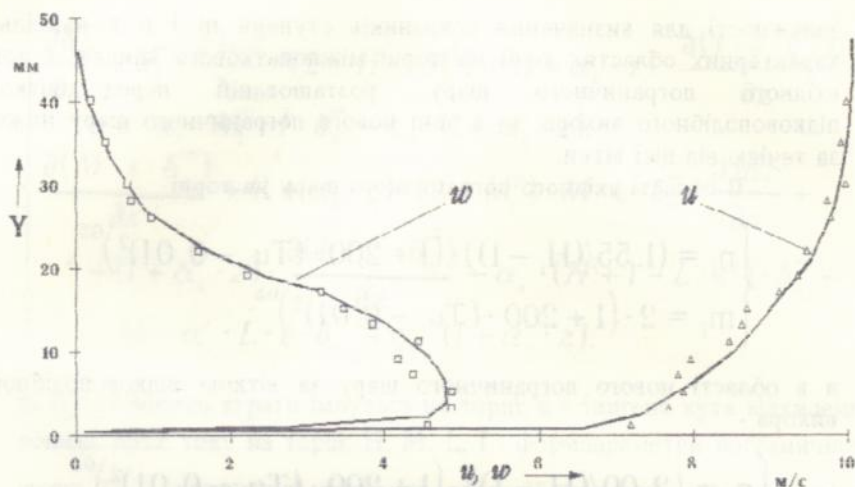
За результатами експериментальних досліджень течію на торцевій поверхні було розділено на чотири основні зони: зону, яка зайнята вхідним пограничним шаром, зону проходження вітки підковоподібного вихора, зону нового пограничного шару, який



Малюнок 2 - Розподілення поздовжньої u та поперечної w складаючих швидкості за товщиною пограничного шару перед зоною вітки підковоподібного вихора на середній лінії міжлопаткового каналу решітки великомасштабних соплових лопаток, $x = 0.012$



Малюнок 3 - Розподілення поздовжньої u та поперечної w складаючих швидкості за товщиною пограничного шару у зоні вітки підковоподібного вихора на середній лінії міжлопаткового каналу решітки великомасштабних соплових лопаток, $\bar{x} = 0.340$



Малюнок 5 - Розподілення поздовжньої u та поперечної w складаючих швидкості за товщиною пограничного шару за зоною вітки підковоподібного вихора на середній лінії міжлопаткового каналу решітки великомасштабних соплових лопаток, $\bar{x} = 0.570$

утворюється за цією віткою, і зону каналного вихора. Експериментально було встановлено, що універсальний профіль швидкості у пограничному шарі для всієї торцевої поверхні міжлопаткового каналу та для зони вторинних перетікань на спинці лопатки відсутній.

Для підвищення точності розрахунків були побудовані узагальнені залежності змінення швидкості за товщиною тримірного пограничного шару для різних участків течії. Базовим профілем швидкості було обрано профіль, аналогічний профілю Прандтля-Мейджера:

$$\frac{u}{C_{\infty}} = \eta^{\frac{1}{n}}, \quad \frac{w}{C_{\infty}} = \varepsilon \cdot \eta^{\frac{1}{n}} \cdot (1 - \eta)^m$$

де показники ступеня m і n залежать від характеристик пограничного шару, числа Рейнольдса і ступеня турбулентності зовнішнього потоку.

Статистична обробка експериментальних даних, отриманих на великомасштабному аеродинамічному стенді та результатів досліджень, що знайдені в літературних джерелах для різних типів соплових і робочих решіток турбінних лопаток дозволила збудувати

залежності для визначення показників ступеня m і n в найбільш характерних областях течії на торці міжлопаткового каналу: в зоні вхідного пограничного шару, розташованій перед віткою підковоподібного вихора, та в зоні нового пограничного шару нижче за течією від цієї вітки.

В області вхідного пограничного шару на торці

$$\begin{cases} n_i = (1.55/(H_i - 1)) \cdot (1 + 200 \cdot (Tu_i - 0.01)^2)^{0.5}, \\ m_i = 2 \cdot (1 + 200 \cdot (Tu_i - 0.01)^2)^{0.5}, \end{cases}$$

а в області нового пограничного шару за віткою підковоподібного вихора -

$$\begin{cases} n_i = (2.00/(H_i - 1)) \cdot (1 + 200 \cdot (Tu_i - 0.01)^2)^{0.5}, \\ m = \left(2 + 2 \cdot \bar{s}^{1/n} \cdot \bar{\chi}_i \right) \cdot (1 + 200 \cdot (Tu_i - 0.01)^2)^{0.5}, \end{cases}$$

де H_i - формпараметр пограничного шару, Tu_i - ступень турбулентності зовнішнього потоку, $\bar{s} = s/b$ - відносна стрілка прогибу скелетної лінії профілю, $\bar{\chi}_i = \chi_i/\ell_b$ - відносна відстань від вітки підковоподібного вихора до розглядаємої точки. Середня відносна погрішність для цих виразів складає 12 і 14% відповідно, а середньоквадратичне відхилення - 0.24 і 0.28. Ці залежності з досить високою точністю описують розподілення поздовжньої та поперечної складаючих швидкості за товщиною тримірного пограничного шару і на спиці лопатки в приторцевій зоні.

Третя глава присвячена розробці метода спільного розрахунку тримірних пограничних шарів на торцевій поверхні міжлопаткового каналу та на спиці лопатки у приторцевій зоні.

Для опису течення у тримірному торцевому пограничному шарі з урахуванням стискуваності робочого тіла у криволінійній ортогональній системі координат використовується така система рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial \delta_x^{**}}{\partial x} + \delta_x^{**} \cdot \frac{\partial \ln c}{\partial x} \cdot (2 + H - M_1^2) + (1 + \alpha'_x \cdot z) \cdot \frac{\partial (I \cdot \varepsilon \cdot \delta_x^{**})}{\partial z} - \\ & - \varepsilon \cdot \alpha'_x \cdot M_1^2 \cdot I \cdot \delta_x^{**} = \zeta_x \cdot (1 + \alpha'_x \cdot z), \\ & \frac{\partial (M \cdot \varepsilon \cdot \delta_x^{**})}{\partial x} + (1 + \alpha'_x \cdot z) \cdot (2 - M_1^2) \cdot M \cdot \varepsilon \cdot \delta_x^{**} \cdot \frac{\partial \ln c}{\partial x} + \\ & + (1 + \alpha'_x \cdot z) \cdot \frac{\partial (L \cdot \varepsilon^2 \cdot \delta_x^{**})}{\partial z} - \alpha'_x \cdot (H + 1 - L \cdot \varepsilon^2) \cdot \delta_x^{**} - \\ & - M_1^2 \cdot \alpha'_x \cdot L \cdot \varepsilon \cdot \delta_x^{**} = \zeta_x \cdot (1 + \alpha'_x \cdot z). \end{aligned} \right.$$

де δ_x^{**} - товщина втрати імпульса на торці; ε - тангенс кута відхилення донних ліній току на торці; H, M, L, I - формпараметри пограничного шару; ζ_x - коефіцієнт тертя на торцевій поверхні міжлопаткового каналу; α'_x - кут між вектором швидкості зовнішньої течії на торці міжлопаткового каналу і нормаллю до фронту решітки лопаток. Ця система рівнянь вирішується методом Рунге-Кутта.

При розробці розрахункового метода було прийняте припущення про те, що підковоподібний вихор утягує в обертальний рух й уносить з собою більшу частину вхідного пограничного шару. За ним на торці утворюється новий пограничний шар. У зв'язку з цим, розрахунок торцевого пограничного шару запропоновано проводити не безперервно від входу в решітку до виходу з неї, як це робилось раніше, а послідовно на двох ділянках. На першій ділянці від вхідного фронту решітки до зони проходження вітки підковоподібного вихора розраховується вхідний торцевий пограничний шар, для якого межевою умовою приймається товщина втрати імпульсу накопиченого на вході в решітку пограничного шару, а на наступній ділянці розраховується новий торцевий пограничний шар, який утворюється за віткою підковоподібного вихора і розвивається далі вниз за потоком аж до вихідного фронту решітки.

Розташування цієї вітки підковоподібного вихора показано на малюнку 1. Воно приблизно визначається сідовою точкою, розташованною поблизу точки зустрічі на вхідній кромці лопатки, і точкою максимуму швидкості на спинці сусіднього профілю.

На основі аналізу результатів візуалізації течії та винайдених в літературі даних, було встановлено, що напрямок донних ліній току

безпосередньо за зоною проходження вітки підковоподібного вихора практично паралельно осі цієї вітки.

Начальна товщина втрати імпульсу нового пограничного шару може бути оцінена з урахуванням слідуючих міркувань. Експериментальні дані що до трасування нового пограничного шару за віткою підковоподібного вихора за допомогою етілену*, свідчать про те, що процентий склад етілену в зоні торцевого пограничного шару за віткою підковоподібного вихора складав по різним даним лише $8 \div 12\%$, а більша його частина - понад 80% була знайдена в області капального вихора, який формується під впливом підковоподібного вихора. Таким чином основна маса вхідного пограничного шару з містяться у ньому етіленом уноситься віткою підковоподібного вихора до спинки лопатки і бере участь в формуванні капального вихора. Приблизно можна прийняти, що співвідношення між товщинами втрати імпульсу пограничного шару у перерізах за й перед зоною проходження вітки підковоподібного вихора відповідає співвідношенню їх мас -

$$\delta_{\text{за віткою}}^{**} = (0.08 \div 0.12) \cdot \delta_{\text{перед віткою}}^{**}$$

На основі узагальнення літературних даних, а також результатів вимірів та візуалізації течії, отриманих на великомасштабному стенді, встановлені слідуючі закономірності вторинних перетікань на спинку лопатки в приторцевій зоні. На ділянці від вхідної кромки до міста підходу до профіля вітки підковоподібного вихора, що йде уздовж спинки лопатки, перетікання підторможеної рідини з торця на спинку лопатки практично не відбувається. В зоні між вітками підковоподібного вихора перетікання рідини з торцевого пограничного шару на спинку лопатки відбувається з поблизулежачої лінії току по нормалі до осі X, яка спрямована уздовж лінії току в зовнішньому потоці на торці поблизу спинки. Оскільки для цієї ділянки маса рідини, яка перетікла, значно менше маси, яка тече в пограничному шарі на профілі, величина межових кутів відклонення донних ліній току на спинці лопатки виходить невеликою і висота зони впливу вторинних перетікань тут мала. В місці підходу до спинки вітки підковоподібного вихора, що перетинає міжлопатковий канал, на спинку лопатки перетікає майже

* - Мур, Сміт. Течія у турбінній решітці. Ч. II. Визначення траєкторій за допомогою детектора етілена // Енергетичні машини та установки. -1984. -Т. 106. -№ 2. -С. 67-72.

уся маса вхідного пограничного шару, яка підхоплена цією віткою вихора. Це викликає різке зростання межевих кутів відклонення донних ліній току та значне збільшення висоти зони утовщеного пограничного шару на профілі. За цим місцем аж до вихідної кромки лопатки на спинку перетікає пограничний шар з поблизулежачої до спинки лінії току по нормалі к осі X. При цьому величина межевих кутів відклонення донних ліній току поступово зменшується й поблизу вихідної кромки стає близькою до нуля.

Виходячи з цього запропоновано метод розрахунку параметрів пограничного шару на спинці лопатки у приторцевій зоні. Цей метод базується на рішенні системи інтегральних рівнянь тримірного профільного пограничного шару, аналогічній отриманій раніше для торцевого пограничного шару:

$$\begin{cases} \frac{\partial \delta_{x_{np}}^{**}}{\partial x} + \delta_{x_{np}}^{**} \cdot (2 + H - M_1^2) \cdot \frac{\partial \ln C}{\partial x} + (1 + \gamma_x' \cdot y) \cdot \frac{\partial l \cdot \varepsilon_{np} \cdot \delta_{x_{np}}^{**}}{\partial y} - \\ - \gamma_x' \cdot M_1^2 \cdot l \cdot \varepsilon_{np} \cdot \delta_{x_{np}}^{**} = (1 + \gamma_x' \cdot y) \cdot \zeta_{x_{np}}, \\ \frac{\partial \varepsilon_{np}}{\partial x} + \varepsilon_{np} \cdot \left((1 + \gamma_x' \cdot y) \cdot \left(\frac{1 + M}{M} \cdot \frac{\zeta_{x_{np}}}{\delta_{x_{np}}^{**}} + l \cdot \varepsilon_{np} \cdot \frac{\partial \ln M}{\partial h} \right) + (\gamma_x' \cdot h \cdot (2 - M_1^2) - H) \times \right. \\ \left. \times \frac{\partial \ln C}{\partial x} + \frac{\partial \ln M}{\partial x} \right) + (1 + \gamma_x' \cdot y) \cdot l \cdot \varepsilon_{np} \cdot \frac{\partial \varepsilon_{np}}{\partial y} - \gamma_x' \cdot \left(\frac{1 + H}{M} - l \cdot \varepsilon_{np}^0 \right) = 0, \end{cases}$$

де $\delta_{x_{np}}^{**}$ - товщина втрати імпульсу пограничного шару на профільній

поверхні лопатки; $\varepsilon_{np} = tg \theta_{np} \Big|_{h_1 \rightarrow 0}$ - тангенс кута відхилення донних

ліній току на профільній поверхні лопатки; γ_x - кут між вектором швидкості зовнішньої течії на профільній поверхні лопатки і нормаллю до утворюючої лінії лопатки. Межове значення кутів відхилення донних ліній току на спинці лопатки в поданому методі розрахунку відшукується шляхом рішення рівнянь кількості руху для елементів утовщеного пограничного шару на спинці лопатки у приторцевій зоні, з урахуванням маси рідини, що перетікає на спинку лопатки з торцевої поверхні міжлопаткового каналу.

Таким чином, описаний вище метод сумісного розрахунку тримірних пограничних шарів на торцевій поверхні і на спинці лопатки в приторцевій зоні дозволяє з досить високою точністю визначити їх інтегральні характеристики.

Розроблено модернізований метод розрахунку коефіцієнта сумарних втрат кінетичної енергії в турбінних решітках, що містить визначення чотирьох складаючих: профільних втрат у центральній частині лопатки, обтікання якої не відчуває впливу вторинних течій; профільних втрат в приторцевій зоні, яка підлягає впливу вторинних перетікань; втрат тертя на торцевій поверхні міжлопаткового каналу; втрат кінетичної енергії у каналному вихорі:

$$\zeta_{\Sigma} = \zeta_{\text{пр1}} + \zeta_{\text{пр2}} + \zeta_{\text{тр}} + \zeta_{\text{вх}}$$

Коефіцієнт профільних втрат може бути поданим сумою:

$$\zeta_{\text{пр}} = \zeta_{\text{пр}}^{\text{тр}} + \zeta_{\text{пр}}^{\text{кр}}$$

де

$$\zeta_{\text{пр}}^{\text{тр}} = \frac{H_{\text{сп}}^* \cdot \delta_{\text{х сп}}^{***} + H_{\text{к}}^* \cdot \delta_{\text{х к}}^{***}}{t \cdot \sin \alpha_{\text{Ізф}} - (H_{\text{сп}}^* \cdot \delta_{\text{х сп}}^{**} + H_{\text{к}}^* \cdot \delta_{\text{х к}}^{**})}$$

$H_{\text{сп}}^* = \frac{\delta_{\text{х сп}}^{***}}{\delta_{\text{х сп}}^{**}}$, $H_{\text{к}}^* = \frac{\delta_{\text{х к}}^{***}}{\delta_{\text{х к}}^{**}}$ - формпараметри пограничного шару на

вихідній кромці з боків спинки і коритця профілю; $\delta_{\text{х сп}}^{***}$, $\delta_{\text{х к}}^{***}$ - товщини втрати енергії на вихідній кромці з боків спинки і коритця профілю; $\delta_{\text{х сп}}^{**}$, $\delta_{\text{х к}}^{**}$ - товщині втрати імпульсу на вихідній кромці з боків спинки і коритця профілю; t - крок решітки; $\alpha_{\text{Ізф}}$ - середнє значення ефективного кута виходу потоку з решітки.

Для розрахунку коефіцієнта кромкових втрат кінетичної енергії на базі експериментальних даних за допомогою методів математичної статистики встановлено взаємозв'язок між інтегральними параметрами пограничного шару на вихідній кромці лопатки, геометричними характеристиками решітки лопаток та кромковими втратами. Детальний аналіз можливого впливу різних факторів на фізичні закономірності формування втрат кінетичної

енергії у кромковому сліді виявив, що головну роль відіграють наступні комплексні параметри:

$$\bar{\delta}^* = (\delta_{\text{сп}}^* + d_{\text{кр}} + \delta_{\text{к}}^*) / a_r; H_{\Sigma} = H_{\text{сп}} + H_{\text{к}} = \delta_{\text{сп}}^* / \delta_{\text{сп}}^{**} + \delta_{\text{к}}^* / \delta_{\text{к}}^{**}; \bar{h} = h/b.$$

де $d_{\text{кр}}$ - діаметр вихідної кромки лопатки; a_r - ширина горлового перерізу міжлопаткового каналу; $\delta_{\text{сп}}^*$ і $\delta_{\text{к}}^*$ - товщини витиснення на вихідній кромці з боків спинки і коритця профілю; $\delta_{\text{сп}}^{**}$ і $\delta_{\text{к}}^{**}$ - товщини втрати імпульсу на вихідній кромці з боків спинки і коритця профілю; h - відстань від вихідного фронту решітки до лінії визначення кромкових втрат (звичайно $h = 0.2 \cdot b$); b - хорда профіля.

Побудована на їх основі залежність враховує вплив характерних особливостей розвитку пограничного шару на профілі турбінної лопатки на процесі формування втрат кінетичної енергії у кромковому сліді, що підвищує достовірність прогнозуємих з її допомогою результатів:

$$\zeta_{\text{спр}}^{\text{кр}} = 0.356 \cdot \bar{\delta}^* + 0.219 \cdot \bar{h} - 0.0066 \cdot H_{\Sigma} - 0.0297.$$

Одержаний вираз узагальнює експериментальні дані з середньою відносною погрішністю 10.7%, коефіцієнт множинної кореляції становить 0.914, а середньоквадратичне відхилення - 0.008. Цю залежність пропонується використовувати при зміні параметрів

$\bar{\delta}^*$, H_{Σ} , \bar{h} в наступних діапазонах: $\bar{\delta}^* = 0.04 \div 0.18$,

$H_{\Sigma} = 2.3 \div 4.2$, $\bar{h} = 0.15 \div 0.25$.

Таким чином, в запропонованому методі розрахунку коефіцієнт профільних втрат кінетичної енергії в центральній частині решітки знаходиться з виразу:

$$\zeta_{\text{спр}} = \zeta_{\text{спр}}^{\text{тр}} + \zeta_{\text{спр}}^{\text{кр}},$$

де $\zeta_{\text{спр}}^{\text{тр}}$ - коефіцієнт втрат тертя на профільній поверхні лопатки для

зони пера лопатки $\ell_1 = \ell - \Delta\ell_{\text{верх}} - \Delta\ell_{\text{низ}}$, не зайнятої утовщеним пограничним шаром (ℓ - довжина лопатки,

$\Delta l_{\text{всрх}}$, $\Delta l_{\text{низ}}$ - висоти приторцевих зон, які займаються утовщенням пограничним шаром, обумовленим вторинними перетіканнями); $\zeta_{\text{пр1}}^{\text{кр}}$ - коефіцієнт кромкових втрат на профільній поверхні лопатки для зони пера лопатки l_1 , не зайнятої утовщенням пограничним шаром.

Коефіцієнт втрат кінетичної енергії в пограничному шарі на профілі у приторцевій зоні, зайнятій утовщенням пограничним шаром, дорівнює:

$$\zeta_{\text{пр2}} = \zeta_{\text{пр2}}^{\text{тр}} + \zeta_{\text{пр2}}^{\text{кр}}$$

де

$\zeta_{\text{пр2}}^{\text{тр}}$ - коефіцієнт втрат тертя в утовщеному пограничному шарі в приторцевій зоні на профілі;

$\zeta_{\text{пр2}}^{\text{кр}}$ - коефіцієнт кромкових втрат в приторцевій зоні.

Коефіцієнт втрат тертя на торцевій поверхні міжлопаткового каналу знаходиться за формулою:

$$\zeta_{\text{тр}} = \frac{H_{\text{т верх}}^* \cdot \delta_{\text{х т верх}}^{**} + H_{\text{т низ}}^* \cdot \delta_{\text{х т низ}}^{**}}{\ell - (H_{\text{т верх}} \cdot \delta_{\text{х т верх}}^{**} + H_{\text{т низ}} \cdot \delta_{\text{х т низ}}^{**})}$$

де

$\delta_{\text{х т верх}}^{**}$, $\delta_{\text{х т низ}}^{**}$ - товщини втрати імпульсу на верхньому та нижньому

торцях міжлопаткового каналу у вихідному перерізі; $H_{\text{т верх}}^*$, $H_{\text{т низ}}^*$

$H_{\text{т верх}}$, $H_{\text{т низ}}$ - формпараметри пограничних шарів на верхньому та нижньому торцях міжлопаткового каналу у вихідному перерізі; ℓ - довжина лопатки.

Осереднений коефіцієнт втрат кінетичної енергії в каналному вихорі $\zeta_{\text{св}}$ винаходиться за методикою, котра отримана, виходячи з наступних припущень:

-локальне значення коефіцієнта втрат кінетичної енергії в довільній точці на виході з решітки дорівнює:

$$\zeta_i = 1 - \varphi_i^2 = \left(\frac{(P_{1T}^* - P_i^*)}{\left(\frac{1}{2} \cdot \rho_1 \cdot C_{1T}^2\right)} \right)_i,$$

де C_{1i} - теоретична швидкість на виході з решітки в i -тій точці; P_{1i}^* і P_{1i}^* - теоретичний і дійсний тиск гальмування на виході з решітки в i -тій точці;

-мінімальний тиск гальмування в центрі каналного вихора на виході з решітки P_1^* дорівнює статичному тиску на вході в решітку $P_{ст0}$, тобто втрата тиску гальмування у центрі каналного вихора на виході з решітки дорівнює $P_{1T}^* - P_1^* = P_{1T}^* - P_{ст0}$ та коефіцієнт втрат

в центрі каналного вихора становить $\zeta_{квц} = (\rho_0 \cdot C_0^2) / (\rho_1 \cdot C_{1T}^2)$;

-величина спада тиску гальмування в каналному вихорі поступово зменшується в напрямку від центра вихора до його периферії від максимального значення $\Delta P_{max}^* = 0.5 \cdot \rho_0 \cdot C_0^2$ до 0, тобто $\zeta_{кв}$ змінюється по радіусу каналного вихора від $\zeta_{квц}$ до 0.

-згідно експериментальним даним, що існують в літературі, розподілення по радіусу коефіцієнта втрат у каналному вихорі

близько до лінійного, тобто $\zeta_{квi} = \zeta_{квmax} \cdot (1 - r/R)$.

Тоді середє значення коефіцієнта втрат по всьому вихідному перерізу каналного вихора дорівнює:

$$\zeta_{квcp} = \frac{1}{F} \cdot \int_0^F \zeta_{квi} \cdot df = \frac{1}{3} \cdot \zeta_{квmax},$$

а осереднений по площині всього вихідного перерізу міжлопаткового каналу коефіцієнт втрат кінетичної енергії в каналному вихорі для турбінної решітки:

$$\zeta_{кв} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\rho_0 \cdot C_0^2}{\rho_1 \cdot C_{1T}^2} \cdot \frac{\pi \cdot R^2}{t \cdot \ell}.$$

Описаний метод розрахунку сумарного коефіцієнта втрат кінетичної енергії в турбінній решітці може використовуватися при умові, що змикання зон кінцевих явищ не відбувається.

Характерними особливостями запропонованих методів розрахунку пограничних шарів в турбінній решітці є:

- використання тримірної системи інтегральних рівнянь торцевого пограничного шару з членами, які мають похідні в напрямку поперек міжлопаткового каналу;

- врахування впливу підковоподібного вихора на закономірності розвитку пограничних шарів на торцевій поверхні та на спинці лопатки;

- застосування для різних ділянок течії відповідних їм законів розподілення швидкості за товщиною пограничного шару;

- визначення у процесі розрахунку локальних значень формпараметрів I, M, L ;

- проведення розрахунків за кількома поздовжніми лініями на торцевій поверхні міжлопаткового каналу;

- виконання розрахунку тримірного пограничного шару на спинці лопатки в зоні впливу вторинних течій разом з розрахунком тримірного пограничного шару на торцевій поверхні міжлопаткового каналу.

Для порівняння результатів розрахунку, одержаних запропонованим методом, із звичайно використовуваними коефіцієнтами кінцевих втрат, наведена спеціальна формула перерахування.

Наведене в дисертації порівняння експериментальних та розрахункових даних (див. таблицю 1) дає можливість зробити висновок про достатню надійність удосконаленого метода визначення інтегральних параметрів торцевого пограничного шару і утовщеного пограничного шару на спинці лопатки, а також розрахунку на їх основі коефіцієнтів профільних та кінцевих втрат кінетичної енергії у решітках турбінних лопаток. Дані, що показані в таблиці 2 свідчать про те, що запропонований метод розрахунку коефіцієнта кінцевих втрат кінетичної енергії істотно уточнює результати розрахунку порівняно з методом Гречаніченко Ю.В.* , що найчастіше використовується зараз.

* Гречаніченко Ю.В., Нестеренко В.А. Вторинні течії у решітках турбомашин. Харків, Вид-во ХДУ, 1983.

Таблиця 1 - Порівняння розрахункових та експериментальних значень коефіцієнтів втрат кінетичної енергії

	$\zeta_k, \%$	$\zeta_{\text{вир}}, \%$	$\zeta_{\Sigma}, \%$
Решітка ГТН-25А (модель)*			
Розрахунок	1.86	6.30	8.16
Експеримент	2.15	6.77	8.92
Відн. погр., %	13.4	6.90	9.60
Решітка С-9012А**			
Розрахунок	1.46	3.22	4.68
Експеримент	1.40	3.15	4.55
Відн. погр., %	4.28	2.22	2.86
Решітка Ленгстона***			
Розрахунок	4.67	5.27	9.89
Експеримент	-	-	10.4
Відн. погр., %	-	-	4.90
Решітка Ходсона****			
Розрахунок	1.36	2.33	3.69
Експеримент	-	-	3.50
Відн. погр., %	-	-	5.40

Четверта глава містить опис метода оптимального проектування профілей турбінних лопаток і розрахункове дослідження аеродинамічних характеристик нового ламінаризованого соплового лопаткового профілю із збільшеним моментом опору.

* - Слітенко А.Ф., Тітов В.В., Жуков Ю.М. Експериментальний стенд для комплексного дослідження аеродинаміки та теплообміну у крупномасштабній решітці соплових турбінних лопаток // Енергетичне машинобудування. -Т. 53. -1995. -№ 1. -С. 59-67.

** - Трубілов М.А., Арсеньєв Г.В., Фролов В.В. і др. Парові та газові турбіни. -М.: Енергоатоміздат, 1985.

*** - Ленгстон, Найс, Хупер. Трьохмірна течія у каналі турбінної решітки // Енергетичне машинобудування. -Сер. А. -1977. -Т. 99. -№1. -С. 22-31.

**** - Ходсон, Доміні. Просторова течія у решітці профілів турбіни низького тиску на розрахунковому режимі // Енергетичні машини та установки. -1988. -т. 110. -№ 2. -С. 116-126.

Таблиця 2 - Порівняння результатів розрахунку коефіцієнтів кінцевих втрат з використанням нової моделі та моделі Гречаниченко Ю.В.

Решітка	Нова модель, %	Стара модель, %	Відн. погр., %
ГТН-25А	1.86	1.44	22.5
С-9012А	1.46	1.12	23.3
Ленгстона	4.62	6.47	40.0
Ходеона	1.36	2.06	51.5

Подано аналіз основних принципів проєктування турбінних решіток з високими аеродинамічними характеристиками. Для рішення проблеми створення високоекономічних профілей турбінних лопаток з відсутністю на спинці і коритці профілю стрибков та зломів кривизни визнано найбільш відповідним метод, в якому профілю описується двома поліномами Безье - Бернштейна, які сполучається між собою в точці зустрічі і на вихідній кромці лопатки при рівності значень функцій, а також її перших та других похідних.

Описано метод визначення оптимальної форми профілю шляхом рішення задачі багатокритеріальної оптимізації у багатовимірному просторі параметрів при наявності функціональних та параметричних обмежень. Критеріями оптимізації прийняті коефіцієнти профільних та кінцевих втрат, що визначаються за допомогою розроблених методів. Оптимізаційна задача вирішувалась при наявності ряду параметричних обмежень, які обумовлені геометричними характеристиками турбінної решітки та технологічними можливостями виготовлення лопатки, і функціональних обмежень, пов'язаних із забезпеченням міцності конструкції.

За допомогою описаної методики спрофільовано новий ламінаризований лопатковий профіль із збільшеним моментом опору, котрий запропоновано використовувати замість існуючих нині аналогів.

Подано результати розрахункового дослідження коефіцієнтів профільних та кінцевих втрат у решітці нових лопаточних профілів. Виконано їх порівняння з відповідними параметрами для решітки лопаточних профілів, що використовуються в турбінах. Показано, що новий ламінаризований лопатковий профіль при однакових міцностних характеристиках має більш високі економічні показники, ніж аналогічні профілі, які використовуються тепер в парових турбінах. (Коефіцієнт сумарних втрат кінетичної енергії в решітці

нових лопаткових профілів в середньому на 1.1% менше, ніж у решітках використовуємих зараз аналогів.)

Таким чином, використання розроблених методів розрахунку тримірного пограничного шару і коефіцієнтів втрат кінетичної енергії в турбінних решітках, а також запропонованого метода створення високоекономічних лопаткових апаратів, підтвердило досить високу їх ефективність.

ВИСНОВКИ

1. Метод розрахунку тримірного пограничного шару на торцевій поверхні міжлопаткового каналу істотно удосконалено:

-у інтегральних рівняннях тримірного пограничного шару на торцевій поверхні міжлопаткового каналу враховуються похідні в поперечному напрямку;

-формпараметри пограничного шару не приймаються постійними, а визначаються в процесі розрахунку;

-враховується вплив підковоподібного вихора на розвиток пограничних шарів на торцевій поверхні та спинці лопатки у приторцевій зоні;

-для знаходження розподілення швидкості уздовж товщини пограничного шару на різних ділянках течії у міжлопатковому каналі використовується запропоновані узагальнені залежності, котрі побудовані шляхом обробки експериментальних даних методами математичної статистики.

2. Розроблено новий метод розрахунку тримірного пограничного шару на спинці профіля в приторцевій зоні, що враховує масу рідини, яка перетікає на спинку лопатки з торцевої поверхні міжлопаткового каналу.

3. З метою підвищення точності розрахунку коефіцієнта профільних втрат кінетичної енергії в решітці турбінних лопаток на основі обробки експериментальних даних одержана емпірична залежність для знаходження коефіцієнта кромкових втрат, яка враховує вплив не тільки відносної товщини вихідної кромки, як у залежностях, що використовуються нині, а й товщини втрати імпульсу пограничних шарів на спинці та коритці лопатки поблизу вихідної кромки, а також структури цих пограничних шарів і відстань від вихідної кромки.

4. Запропонована нова математична модель для визначення коефіцієнта сумарних втрат кінетичної енергії в решітці турбінних лопаток, що враховує профільні втрати в центральній зоні лопатки,

профільні втрати в приторцевих зонах, втрати тертя в пограничному шарі на торці міжлопаткового каналу і втрати у каналному вихорі.

5. На базі IBM PC/AT створено комплекс програм, що дає змогу розрахувати інтегральні параметри пограничних шарів на торцевих поверхнях міжлопаткових каналів і на профілях лопаток, причому, як в центральній, так і в приторцевих зонах лопаток, а на основі цього визначити коефіцієнти профільних та кінцевих втрат кінетичної енергії у решітках турбінних лопаток. Порівняння отриманих розрахункових результатів з експериментальними даними показало достатню надійність розроблених методів і комплексу розрахункових програм.

6. За допомогою цього програмного комплексу створено новий ламінаризований лопатковий профіль із збільшеним моментом опору, котрий при однакових міцностних характеристиках має більш високі економічні показники, ніж аналогічні лопаткові профілі, що використовуються на теперешній час.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ НАУКОВИХ ПРАЦЬ

1. Слітенко А.Ф., Тітов В.Б., Жуков Ю.М. Експериментальне дослідження течії у решітці турбінних лопаток та обробка його результатів за допомогою напівавтоматичного інформаційно - вимірювального комплексу: тези доповіді міжнародної науково - технічної конференції "Комп'ютер: наука, техніка, технологія, здоров'є" / Харків, Мішкольц: ХДПУ, МУ. -1993. -С. 155-157.
2. Слітенко А.Ф., Жуков Ю.М. Розрахунок характеристик пограничного шару на торцевих поверхнях у турбінних решітках: тези доповіді міжнародної науково - технічної конференції "Комп'ютер: наука, техніка, технологія, здоров'є" / Харків, Мішкольц: ХДПУ, МУ. -1993. -С. 160-162.
3. Слітенко А.Ф., Тітов В.Б., Жуков Ю.М. Використання інформаційно - вимірювального комплексу і комп'ютерної техніки при експериментальному дослідженні мікроструктури пограничного шару та кромкових втрат у решітках соплових турбінних лопаток: тези доповіді міжнародної науково - технічної конференції "Комп'ютер: наука, техніка, технологія, здоров'є" / Харків, Мішкольц: ХДПУ, МУ. -1994. -С. 125.
4. Слітенко А.Ф., Тітов В.Б., Жуков Ю.М. Дослідження впливу мікроструктури пограничного шару на кромкові втрати у решітках соплових турбінних лопаток: тези доповіді міжнародної науково - технічної конференції "Удосконалення енергетичних і

- транспортних турбоустановок засобами математичного моделювання, обчислювального та фізичного експериментів" / Зміїв, Україна. -1994. -С. 140.
5. Слітенко А.Ф., Тітов В.Б., Жуков Ю.М. Експериментальний стенд для комплексного дослідження аеродинаміки та теплообміну у великомасштабній решітці соплових турбінних лопаток // Енергетичне машинобудування. -Т. 53. -1995. -№ 1. -С. 59-67.
 6. Слітенко А.Ф., Тітов В.Б., Старусев Г.С., Жуков Ю.М. Щодо дослідження течії на торцевій поверхні міжлопаткового каналу великомасштабної соплової турбінної решітки // Енергетичне машинобудування. -Т. 53. -1995. -№ 1. -С. 195-203.
 7. Слітенко А.Ф., Жуков Ю.М. Метод та програмний комплекс для розрахунку кінцевих втрат у решітках турбінних лопаток: тези докладів міжнародної науково - технічної конференції "Удосконалення енергетичних і транспортних турбоустановок засобами математичного моделювання, обчислювального та фізичного експериментів" / Зміїв, Україна. -1996. -С. 155.
 8. Слітенко А.Ф., Жуков Ю.М. Експериментальне дослідження закономірностей течії у приторцевій зоні великомасштабної решітки турбінних лопаток: праці міжнародної науково - технічної конференції "Комп'ютер: наука, техніка, технологія, здоров'є" / Харків, Мішкольць: ХДПУ, МУ. -1997. -С. 180 - 183.
 9. Слітенко А.Ф., Жуков Ю.М. Рішення рівнянь гідродинамічного пограничного шару на обмежуючих поверхнях приторцевої зони міжлопаткового каналу турбінної решітки: праці міжнародної науково - технічної конференції "Комп'ютер: наука, техніка, технологія, здоров'є" / Харків, Мішкольць: ХДПУ, МУ. -1997. -С. 184 - 187.
 10. Слітенко А.Ф., Жуков Ю.М. Створення комплексу розрахункових програм для проектування високоекономічних турбінних лопаток: праці міжнародної науково - технічної конференції "Комп'ютер: наука, техніка, технологія, здоров'є" / Харків, Мішкольць: ХДПУ, МУ. -1997. -С. 188 - 191.
 11. Slitenko A.F., Titov V.B., Jukov Y.M. Experimental Research of the Local Heat Transier in the Turbine Blade Cascades at High Turbulence of Mainstream: Proceeding of 3-rd International Symposium on Aerothermodynamics of Internal Flows / Beijing, China. -1996. -P. 941 - 946.

433405

АН

Жуков Ю.М. Дослідження закономірностей течії та втрат кінетичної енергії у приторцевих зонах решіток турбінних лопаток. Рукопис. 05.04.12 - турбомашини та турбоустановки. Харківський державний політехнічний університет. Харків. 1997.

Метод розрахунку пограничного шару на торці значно удосконалено. Новий метод розрахунку утовщеного пограничного шару на спинці профілю в приторцевій зоні розроблено. Емпірична залежність для визначення коефіцієнта кромкових втрат отримана. Метод розрахунку коефіцієнта кінцевих втрат кінетичної енергії удосконалено. Метод оцінки втрат кінетичної енергії у каналному вихорі запропоновано. Комплекс розрахункових програм на базі розроблених методів створено і використано для розробки нового ламінаризованого лопаткового профіля із збільшеним моментом опору та високими аеродинамічними характеристиками.

SUMMARY

Jukov Y.M. Research of flow laws and losses of kinetic energy in end wall zones of turbine blade stages. Manuscript. 05.04.12 - turbomachine and turbomachinery. Kharkov State Politechnical University. Kharkov. 1997.

The calculation method of boundary layer at the end wall is much advanced. The new calculation method of thick boundary layer on the blade suction surface in the end wall zone is developed. The empirical equation for determining of edge losses coefficient is received. The calculation method of end losses coefficient of kinetic energy is advanced. The calculation method of kinetic energy losses in turbine blade channel vortex is offered. The program complex on the basis of these calculation methods is created and it is used for construction of the new efficient profile for turbine blades.

КЛЮЧОВІ СЛОВА

Решітка турбінних лопаток, торцевий пограничний шар, підковоподібний вихор, коефіцієнт втрат кінетичної енергії, оптимальне проектування решіток турбінних профілів, ламінаризований лопатковий профіль.

Подп. до друку 15.07.97 г. Формат 60×84/16. Друк офсетний.

Папір тип. Обсяг 1 д.л. Тираж 100 прим. Замовлення № 56-10.

ХДПУ, редакційно-видавничий відділ. Надруковано на обчисл. техніці

ХДПУ, 310002, г.Харків, вул. Фрунз, 21.