

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

СТАРОДУБЦЕВ ЮРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 629.7.064:533.6.011+629.7.067

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТУРБУЛЕНТНОЇ В'ЯЗКОЇ
ТЕЧІЇ У ВХІДНИХ ВІДСІКАХ ТУРБОМАШИН**

Спеціальність 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті (ХНАДУ).

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Солодов Валерій Григорович,
Харківський національний автомобільно-дорожній
університет (ХНАДУ), завідувач кафедри
“Теоретична механіка і гідравліка”

Офіційні опоненти:

- доктор технічних наук, професор,
лауреат Державної премії України
Гнесін Віталій Ісайович,
завідувач відділу аерогідромеханіки,
Інститут проблем машинобудування
ім. А.Н. Підгорного НАН України, м. Харків

- кандидат технічних наук
Лапотко Василь Михайлович,
провідний співробітник відділу турбін
Державного підприємства Запорізьке машинобудівне
конструкторське бюро “Прогрес” ім. акад. О.Г. Івченка,
м. Запоріжжя

Провідна установа: – Національний аерокосмічний університет
ім. М.С. Жуковського «ХАІ», Міністерство освіти і
науки України, м. Харків.

Захист відбудеться 27 січня 2005 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.11 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21, ауд. № 1.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету «ХПІ» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий “ ___ ” _____ 2004 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,

к.т.н., професор

Потетенко О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дані експериментальних досліджень типових вхідних патрубків турбомашин вказують на складний просторовий характер течії у вихідному перетині зі значною нерівномірністю газодинамічних параметрів, особливо кутів атаки вхідних крайок соплового апарату (СА). Внаслідок цього окремі канали ступеня працюють на нерозрахованих режимах, що знижує економічність і надійність турбоагрегату. Тому вхідний відсік турбомашини, що складається з вхідного патрубка і 1-го ступеня, має певні резерви підвищення ККД.

До останнього часу дослідження течій у вхідних відсіках турбомашин у більшості випадків зводилися до ізольованих продувок вхідних патрубків. Відоме лише одне експериментальне дослідження спільної роботи вхідного патрубка і підключеного ступеня, виконане в БІТМі під керівництвом проф. І.Г.Гоголева, у якому приведені основні характеристики вхідного відсіку й особливості роботи підключеного ступеня на моделі одноступінчатої турбіни. На сучасний момент відсутні математичні моделі вхідного відсіку турбомашини, адекватні фізичному експерименту. Тому тема даної дисертації, присвяченої розробці математичної моделі турбулентної в'язкої течії у вхідному відсіку турбомашини, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася безпосередньо автором у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті при кафедрі “Теоретична механіка і гідравліка” з науково-технічної проблеми “Математичні та обчислювальні моделі у машинобудуванні та будівництві”. Тематика роботи відповідає встановленим Законом України пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки до 2006 року, у тому числі “Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі”.

Результати роботи знайшли застосування при виконанні держбюджетної НДДКР №10-53-03 “Теоретичні основи моделювання турбулентних течій газових сумішей з хімічними та фазовими перетвореннями” (№ДР 0103U001439, МОН України), де здобувач брав участь як виконавець; при виконанні госпдоговірних НДР: №37-01-02 “Розрахунки і дослідження газодинаміки елементів вихлопного тракту ГТЕ-25” для НВП “Машпроект” (№ДР 0102V004104), №37-02-02 “Дослідження аеродинамічних характеристик і вдосконалення вхідного патрубка і першої соплової решітки парової турбіни 109-33.5” для НТУ “ХПІ”, №37-01-03 “Розрахункові дослідження газодинаміки елементів вихлопного тракту ГТД Д042 з імітатором регенератора” для ДП НВКГТС “Зоря-Машпроект”, де здобувач брав участь як відповідальний виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є створення математичної моделі вхідного відсіку, розробка економічного підходу до математичного моделювання в'язкої турбулентної течії у відсіках парових і газових турбомашин, складених з турбінного ступеня і вхідних чи вихідних пристроїв, визначення резервів і заходів підвищення економічності вхідного відсіку турбомашини.

Основні задачі дослідження складають:

- створення універсального економічного методу інтегрування рівнянь Нав'є-Стоксу (Н-С) в областях зі складною геометрією для паралельних багатопроцесорних систем щодо опису течій в турбомашинах;
- вибір обчислювальної схеми та вибір і адаптація моделі турбулентності;
- розвинення економічного методу розв'язання аеродинамічних задач в областях складної геометрії, складених з різномасштабних елементів турбомашин; створення математичної моделі вхідного відсіку парової турбіни;
- дослідження аеродинаміки вхідного відсіку потужної турбіни та його складових;
- розробка напрямку пошуку раціональної форми проточної частини вхідного відсіку щодо підвищення його ККД.

Об'єктом дослідження є вхідний відсік турбомашини, складений з вхідного патрубку і першого ступеня.

Предметом дослідження є аеродинамічні характеристики в'язкої турбулентної течії стисливого газу в проточній частині вхідного відсіку.

Методи дослідження – математичне моделювання аеродинамічних процесів у проточній частині вхідного відсіку, засноване на чисельному інтегруванні системи рівнянь Нав'є-Стоксу, осереднених за Рейнольдсом-Фавром для в'язкого турбулентного стисливого газу.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- запропоновано економічний обчислювальний метод інтегрування осереднених рівнянь Нав'є-Стоксу в областях складної геометрії для паралельних багатопроцесорних обчислювальних систем на основі відомих різницевих схем;
- розроблено підхід до розрахунку в'язких турбулентних течій в областях складної геометрії, складених з різномасштабних частин, зокрема для вхідних відсіків;
- виконано чисельні дослідження газодинаміки вхідного відсіку турбомашини та досліджено механізм взаємодії вхідного патрубку і першого ступеня;
- досліджено фізичний механізм виникнення додаткових втрат у проточній частині вхідного відсіку;
- запропоновано метод раціонального проектування підведення робочого тіла до першого ступеня осьової турбіни.

Практичне значення одержаних результатів.

- реалізовано метод розрахунку в'язких турбулентних течій в областях складної геометрії, складених з різномасштабних елементів, що може застосовуватися для чисельного дослідження різноманітних аеродинамічних пристроїв;
- виконано дослідження газодинаміки вхідного відсіку потужної парової турбіни;
- отримано раціональну форму проточної частини вхідного відсіку;
- розроблено програмний комплекс *MTFS* мовою C++ із застосуванням об'єктно-орієнтованої технології для рішення рівнянь Н-С в областях складної геометрії;
- виконано всебічне тестування програмного комплексу і підготовку до його використання на практиці;
- результати досліджень з використанням розробленого програмного комплексу впроваджено на підприємствах України: НТУ «ХП», Харків; НВО ім. Фрунзе, Суми; ДП НВКГТС “Зоря-Машпроект”, Миколаїв. Відомості щодо впровадження результатів дисертації підтверджені документально.

Особистий внесок здобувача складається в наступному:

- вибір математичної обчислювальної схеми; вибір і адаптація моделі турбулентності до обчислювального методу;
- створення економічного методу обчислень в областях складної геометрії для паралельних багатопроцесорних систем;
- розробка економічного підходу до розрахунку в'язких турбулентних течій в областях складної геометрії, складених з різномасштабних частин, зокрема для вхідних відсіків; створення математичної моделі вхідного відсіку;
- створення програмного комплексу для рішення задач аеродинаміки в областях складної геометрії з інтерактивною графічною обробкою й аналізом результатів;
- дослідження газодинаміки й удосконалення вхідного відсіку парової турбіни.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень і розробок, включених у дисертацію, докладалися і обговорювалися на міжнародних конференціях: «Удосконалення турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання» («Біле озеро-2000, 2003», м. Харків, Україна, 2000, 2003); 5-й і 6-й Міжнародний симпозіум з експериментальної і обчислювальної аеродинаміки внутрішніх течій (5th ISAIF, Польща, 2001; 6th ISAIF, Шанхай, Китай, 2003); "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці" (VII МНТК, м. Київ, Україна, 2002, VIII МНТК, Черкаси, Україна, 2003); «Теорія проточної частини компресорних і турбінних ступенів. Експериментальна і чисельна верифікація» (СУМКОМ-2002, м. Лодзь, Польща, 2002); "Турбіни

великої потужності" (м. Гданськ, Польща, 2003); 9-й Міжнародний конгрес двигунобудівників (Харків-Рибаче, Україна, 2004), на науково-технічних конференціях і семінарах ХНАДУ у 2001-2004 роках. У повному обсязі дисертаційна робота була розглянута на науково-технічному семінарі кафедри "Турбінобудування" НТУ "ХП" 29 вересня 2004р.

Публікації. Основні результати дисертації Стародубцева Ю.В. представлені у 18 статтях, з них 14 опубліковані у виданнях, що входять у перелік, затверджений ВАК України, а також в матеріалах 9 науково-технічних конференцій, 4 науково-дослідних звітах.

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Загальний об'єм дисертації складає 158 сторінок, 91 рисунок і 1 таблиці, використані джерела – 109 найменувань на 9 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, доведені мета та основні завдання досліджень, охарактеризовані новизна, теоретична та практична цінність отриманих результатів, доведені дані про апробацію та публікацію основних наукових положень, які вміщує дисертація.

В **першому розділі** представлено критичний огляд теоретичних і експериментальних робіт з проблеми внутрішньої аеродинаміки вхідних відсіків турбомашин, зокрема роботи В.Н.Амелюшкіна, І.Г.Гоголева, В.І.Гнесіна, В.Г.Солодова, закордонних дослідників. Показано, що відсутні тривимірні розрахункові моделі в'язкої турбулентної течії у вхідному відсіку. Розглянуто особливості сумісної роботи вхідного патрубку і підключеного ступеня. Увагу приділено роботам проф. І.Г. Гоголева (БІТМ), в яких досліджено фізичні моделі вхідного, перехідного і вихідного відсіків газової турбіни. Обґрунтовано модель ізольованого вхідного відсіку турбіни. Викладено основні напрями зниження нерівномірності параметрів потоку на вході в перший ступінь і втрат енергії у вхідному відсіку. Показано актуальність розробки метода математичного моделювання вхідного відсіку.

Виконано короткий огляд методів розв'язання осереднених рівнянь Нав'є-Стокса (Н-С) в задачах внутрішньої аеродинаміки турбомашин, описано їх основні позитивні якості і недоліки. З урахуванням властивостей розглянутих методів і обчислювальних ресурсів зроблено вибір на користь неявного алгоритму Біма-Уормінга, побудованої з його застосуванням сучасної різницевої схеми на основі рішення задачі Римана і *ENO*-реконструкції параметрів всередині комірки.

Огляд і методичні дослідження моделей турбулентності в рамках підходу Бусинеска показали перевагу *SST* моделі Ментера над іншими відомими

моделями турбулентності для більшості течій, другою по якості моделювання є модель Спаларта–Аллараса.

Другий розділ присвячений короткому викладенню обраного чисельного методу розв'язання осереднених рівнянь Н-С(1), особливостей реалізації чисельного методу в вигляді програмного комплексу (ПК) і впровадження обраних в огляді моделей турбулентності.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F_{i\text{convective}}}{\partial x_i} + \frac{\partial V_{i\text{viscous}}}{\partial x_i} = H \quad (1)$$

Тут Q - вектор консервативних змінних – густини, імпульсу, енергії; F_i та V_i - вектори конвективних та дифузійних членів, H - вектор джерельного члену, пов'язаний з неінерціальністю системи відліку $\{x_i\}$, $i = 1, 2, 3$.

Коротко описано основні тривимірні різницеві співвідношення алгоритму(2) Біма-Уормінга в дельта-формі з факторизацією по просторовим координатам.

$$\begin{aligned} \Delta^n Q &= \frac{\theta_1 \Delta t}{1 + \theta_2} \frac{\partial}{\partial x_i} (-\Delta^n F_{\text{convective}} + \Delta^n V_{\text{viscous}})_i + \frac{\Delta t}{1 + \theta_2} \frac{\partial}{\partial x_i} (-F_{\text{convective}} + V_{\text{viscous}})_i^n + \\ &\frac{\theta_2}{1 + \theta_2} \Delta^{n-1} Q + O\{(\theta_1 - \theta_2 - 0.5)\Delta t^2 + \Delta t^3\}, \quad i = 1, 2, 3, \quad Q = (\rho, \rho u, \rho v, \rho w, e). \end{aligned} \quad (2)$$

Тут коефіцієнти θ_1 , θ_2 є параметрами формули (2), і визначають сімейства схем і порядок апроксимації цієї формули.

Через низку припущень алгоритм зводиться до вигляду: $LHS(\Delta^n Q) = RHS(Q^n, \Delta^{n-1} Q)$, де верхній індекс n означає момент часу. Права частина $RHS(Q^n, \Delta^{n-1} Q)$ містить значення вектору Q на n -й момент часу, а також його приріст на попередній момент, і тому обчислюється явно.

З урахуванням обмежень області застосування алгоритму стаціонарними задачами матричний оператор лівої частини $LHS(\Delta^n Q)$ факторизується (3), приводиться до тридіагонального вигляду і обертається скалярними прогонками.

$$LHS(\Delta^n Q) \approx \prod_{i=1}^3 \left(I + \frac{\theta_1 \Delta t}{1 + \theta_2} \frac{\partial A_i^n}{\partial x_i} \right) \Delta^n Q, \quad (3)$$

В рамках алгоритму Біма-Уормінга використано різницеву схему М.Я.Іванова (ЦІАМ), в якій розщеплення неявного різницевого оператора проводиться локально шляхом аналізу власних значень матриці Якобі:

$$\partial A_i^n \approx S_i^n (\nabla_i \Lambda_i^+ - \Delta_i \Lambda_i^-)^n S_i^{n-1}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (\text{немає згортки по } i).$$

Тут ∇_i , Δ_i – потокові та протипотокові різниці у напрямі i , віднесені до центру комірки, Δ_i^n – різниця за часом, $\Lambda^\pm = 0.5(|\Lambda| \pm \Lambda)$ – комбінації з діагональних матриць, складених з власних значень якобіанів A , S_i – матриці перетворень.

Конвективні члени різницевої схеми розраховуються через вектори потоків на межах комірок, обчислених з рішення задачі Римана про розпад довільного розриву, для чого використовувались варіанти рішень по Годунову і Рое. Використання різницевої схеми проведено в узагальненій криволінійній системі координат. Екстраполяція параметрів(4) на грані комірок виконується із застосуванням похідних, обчислених, на відміну від *TVD* -алгоритму схеми Іванова, по варіанту(5) *ENO* -алгоритму (Yang, Lombard). Дана модифікація схеми Іванова належить С.В.Єршову(ІПМаш НАНУ) (схема Єршова), і забезпечує 2-й порядок точності по простору повсюди.

$$\phi(\psi_i, t^n) = \phi_m^n + \left(\frac{\partial \phi}{\partial \psi_i} \right)_m^n (\psi_i - \psi_{im}) + 0.5 \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial \psi_i^2} \right)_m^n (\psi_i - \psi_{im})^2 \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial \psi} \right)_m = \frac{1}{\Delta \psi} \min \text{mod} \left[\begin{array}{l} \Delta_m \phi - \alpha \min \text{mod} (\Delta_m \phi - \Delta_{m-1} \phi, \Delta_{m+1} \phi - \Delta_m \phi), \\ \Delta_{m+1} \phi + \beta \min \text{mod} (\Delta_{m+1} \phi - \Delta_m \phi, \Delta_{m+2} \phi - \Delta_{m+1} \phi) \end{array} \right] \quad (5)$$

В підрозділі 2.2 описуються особливості розробки обчислювального алгоритму і його реалізації у вигляді програмного комплексу(ПК). Програмний комплекс *MTFS* розподілено на модулі підготовки даних (препроцесор), розрахунку (солвер) і обробки даних (постпроцесор). Уніфікований формат файлів обміну даними між модулями дозволяє використовувати декілька спеціалізованих солверів і обчислювальних алгоритмів без змін в інших модулях, обмінюватись даними з іншими ПК.

Для побудови тривимірних сіток, що враховують особливості геометрії області і течії, розроблено алгебраїчний метод опису поверхонь і створення сіткових областей. В підрозділі 2.2.1 подано його опис для випадку довільної однодомної області, що однозначно відображується на обчислювальний паралелепіпед. Для розрахункових областей із складною геометрією меж використовується блочно-структурований метод (БСМ) побудови сіток, розроблено його модифікацію «обтягуючих сіток» (ОС). Суть ОС-метода є в попередньому розбитті розрахункової області на домени, що є топологічно еквівалентними паралелепіпеду. З множини доменів виділяється група, що утворює суцільну «плівку», яка щільно обтягує тверді межі та грані розрахункової області. Домени цієї групи мають один спільний сітковий напрямок, нормальний до поверхні твердих стінок, вздовж якого виконується сіткове сгущення. Внутрішня частина розрахункової підобласті заповнюється довільно орієнтованими доменами, які мають рівномірну сіткову розбивку,

погоджену на спільних гранях. ОС-метод допускає комбінування в рамках однієї розрахункової області структурованих сіток різних типів (в основному Н- і О-типів), що дозволяє уникати проникнення сіткових сгущень у внутрішню частину розрахункової області і раціонально використовувати обчислювальні ресурси.

В основі організації обчислень на сітковому розбитті довільної структури використана ідея розщеплення алгоритму вздовж трьох незалежних сіткових напрямів домену (або ланцюга доменів доменно-структурованої сітки) (А.В. Русанов та ін.), яка є висхідною до робіт Н.Н. Яненко. Автору дисертації належить принципове алгоритмічне удосконалення, в якому обчислювальна область розбивається на *одновимірні нитки комірок* ϑ_i ($\dim(\vartheta_i)=1$) на множині комірок довільної структури, які щільно заповнюють розрахункову область і контактують вузлами. Декомпозиція довільної розрахункової області на нитки комірок здійснюється до розрахунку (в коді *MTFS* - препроцесором), що дозволяє уніфікувати обчислювальний алгоритм і підвищити продуктивність солвера. Таке удосконалення робить обчислювальний алгоритм незалежним від геометричної і сіткової топології розрахункової області і допускає високоефективне розщеплення обчислювального процесу для платформ з довільною кількістю процесорів. Паралелізація полягає в створенні набору робочих підпроцесів, кожен з яких оброблює виділену підмножину ниток $\cup \vartheta_i$. Дана стратегія здатна ефективно використовувати довільне число процесорів і може бути реалізована на будь якій обчислювальній платформі.

В підрозділі 2.3 викладено особливості впровадження в обчислювальний алгоритм двох основних диференціальних моделей турбулентної в'язкості: Спаларта-Аллмараса (S-A) і Ментера (SST). Обговорюються питання стійкості і постановки межових умов для рівнянь моделей.

Підрозділ 2.4 присвячений тестуванню розробленого обчислювального алгоритму і порівнянню чисельних результатів з відомими експериментальними даними. В підрозділі 2.4.1 аналізуються методи осереднення потоків, представлені в літературі, і описано спосіб одержання інтегральних характеристик потоку в перетинах з протитоком.

В підрозділі 2.4.2 наведено порівняльний аналіз розрахунків тестових задач з різною складністю геометричних меж: обтікання пластини, осесиметричне здуття, течія в плоскому поворотному каналі і в вихлопному патрубку ГТД. Виконано аналіз чутливості обчислювального алгоритму і моделей турбулентності до сіткових параметрів і якості моделювання модельних течій. Останній приклад (рис.1) відображує якість моделювання складних просторових течій в промислових пристроях. У всіх розглянутих прикладах чисельні результати задовільно збігаються з експериментом. Показано, що найкращі результати в зіставленні показує модель SST, але модель S-A, незначно поступаючись в якості SST, істотно виграє в економічності і стійкості розрахунку.

Рис. 1 Розрахункова сітка вихлопу ГТД і порівняння втрат повного тиску, отриманих чисельно та експериментально

У розділі 3 викладено підхід до моделювання в'язкої турбулентної течії у відсіку турбомашини. Задача про в'язку течію у відсіку формулюється як стаціонарна, на вході в підводячі труби патрубку ставляться параметри гальмування: повний тиск і повна температура при рівномірному осьовому натіканні; на виході зі ступеню на віддаленні задається рівномірний сталий статичний тиск. Обговорюються характеристики вхідного відсіку ЦНТ парової турбіни, обраного для дослідження (рис.2). Сіткові моделі підобластей відсіку створені з застосуванням ОС-методу, описаного в підрозділах 2.2.1 і 2.2.2. Розглянуто різні варіанти підходів до моделювання в'язкої турбулентної течії у вхідному відсіку. У розвиток моделі, запропонованої в 90 роках В.І. Гнесіним і В.Г.Солодовим для нев'язкої течії у вихлопному і відбірному відсіках, розроблено і реалізовано економічний «секторний» підхід для в'язкої турбулентної течії у вхідному відсіку (рис.3), заснований на припущенні про малість окружних градієнтів параметрів на вході в 1-й ступінь, при якому окружні розподіли в зазорі замінюються кусочно-постійними функціями. Кожен сектор відповідає певному набору каналів СА і РК, у яких реалізуються однакові умови обтікання, що дозволяє замінити їх в обчислювальному алгоритмі одним каналом СА і РК.

Процедура обміну газодинамічними параметрами між патрубком і СА в рамках одного сектора аналогічна процедурі обміну в міжвінцевому зазорі ступеня з розбивкою кільця інтерфейсу на задану кількість секторів. Викладений підхід є загальним, може бути застосований як до відсіків парових турбін, так і для газотурбінних установок, у тому числі осерадіального типу, і може бути адаптований до спеціальних випадків. Кутовий розмір секторів є керованим і вибирається в процесі розрахунку з умови забезпечення мінімальних відхилень осереднених значень від неперервних окружних розподілів параметрів на інтерфейсі:

$$F(\varphi_1, \dots, \varphi_i, \dots, \varphi_{n-1}) = \sum_{i=1}^n \int_{\varphi_{i-1}}^{\varphi_i} \delta_i(\varphi)^2 d\varphi,$$

де n – кількість секторів інтерфейсу, $\delta_i(\varphi) = \alpha_{icp} - \alpha(\varphi)$ – різниця між осередненим і поточним значенням параметра в i -ом секторі, φ – окружна кутова координата інтерфейсу, φ_i – окружна координата границі між i і $i+1$ секторами інтерфейсу.

Рис. 2 Схема розрахункової області вхідного відсіку ЦНТ

Рис. 3 Чисельні підходи до моделювання вхідного відсіку

У розділі 4 представлені результати чисельних досліджень вхідного відсіку (рис.2) в цілому і його складових частин. У підрозділі 4.1 наведено результати ізольованих продувок вхідного патрубку й отримано задовільний збіг результатів з експериментом ЦКТІ. Дослідження ізольованого 1-ого ступеня з осьовим і радіальним підведенням робочого тіла (підрозділ 4.2) дозволили виробити методикау оцінки аеродинамічної досконалості проточної частини і виявити основні джерела втрат і їх залежність від умов на вході СА. У розглянутій моделі 1-ого ступеня з радіальним підведенням РТ виявлена істотна радіальна нерівномірність параметрів потоку в міжвінцевому зазорі і її залежність від умов натікання на вхідні крайки СА. Основну частину додаткових втрат привносять периферійні підковообразний і каналовий вихори, які взаємодіють між собою. Течія у РК і параметри на виході з нього

виявляють порівняно слабку залежність від умов на вході в СА в дослідженому діапазоні режимів, що погоджується з результатами досліджень інших авторів.

Тестування секторного підходу проведено порівнянням чисельних результатів моделювання вхідного відсіку газової турбіни (ГТ) наддування суднового дизеля з експериментальними даними проф. І.Г.Гоголева (підрозділ 4.3) (рис. 4–6). Дослідження виконувались на режимах, близьких до номінального з застосуванням різної кількості секторів інтерфейсу “патрубок-ступінь” (від 10 до 20). Точність моделювання кутів атаки СА на середньому радіусі мало залежить від кількості секторів, однак окружний розподіл втрат кінетичної енергії (КЕ) у СА помітно уточнюється при використанні 20 секторів (рис. 5).

Рис. 4 Модель вхідного відсіку газової турбіни

Рис. 5 Структура течії у вхідному патрубку, поле повного тиску у вихідному перетині та окружні розподіли кутів атаки і втрат КЕ в СА газової турбіни

Розбіг чисельних значень втрат з експериментом спостерігається в деяких секторах через можливу похибку опису моделі патрубка і неадекватне моделювання завихрення на вході в СА. Проведений детальний аналіз показав, що моделювання в'язкої турбулентної течії у вхідному відсіку з застосуванням розробленого секторного підходу кількісно відбиває основні фізичні процеси і рівень втрат енергії в проточній частині.

Рис. 6 Окружні розподіли повного тиску на виході з патрубку газової турбіни на втулці та периферії

Рис. 7 Окружні залежності кутів атаки та втрат КЕ в СА ЦНТ парової турбіни

Рис. 8 Радіальні розподіли втрат КЕ для деяких секторів СА ЦНТ парової турбіни

Рис. 9 Поверхні постійного повного тиску на виході з СА для різних вхідних умов: а) осьовий підвід; сектори: б) $\varphi = 270^\circ - 288^\circ$; в) $\varphi = 180^\circ - 198^\circ$; г) $\varphi = 72^\circ - 90^\circ$

У підрозділі 4.4 представлено результати чисельного дослідження вхідного відсіку ЦНТ потужної парової турбіни, описаного в розділі 3. Отримано просторові поля параметрів в'язкої течії та основні характеристики ступеня і патрубку в складі вхідного відсіку (рис. 7–9). Досліджено зворотній вплив підключеного ступеня на структуру течії і внутрішні втрати в патрубку. Виконано порівняння результатів розрахунків відсіку в цілому і його ізольованих складових частин. Виявлено зниження ККД ступеня в складі відсіку приблизно на 2% у порівнянні з осьовим підведенням РТ.

У розділі 5 представлено напрямок пошуку і приклад раціонального проектування вхідного відсіку ЦНТ парової турбіни з метою підвищення ККД із застосуванням секторного підходу виконано чисельне дослідження впливу геометрії вхідної ділянки СА на роботу вхідного відсіку парової турбіни і ККД 1-го ступеня. Основні варіанти геометрії наведено на рис.10. Серед них проведено пошук раціональної форми проточної частини вхідного відсіку. Найкращий результат показав варіант вхідної ділянки СА ST03. В результаті модернізації відсіку отримано зниження втрат енергії в СА в середньому на 1.9% (рис. 11–13), що відповідає виграшу у ККД відсіку $\Delta\eta = 1.41\%$.

Рис. 10 Схема модифікації і розрахункові сітки СА ЦНТ парової турбіни

Рис. 11 Окружні розподіли втрат KE на різних ділянках СА для вихідного і модифікованого відсіку ЦНТ

Рис. 12 Радіальні залежності втрат KE у варіантах СА для різних кутів течії в перетині інтерфейсу (А-А)

Рис. 13 Поверхні постійного повного тиску на виході з СА для вихідного і модифікованого відсіку ЦНТ за різних умов в перетині А-А

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота пов'язана з рішенням науково-практичної задачі створення обчислювальної моделі відсіку турбомашини, дослідження аеродинаміки відсіку і зазначення способу раціонального проектування підведень робочого тіла до першого ступеня осьової турбіни з метою аеродинамічного удосконалення вхідного відсіку турбомашини.

Найбільш важливі наукові і практичні результати роботи:

1. На підставі огляду показано актуальність задачі удосконалення вхідного відсіку чисельними методами на основі осереднених тривимірних рівнянь Нав'є-Стокса.

2. Огляд чисельних методів для рівнянь Нав'є-Стокса показує доцільність застосування алгоритму Біма-Уормінга, різницевої схеми М.Я.Іванова, модифікації С.В.Єршова на основі ЕНО-реконструкції газодинамічних параметрів в комітках.

3. Огляд моделей турбулентності в рамках підходу Бусінеска вказує на перевагу SST моделі Ментера перед відомими моделями турбулентності для більшості течій, другою по якості моделювання є модель Спаларта – Алмараса.

4. Вперше запропонована економічна «ниткова» організація методу на неструктурованих гексаедральних сітках у довільних областях, що дозволяє з високою ефективністю розпаралелити обчислювальний метод.

5. На тестових прикладах показана ефективність розробленого програмного комплексу в широкому діапазоні режимів для областей із складною геометрією меж і розвинутими відривами.

6. Розроблено секторний підхід до моделювання в'язкої течії у вхідному відсіку турбіни, показано спільність підходу до рішення задач про течію в'язкого газу через пристрої із складною різномасштабною геометрією.

7. На основі секторного підходу створено чисельну модель вхідного відсіку, обґрунтовано розміщення поверхонь інтерфейсу між секціями відсіку, процедуру обміну даними між патрубком і ступенем, запропоновано метод автоматичної адаптації куткових розмірів секторів до аеродинамічних умов в області інтерфейсу.

8. Вперше чисельно розв'язано задачу про тривимірну турбулентну течію через вхідний відсік парової турбіни, складений з вхідного патрубка і підключеного ступеня; виявлено високий рівень втрат кінетичної енергії на вхідній поворотній ділянці перед СА, а також його істотний вплив на втрати безпосередньо в каналі СА.

9. При тестуванні секторного підходу одержано задовільну відповідність чисельних результатів експериментальним даним І.Г.Гоголева (БІТМ) для вхідного відсіку одноступеневої газової турбіни.

10. Досліджено вплив геометрії вхідної ділянки соплового апарату на роботу 1-ого ступеня парової турбіни; проаналізовано залежність ККД

ступеня від кутів натікання течії при різних конфігураціях вхідної ділянки; вивчено механізм дії форми меридіонального обводу вхідної радіально-осьової ділянки СА на втрати в проточній частині ступеня.

11. Вказано і апробовано напрям пошуку оптимальної форми меридіонального обводу входу в 1-ий ступінь; шляхом пошуку раціональної форми одержано варіант відсіку із зниженням рівня втрат в середньому на 1.9%, і підвищенням ККД на $\Delta\eta = 1.41\%$.

12. Основні наукові положення і результати дисертаційної роботи мають теоретичне і практичне значення при розробці і модернізації турбомашин і впроваджені на кафедрі «Турбінобудування» НТУ «ХП» при виконанні субпідрядних робіт по модернізації турбіни 109-33.5 фірми «General Electric», в ВАТ «Сумське НВО ім. Фрунзе» в розрахунках проточної частини турбодетандера, в держпідприємстві «НВК ГТ «Зоря-Машпроект» в розрахунках проточної частини вихлопів ГТД, ГПА, ГТЕ.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Солодов В.Г., Стародубцев Ю.В. Бухолдин Ю.С., Левашов В.А. Аэродинамическое совершенствование проточной части входного и выходного устройств осерадиального компрессора// Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования. Сборник научных трудов. – Харьков: ИПМаш НАН Украины. – 2000. – С. 271–276.

Здобувачем розроблено чисельні моделі вхідного і вихідного патрубків ГПА, виконано розрахунки течій у цих пристроях і проаналізовані отримані результати.

2. Солодов В.Г., Стародубцев Ю.В. Солвер для решения трехмерных нестационарных задач внутренней газодинамики// Вестник Харьковского государственного автомобильно-дорожного технического университета. Сборник научных трудов. – Харьков: ХГАДТУ – 2000. – Вып. 12–13. – С. 103–105.

Здобувачем виконано програмна реалізація розрахункового алгоритму на мові C++ з використанням об'єктно-орієнтованого підходу, розроблено моделі тестових прикладів і виконано їх розрахунок.

3. Солодов В.Г., Стародубцев Ю.В. Математическое моделирование сжимаемых вязких турбулентных течений в каналах сложной формы // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ – 2001. – Ч.2, №129 – С. 282–290.

Здобувачем виконано розрахунки представлених моделей газодинамічних елементів турбомашин, отримано залежності інтегральних параметрів течій від режимних умов.

4. Солодов В.Г., Стародубцев Ю.В., Исаков Б.В., Петельчиц В.В., Федан В.Т., Исследование газодинамики выхлопного газоотвода ГТУ // *Авиационно-космическая техника и технология. Сборник научных трудов.* – Харьков: «ХАИ» – 2002. – Вып.27 – С. 26–34.

Здобувачем розроблено чисельну модель коліноподібного вихлопу газової турбіни, докладно проаналізовано просторову структуру течії, виконано зіставлення з експериментом.

5. Солодов В.Г., Стародубцев Ю.В. Опыт моделирования сжимаемых вязких турбулентных течений во входных и выходных устройствах турбин // *Проблемы машиностроения* – Харьков: ИПМаш НАН Украины – 2002 –Т.5, №1 – С. 29–38.

Здобувачем виконано побудову і розрахунки представлених моделей газодинамічних елементів турбомашин зі складною геометрією, проаналізовано просторову структуру течій.

6. Стародубцев Ю.В. Аэродинамическое совершенствование паровпуска цилиндра низкого давления паровой турбины на основе трехмерного моделирования // *Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт».* – Киев: НТУУ «КПИ» – 2002 – Т.2, №42. – С. 99–102.

7. Солодов В.Г., Стародубцев Ю.В., Хандримайлов А.А., Исаков Б.В., Федан В.Т. Трехмерное моделирование вязкого турбулентного течения в выхлопном диффузоре ГТД с кольцевым теплообменником// *Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования. Сборник научных трудов.* – Харьков: ИПМаш НАН Украины – 2003. – С. 225–229.

Здобувачем розроблено математичну модель вихідного диффузору ГТД з 9 стійками, кільцевим теплообмінником і збірною камерою, виконано розрахунки течій і зіставлення з експериментом.

8. Стародубцев Ю.В. Численное моделирование вязкого турбулентного течения во входном отсеке ЦНД турбомашин. II. Исследование варианта паровпуска ЦНД мощной паровой турбины// *Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования. Сборник научных трудов.* – Харьков: ИПМаш НАН Украины – 2003. – С. 236–239.

9. Солодов В.Г., Стародубцев Ю.В. Численная модель вязкого турбулентного течения в отсеке осевой турбины «Входной патрубков – Первая ступень» // *Вестник Сумского государственного университета. Научный журнал.* – Сумы: СумДУ – 2003. – №12(58). – С. 128-134.

Здобувачем розроблено математичну модель вхідного відсіку ЦНТ парової турбіни, отримано окружну нерівномірність параметрів на вході і втрат енергії в каналах першого ступеня.

10. Солодов В.Г., Стародубцев Ю.В. Опыт моделирования сжимаемых вязких турбулентных течений в элементах промышленного и энергетического оборудования // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2004. – №25. – С. 77–94.

Здобувачем виконано побудову і розрахунки представлених моделей газодинамічних елементів турбомашин зі складною геометрією, проаналізовано просторову структуру течій.

11. Гоголев И.Г., Солодов В.Г., Стародубцев Ю.В. Экспериментальное и численное исследование вязкого турбулентного течения во входном отсеке газовой турбины // Вестник двигателестроения. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич» – 2004. – №2 – С.47-50.

Здобувачем розроблено математичну модель вхідного відсіку газової турбіни, виконано розрахунки і проведено зіставлення з експериментом.

12. Солодов В.Г., Стародубцев Ю.В. Опыт моделирования сжимаемых вязких турбулентных течений во входных и выходных устройствах турбомашин // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». – Киев: НТУУ «КПИ» – 2002. – Т.2, №42. – С. 147–155.

Здобувачем виконано побудову і розрахунки представлених моделей газодинамічних елементів турбомашин зі складною геометрією, розраховано інтегральні характеристик досліджених пристроїв.

13. Солодов В.Г., Стародубцев Ю.В. Исаков Б.В., Федан В.Т. Экспериментальное и численное исследование аэродинамики выхлопного газоотвода ГТУ // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». – Киев: НТУУ «КПИ» – 2002 – Т.1, №42. – С. 22–26.

Здобувачем розроблено чисельну модель коліноподібного вихлопу ГТУ, проаналізовано просторову структуру течії, виконано зіставлення з експериментом по інтегральним втратам енергії і локальним розподілам параметрів.

14. Солодов В.Г., Стародубцев Ю.В. Численное моделирование вязкого турбулентного течения во входном отсеке ЦНД турбомашин. I. Постановка задачи и секторный подход к моделированию // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования. Сборник научных трудов. – Харьков: ИПМаш НАН Украины – 2003. – С. 230–235.

Здобувачем розроблено математичну модель вхідного відсіку ЦНТ парової турбіни, що складається з вхідного патрубку і підключеного ступеня, проведено аналіз просторової течії в елементах відсіку.

15.Rusanov A.V., Solodov V.G., Starodubtsev Yu.V., Yershov S.V. The Uniform Numerical Technique for Multiblock CFD Solver// – Proceedings of 5th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows. – Gdansk: Institute of Fluid-Flow Machinery of Polish Academy of Sciences – 2001. – P.139–147.

Здобувачем впроваджено в розроблений програмний комплекс запропонований підхід і виконано розрахунки тестових задач, що демонструють його працездатність.

16.Solodov V.G., Starodubtsev Yu.V., Isakov B.V., Fedan V.T. Experimental and numerical study of gas dynamics of exhaust pipe of gas turbine unit // Proceedings of SYMKOM-2002, Turbomachinery. – 2002. – P. 122–132.

Здобувачем розроблено чисельну модель вихлопу ГТУ з 13 стійками різної геометрії, проаналізовано просторову структуру течії, виконано зіставлення з експериментом.

17.Solodov V.G., Starodubtsev Yu. V. Numerical model of viscous turbulent flow in “inlet pipe – 1st stage” compartment of power steam turbine // Transactions of the institute of fluid-flow machinery – Poland, Gdansk – 2003. – №114 – P. 191–200.

Здобувачем розроблено математичну модель вхідного відсіку ЦНТ парової турбіни, отримано окружну нерівномірність параметрів на вході і втрат енергії в каналах першого ступеня.

18.Solodov V.G., Starodubtsev Yu.V., Isakov B.V., Fedan V.T. Experimental and Numerical Study of Gas Dynamics of Exhaust Pipe of Gas Turbine Unit // Journal of Thermal Sciences. – 2004. – №1. – P. 31–37.

Здобувачем розроблено математичну модель вихідного дифузору ГТД з 9 стійками, кільцевим теплообмінником і збірною камерою, виконано розрахунки течій і зіставлення з експериментом.

АНОТАЦІЯ

Стародубцев Ю.В. Математичне моделювання турбулентної в'язкої течії у вхідних відсіках турбомашин – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2004.

Дисертаційна робота присвячена розробці метода розрахунку в'язких турбулентних течій через вхідні відсіки турбомашин для оцінки і підвищення

ефективності роботи вхідних відсіків. Уперше створено програмний комплекс для розв'язання осереднених рівнянь Нав'є-Стокса з застосуванням “ниткового” розщеплення розрахункового методу, який дозволяє ефективно розпаралелити обчислення у довільних сіткових областях на багатопроцесорних обчислювальних системах. Для розрахунків застосовано сучасну неявну різницеву схему 2-го порядку з факторизацією у просторі. Для моделювання турбулентних ефектів застосовано диференціальні моделі турбулентності Ментера і Спаларта-Аллмараса. Виконано тестування розробленого методу на модельних і промислових задачах. Розвинуто секторний підхід до моделювання в'язкої турбулентної течії у вхідному відсіку турбіни. Чисельно вирішено задачу про тривимірну турбулентну течію через вхідний відсік потужної турбіни, складений з патрубків і каналів підключеного ступеня. Одержано задовільний збіг чисельних результатів з експериментальними даними проф. І.Г.Гоголева для вхідного відсіку одноступеневої газової турбіни. Вказано і апробовано напрям пошуку оптимальної форми меридіонального обводу входу в 1-ий ступень. На прикладі потужної парової турбіни одержано підвищення ККД вхідного відсіку.

Ключові слова: турбіна, вхідний відсік, в'язка турбулентна течія, модель турбулентності, тривимірна чисельна модель, взаємодія патрубка і ступеня, меридіональне профілювання підводу, підвищення ККД відсіку

ABSTRACT

Starodubtsev Yu.V. Mathematical modeling of turbulent viscous flow in inlet compartment of turbines. – The manuscript.

Thesis for submitting of the scientific degree of Candidate of Technical Science in specialty 05.05.16 – turbines and turbounits. – National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkov, Ukraine, 2004.

The dissertation is devoted to development of method for simulation of viscous turbulent flow through turbine inlet compartments in order to evaluate and to rise the efficiency this compartments. The software is developed to solve the RANS applying the multithread splitting approach, which permits efficiently provide the parallel calculations in arbitrarily meshed regions for multiprocessing parallel systems. Software uses 2-nd order implicit difference scheme with factorization in space. Turbulent effects are described by differential turbulence models of Menter and Spalart-Allmaras. The software was tested for model and industrial problems. The sector approach to modeling the viscous turbulent flow in inlet compartment of turbine is developed and realized. The problem is solved of viscous turbulent flow in inlet compartment of power turbine to be composed of Inlet pipe and the channels of first stage. Good correspondence between predicted and experimental data of Prof. I.G. Gogolev is obtained for inlet compartment of

one stage gas turbine. The direction of search of optimal form of meridional profile supply into first stage is shown and approved. The rise of efficiency was obtained for example of power steam turbine inlet compartment.

Keywords: turbine, inlet compartment, viscous turbulent flow, turbulence model, three dimensional numerical model, inlet-stage interaction, supply meridional profiling, inlet compartment efficiency increase

АННОТАЦИЯ

Стародубцев Ю.В. Математическое моделирование турбулентного вязкого течения во входных отсеках турбомашин – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.05.16 – турбомшины и турбоустановки. - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2004.

Диссертация посвящена разработке метода расчета вязких турбулентных течений через входные отсеки турбомашин для оценки и повышения эффективности работы входных отсеков, определения неравномерности параметров потока на входе в 1-ую ступень и их влияния на работу ступени; поиску возможных путей повышения КПД входных отсеков. В результате анализа литературных источников установлено, что в настоящее время отсутствует экономичный численный метод расчета вязкого турбулентного течения газа во входных отсеках турбомашин.

Разработан программный комплекс (ПК) для решения осредненных уравнений Н-С с применением эффективного ниточного расщепления расчетного метода, позволяющего распараллеливать вычисления в произвольных сеточных областях на многопроцессорных вычислительных системах. Для расчетов по диссертационной работе применялся неявный алгоритм с факторизацией по пространственным переменным Бима-Уорминга, разностная схема М.Я. Иванова и др. (ЦИАМ, 1989) на основе решения задачи Римана. В схеме М.Я. Иванова *TVD*-реконструкция характеристических переменных внутри ячейки заменена *ENO*-реконструкцией (Yang, Lombard), которая выполнена и исследована С.В. Ершовым (ИПМаш НАНУ) (схема Ершова) и обеспечивает 2-й порядок точности по пространству.

Для расчетов тестированы и использованы дифференциальные модели турбулентности в рамках подхода Буссинеска: *SST* модель Ментера и модель Спаларта–Аллмараса.

Разработан и применен секторный подход к расчету вязкого турбулентного течения во входном патрубке и подключенной ступени с учетом окружной неравномерности параметров от патрубка на входе в ступень. Секторный подход восходит к работам В.И. Гнесина и В.Г. Солодова в невязкой постановке для переходных и выходных отсеков и основывается

на предположении о малости окружного градиента параметров на входе в первую ступень. Это позволяет разбить интерфейс между патрубком и ступенью на секторы, в которых окружные распределения параметров заменяются кусочно-постоянными функциями. Такой подход позволяет существенно уменьшить требования к объему вычислительных ресурсов без потери точности получаемых результатов.

Выполненное всестороннее тестирование разработанного метода и ПК на моделях различной сложности указывает на работоспособность ПК, разработанного метода и достоверность получаемых численных результатов. Тестирование секторного подхода выполнено на модели входного отсека газовой турбины наддува судового дизеля; сопоставление численных результатов с экспериментальными данными проф. И.Г. Гоголева (БИТМ, Россия) указывает на адекватность предсказаний с применением секторного подхода структуры течения и потерь энергии в проточной части входного отсека.

На основе секторного подхода создана математическая модель входного отсека ЦНД паровой турбины, составленного из входного двухтрубного, двухпоточного патрубка и 1-й ступени. Выполнены расчеты вязкого турбулентного течения во всех элементах входного отсека. Проведено сопоставление с экспериментальными и теоретическими данными других авторов. Расчет входного отсека ЦНД показал заметную окружную неравномерность параметров в проточной части 1-ой ступени, высокий уровень потерь кинетической энергии (КЭ) в каналах СА и их зависимость от распределения параметров на входе в СА.

Представлено направление и пример рационального проектирования входного отсека ЦНД паровой турбины с целью повышения КПД 1-й ступени. Выполнено численное исследование влияния геометрии входного участка СА на работу входного отсека паровой турбины. Проанализирована зависимость КПД 1-й ступени от углов натекания потока при различных конфигурациях входного участка. Применен секторный подход для поиска рациональной формы проточной части входного отсека. В результате меридионального перепрофилирования входного участка СА 1-ой ступени получен выигрыш по КПД отсека $\Delta\eta = 1.41\%$.

Ключевые слова: турбомашина, входной отсек, вязкое турбулентное течение, модель турбулентности, трехмерная численная модель, взаимодействие патрубка и ступени, меридиональное профилирование подвода, повышение КПД отсека.