

На правах рукопису

Солодов Валерій Григорович

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ
АЕРОДИНАМІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ТУРБІННОГО СТУПЕНЯ
З ВІДВОДЯЩИМИ ТА ВІДВОДЯЩИМИ ПРИБОРОМІА ПІЛОТІВНОЇ
ЧАСТИНИ

05.04.12. – турбомашини та турбоустановки

Анотераферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

ДВ 33.173

Дисертація в рукописі

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00761260 (M)

Робота виконана на кафедрі теоретичної механіки Харківського державного автомобільного інституту

Науковий консультант: лауреат Державної премії України, доктор технічних наук, професор Гнесін Євген Ісаєвич

Офіційні опоненти: лауреат Державної премії України, доктор технічних наук, професор Гаркуша Анатолій Вікторович; доктор технічних наук, професор Маскін Олександр Степанович; доктор технічних наук, професор Палагін Анатолій Андрійович

Прозідна організація: Науково-виробниче об'єднання "ТУРБОАТОМ", м. Харків

Захист відбудеться "26" травня "1985 р. о 14" год. на засіданні спеціалізованої ради ДСБ.09.12 у Харківському державному політехнічному університеті (310002, Харків-2, вул. Фрунзе, 21)

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського державного політехнічного університету.

Автореферат розісланий "25" вересня "1985 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

Потетенко О. В.

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Створення потужних конкурентоздатних турбін та ростучі вимоги до економічності та надійності агрегатів висовують на перший план розв'язання важливої проблеми турбобудування - аеродинамічне удосконалення проточної частини з урахуванням технологічності виготовлення й надійності експлуатації. Сюди можна віднести зниження витрат енергії у пристроях, що відводять та підводять робоче тіло, удосконалення вібраційної надійності лопаток, розробку методів керування просторовим потоком з метою усунення зривних явищ у проточній частині. Задачі ці взаємно пов'язані та їх розв'язання можливе лише на основі детального аналізу структури течії в умовах просторового нестационарного потоку, трансзвукових режимів.

Однією з центральних є проблема адекватного моделювання аеродинамічної взаємодії лопаточних апаратів. Ця проблема вміщує задачі урахування взаємного впливу вінців, що обертаються, нестационарності потоку і взаємодії ступенів із підключеними пристроями проточної частини - вхідними, перехідними патрубками, трактами нерегульованих відборів, системами вихлопу, що реалізують неосесиметричний підвід чи відведення робочого тіла.

Значний вклад у розв'язання проблеми нестационарних явищ у турбомашинах внесли роботи Н.Кемпа та У.Сірса, Р.Майєра, Г.С.Самойловича, Д.Уайтхеда, О.С.Ласкіна, Д.М.Горелова, В.Б.Курзіна, В.Э.Сарена, В.І.Гнесіна і інших авторів, де запропоновано моделі та знайдено важливі закономірності взаємодії нестационарного потоку і турбінних решіток. Але головні результати, одержані для турбінного чи компресорного ступеню, ураховують лише взаємний вплив напрямляючого апарату і робочого вінця в ізольованій постановці. Не існує надійних математичних моделей просторових нестационарних течій у пристроях типу патрубка, камери відбору. Аналіз літературних джерел свідчить про відсутність систематичного підходу до вивчення аеродинамічного впливу безлопаточних елементів проточної частини на роботу турбінного ступеня.

Проблеми, визначені вище, а також значна трудомісткість та часто обмеженість можливостей експерименту потребують постановки та вирішення комплексу задач прямого чисельного моделювання просторових нестационарних трансзвукових течій в турбомашинах з урахуванням аеродинамічної взаємодії окремих елементів.

Роботу виконано автором особисто, а також при його участі та науковому керівництві у Харківському державному автомобільно-дорожньому технічному університеті відповідно до завдань за розділами науково-технічної програми "Енергетика"(1985р.), комплексних планів створення зразків турбін; робота фінансувалася ДКНТ України за проектом 5.51.01.023(1993-1995г.г.)

Мета роботи - підвищення надійності лопаточних апаратів і аеродинамічне удосконалення елементів проточної частини типу патрубка чи камери відбору. Для досягнення цієї мети у роботі розвивається новий науковий напрям у теорії турбомашин - математичне моделювання тривимірних нестационарних течій у елементах проточної частини і основи аеродинамічної взаємодії турбінного ступеня з пристроями підводу та відведення робочого тіла.

Відповідно до мети основними задачами роботи є:

- розробка теоретичних основ аеродинамічної взаємодії турбінного ступеня з пристроями підводу та відведення робочого тіла типу вхідного, вихідного патрубка, камери відбору;
- створення метода і програмного забезпечення розрахунку тривимірних нестационарних течій у вхідному, вихідному патрубках, камері відбору; розрахунково-теоретичні дослідження течій у пристроях, а також дослідження нестационарної течії у ступені, що взаємодіє з ними; аналіз аеродинамічних сил на лопатках;
- розрахунково-теоретичний аналіз розроблених моделей і метода на основі порівняння результатів розрахунку та експерименту, оцінка їх точності та ефективності;
- рекомендації подальшого удосконалення аеродинамічних характеристик конкретних турбін.

Наукова новизна роботи полягає у розвитку нового наукового напрямку в теорії турбомашин - математичного моделювання тривимірних нестационарних течій в елементах проточної частини турбомашин і основ аеродинамічної взаємодії турбінного ступеня з пристроями підводу та відведення робочого тіла. Протягом дослідження автором було розв'язано нові теоретичні та практичні задачі і одержано нові наукові результати, які винесено до захисту:

- обґрунтовано можливість аналізу нестационарної просторової (трансзвукової) внутрішньої течії в областях складної форми на основі моделі нев'язкого і нетеплопроводного газу;
- розроблено постановку і метод розв'язання прямої задачі про тривимірну трансзвукову течію газу: а) через вінці ступеню турбо-

машини, що аеродинамічно взаємодіє з пристроєм проточної частини типу вхідного, вихідного патрубка, камери відбору; б) у вхідному патрубку, камері і тракті нерегульованого відбору, осерадіальному дифузори, вихлопній системі парової турбіни;

- запропоновано ефективну методику оцінки нерівномірності параметрів у проточній частині від патрубка або камери відбору на основі вивчення просторової структури течії у тракті;

- сформульовано загальні положення і запропоновано метод реалізації чисельного експеримента по моделюванню: а) течії через двохступеневий відсік з відбором; б) течії через відсік "вхідний патрубок - 1-й ступінь"; в) течії через відсік "останній ступінь - вихлопна система турбомашини";

- розроблено алгоритми і створено програмні комплекси розв'язання тривимірних нестационарних задач аеродинаміки проточної частини у рамках моделі нев'язкого і нетеплопровідного газу: а) у вхідному пристрої турбомашини; б) у тракті нерегульованого відбору; в) у дифузорах з кільцевими лопатками; г) у вихлопній системі турбіни з довільно орієнтованим вихлопом; д) у системі типу "вхідний патрубок - ступінь"; "ступінь(двоступеневий відсік) - тракт відбору", "ступінь - вихлопний патрубок";

- уперше представлено детальний аналіз просторових течій у вхідному, вихлопному патрубках, камерах відбору різних конфігурацій, одержано нестационарні аеродинамічні і силові характеристики ступенів ЦВТ і ЦНТ, що взаємодіють з підключеним патрубком, трактом відбору на різних режимах.

Достовірність и обґрунтованість одержаних результатів підтвержується:

- використанням класичної тривимірної моделі нестационарної течії нев'язкого і нетеплопровідного газу для ядра просторової течії;

- застосуванням математично обґрунтованих схем чисельного інтегрування рівнянь Ейлера 2-го порядку точності за часовою та просторовими змінними, постановок крайових умов;

- методичними дослідженнями моделей і метода, використаних для чисельного розв'язання задач, висунутих до захисту;

- порівнянням результатів розрахунків і даних модельних і натурних експериментів для течій у пристроях проточної частини і їх елементах.

Практичне значення роботи. Розроблені методи моделювання течії газу в проточній частині турбомашини і пристроях типу патрубка і

камери відбору дозволяють без проведення коштовних експериментів визначати з достатньою для практики точністю газодинамічні характеристики течії у широкому діапазоні режимів роботи, в тому числі на трансзвукових режимах; дозволяють аналізувати тривимірну нестационарну структуру потоку, прогнозувати конструкцію елементів проточної частини, що задовольняє вимогам надійності і забезпечення мінімальних втрат енергії в широкому діапазоні режимів.

Основні результати роботи у вигляді методів розрахунку, програмних комплексів для ЕОМ, даних досліджень і рекомендацій з аеродинамічного і вібростійкого удосконалення лопаточних апаратів турбомашин і елементів проточної частини положено в основу розробок по удосконаленню турбінних відсіків ЦВТ і ЦНТ і впроваджено у промисловість.

Реалізація результатів роботи. Основні результати дисертаційної роботи впроваджено у розробках НВО "ТУРБОАТОМ", ІПМаш НАН України, в учбовому процесі коледжу ХДАДТУ.

Апробація роботи. Основні результати виконаних досліджень доповідались на міжнародних конференціях і симпозіумах:

- "Steam Turbines of Large Output IX International Conference, CSSR, Carlovy Vary, 1989;
- 5-th Symposium on Unsteady Aerodynamics and Aeroelasticity of Turbomachines and Propellers, PRC (China), Beijing, 1989;
- International Conference "Engineering Aero Hydro Elasticity" (EAHE), CSSR, Prague, 1989; 1993;
- International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows (ISAIF), Czech Republic, Prague, 1993;
- 7th International Symposium on Unsteady Aerodynamics and Aeroelasticity of Turbomachines (ISUAAT), Japan, Fukuoka, 1994;
- 5th International Conference of Fluid Mechanics (ICFM-5), Cairo, Egypt, 2-5, January, 1995;
- 1st European Conference "TURBOMACHINERY - FLUID DYNAMIC AND THERMODYNAMIC ASPECTS", Erlangen, Germany, 1-3, March, 1995;
- 3rd International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM-95), Regensburg, Germany, 3-7, July, 1995;
- на Сьомому Всесоюзному з'їзді з теоретичної і прикладної механіки, Москва, 1991;
- на XI, XII, XIII Всесоюзних конференціях з аеропружності турбомашин, 1987 (Ужгород), 1989 (Рига), 1991 (Севастополь);

- на III Всесоюзному симпозиумі "Метод дискретних особенностей в задачах математички и его роль в развитии численного эксперимента на ЭВМ", 1987 (Харків);

- на республіканських науково-технічних конференціях "Математическое моделирование и вычислительный эксперимент для совершенствования энергетических и транспортных турбоустановок в процессе исследования, проектирования, диагностирования и безопасного функционирования" 1982, 1988, 1991, 1994 (Змійов);

- на республіканській конференції "Использование численных методов при решении прикладных задач аэромеханики", 1991 (Харків);

- на НТС СКБ "Турбоатом" 1988, 1990, 1991; семінарах і наукових конференціях в ХДАДТУ, ІПМаш НАН України, ХДПУ в 1985-1995 рр.

До захисту винесено: нову концепцію нестационарної аеродинамічної взаємодії турбінного ступеня і неосесиметричних пристроїв типу патрубка чи тракта відбору, нові математичні моделі пристроїв проточної частини, вхідного, навколівідбірної і вихлопної відсіків турбомашини, нові наукові результати в галузі стаціонарної і нестационарної газодинаміки відсіків і пристроїв.

Публікації. Основні результати дослідження опубліковано у 48 наукових публікаціях. Особистий внесок автора дисертації в роботах, опублікованих у співавторстві, полягає у наступному.

В роботах [1-5] здобувачем виконано постановки задач; виконано чисельні дослідження (спільно з співавторами); проведено аналіз результатів. В роботі [6] здобувачем розроблено постановки задачі про течію у тракті відбору і вихлопній системі; проведено дослідження і аналіз результатів (спільно з співавторами). В роботі [7] здобувачем запропоновано теоретичні основи чисельного моделювання течії у пристроях типу патрубка і камери відбору з урахуванням їх взаємодії із ступенем. В роботі [8] здобувачем запропоновано математичні формулювання задачі про моделювання течії через вхідний пристрій і розроблено моделі взаємодії із ступенем; виконано чисельні дослідження, аналіз структури течії і нерівномірності параметрів потоку. В роботах [9-12,15] здобувачем розвинено чисельний метод розрахунку внутрішніх задач трансзвукової газодинаміки в областях складної форми у довільній системі координат; вперше виконано чисельні дослідження тривимірних нестационарних течій через вінці турбомашини; вперше одержано співвідношення теорії характеристик для коректного формулювання крайових умов просторових нестационарних течій. В роботах [13, 14, 16-18] здобувачем розро-

блено постановки задачі про взаємодію ступеня і пристроя, досліджено особливості аеродинаміки навколовідбірних ступенів; розроблено постановки і проведено дослідження взаємодії турбінного ступеня з камерою відбору, про взаємодію двох турбінних ступенів з проміжним відбором. В роботах [24-27, 29, 31] здобувачем удосконалено постановки задач про взаємодію ступеня і пристроїв, створено програмний комплекс, проведено дослідження і аналіз результатів. В роботах [28, 30] здобувачем виявлено і проаналізовано явище автоколивань структури течії в дифузорах, биття.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, 5 глав, загальних висновків, списку використаної літератури, що містить 334 найменування. Роботу викладено на 450 сторінках: з них 270 стор. тексту, 160 стор. ілюстрацій.

ЗМІСТ РОБОТИ

У першій главі коротко розглянуто сучасне становище моделей і методів розрахунку нестационарних просторових течій в турбомашинах. Показано, що основні види течій в елементах турбомашин є принципово нестационарні через розвинені відриви і взаємодію періодично нестационарних потоків. Нестационарність у потоці визиває появу змінних аеродинамічних сил, збуджує коливання лопаток, динамічні напруження в вінцях і додаткові втрати енергії, які сумірні з втратами енергії стаціонарного ламінарного обтікання.

Розрізняють нестационарність у ступені від взаємного переміщення лопаток статора і ротора, де видатними вітчизняними дослідниками теоретичних моделей є Г.С.Самойлович, В.І.Гнєсін, В.Э.Сарен і інші, в експериментальних дослідженнях - О.С.Ласкін. Крокова нерівномірність у формі слідів від лопаток статора, потенціальної нерівномірності і хвильових ефектів дає нестационарність течії в каналах ротора с головною частотою nz_1 , де - z_1 - число лопаток статора. Крупномасштабна кругова нерівномірність від неосесиметричності елементів проточної частини типу вхідного патрубку, тракту відбору, вихлопного патрубку викликає в каналах ротора нестационарність параметрів з оборотною частотою n . Вихрові структури і розвинені відриви в елементах проточної частини, спровоковані гострими краями, особливостями типу ударних хвиль, викликають абсолютну нестационарність течії.

Аналітичні дослідження нестационарних явищ у турбомашинах не йдуть далі моделі нестисливої рідини і двовірних задач. Висока вартість і складність експериментальних досліджень нестационарних

просторових трансзвукових течій, а також прогрес в галузі обчислювальної техніки роблять актуальним проведення чисельних досліджень по данній проблемі.

Останнім часом сформувалися головні напрями чисельного дослідження турбулентних відривних течій: а) на базі нестационарної моделі нев'язкої рідини; б) з використанням рівнянь типу Нав'є - Стокса чи Рейнольдса.

Дослідження турбулентних відривних течій з використанням повних чи спрощених рівнянь типу Нав'є-Стокса чи Рейнольдса знаходяться на початковій стадії розвитку, відносяться в основному до аеродинамічно ідеальних каналів при великих числах Re і відривах малої інтенсивності. Основні можливості розрахунку таких течій тепер обмежуються використанням полуемпіричних моделей турбулентності для рівнянь, що описують середні параметри течії (рівняння Рейнольдса) у вузькому діапазоні визначальних параметрів.

Різні наближення рівнянь Нав'є-Стокса мають застосування, обмежене рамками моделі (наближення пограншару, тонкого шару змішання і т. д.), і для просторових каналів з гострими кромками, обширними циркуляційними зонами з чергуванням областей з високими і низькими швидкостями потоку такі моделі некоректні.

Окрім технічних труднощів, пов'язаних із значними ускладненнями скінченно-різницевого алгоритму, існує принципова обставина, яка утруднює одержання чисельного рішення для турбулентних течій: коефіцієнт турбулентної в'язкості може стати швидкозмінною сітковою функцією, що залежить від градієнтів швидкостей. В зв'язку з цим підвищуються вимоги до порядку апроксимації різницевої схеми, до її дисперсійно-дисипативних властивостей. Таким чином, одержання різницевих рішень повних рівнянь Нав'є-Стокса для нестационарних турбулентних течій в тривимірних областях складної форми не здається можливим наступним часом, маючи на увазі загальну трудомісткість різницевої моделі, а також низьку технологічних труднощів, серед яких підкреслимо перш за все необхідність застосування явних схем для розв'язання нестационарних задач, експериментально стверджених моделей турбулентності для широкого діапазону режимів.

В моделі нев'язкої рідини виникають деякі ефекти в'язкості через скінченно-різницеву апроксимацію задачі. Явище вивчалось для скінченно-різницевої апроксимації рівнянь Ейлера, в яких відкидання залишкових членів еквівалентно виникненню апроксимаційної або

схемної в'язкості, що має анізотропію. Останнім часом цей підхід з успіхом конкурує з іншими чисельними моделями течій.

У роботі прийнята різницева модель Ейлера ідеального газу для описання реальних турбулентних відривних течій у просторових каналах складної форми. На основі огляду і аналізу існуючих явних різницевих схем показано, що переважними є схеми Годуновського типу через їх фізичну змістовність завдяки використанню елементарної задачі розпаду довільного розриву, а також ідей, пов'язаних з принципом мінімуму або незростачої повної варіації.

В данній роботі для чисельного моделювання нестационарних течій в пристроях проточної частини і ступеня використовується різницева апроксимація рівнянь Ейлера Годуновського типу 2-го порядку точності по простору за часом, що задовільняє вимогам мінімального демпфювання нестационарних збурень у потоці. На прикладі лінійного рівняння переносу проаналізовано перші диференціальні наближення (п. д. н.) схеми Годунова-Колгана (СГК) з просторовою апроксимацією 2-го порядку

$$\left[\frac{\partial u}{\partial t} + a_0 \frac{\partial u}{\partial x} \right]_i = -\frac{a_0 h}{2} (r_i - r_{i-1} + \nu) \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right]_i + o(\tau, h^2)$$

і п. д. н. схеми Годунова-Колгана з екстраполяцією за часом (СГКТ)

$$\left[\frac{\partial u}{\partial t} + a_0 \frac{\partial u}{\partial x} \right]_i = \frac{-a_0 h}{2} (1-\nu) (r_i - r_{i-1}) \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right]_i + o(\tau^2, h^2).$$

Тут $r_i = (0,5, 0, -0,5)$; h, τ - кроки сітки по простору і часу, $\nu = \tau a_0 / h$ - число Куранта.

Аналіз п. д. н. показує, що похибки апроксимації обох схем близькі, але при великих ν похибки СГК вище. Для схеми СГКТ величина коефіцієнта схемної в'язкості $\epsilon = -0,5 a_0 h (1-\nu) (r_i - r_{i-1})$ у цілому позитивна або дорівнює нулю, бо на екстремумах $r_i - r_{i-1} < 0$, на областях монотонного рішення $r_i - r_{i-1} = 0$, в місцях перегину функції рішення $r_i - r_{i-1} > 0$. Таким чином, для схеми СГКТ якісна поведінка схемної в'язкості на відміну від схеми СГК відповідає характеру зміни молекулярної в'язкості при переході від шару зменшення до ядра потенціального потоку.

Спрощена класифікація відривних течій розрізняє самоіндуційовані відриви через несприятливість градієнту тиску і відриви на гострих краях меж або інших особливостей з утворенням турбулентних струй і циркуляційних зон. У останньому випадку величина ефективної в'язкості в потоці не грає істотної ролі в механізмі відриву - важний самий факт її існування поблизу точки відрива.

Показано, що на інерційному інтервалі турбулентності (при достатньо великих числах Re), сили в'язкості в області циркуляційних зон малі порівняно з силами інерції і течії у відривних зонах можна вважати невязкими. Таким чином, обґрунтовано можливість описання просторових відривних течій в областях складної форми с гострими краями і стрибками сгушення в рамках різницевої моделі ідеального газу з штучним механізмом дисипації, що стверджено в роботах інших авторів. У роботі показано, що схема Годунова-Колгана з просторово-часовою інтерполяцією перспективна для описання відривних нестационарних просторових течій завдяки якійсній відповідності "схемної" і молекулярної в'язкості у шарі змінення для широкого діапазону параметрів сітчаного розбиття і 2-му порядку точності по часовій і просторовим змінним в областях монотонності рішення.

Друга глава присвячена розробці чисельного методу інтегрування рівнянь Ейлера в областях складної форми на основі тривимірного узагальнення СГКТ-схеми. Рівняння руху ідеального газу через обертаний із сталюю кутовою швидкістю $\bar{\omega}$ канал використано у формі законів збереження:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \oint_{\sigma} \rho \bar{v} d\bar{\sigma} = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \bar{v} d\Omega + \oint_{\sigma} \hat{T} d\bar{\sigma} + \int_{\Omega} \hat{H} d\Omega = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} E d\Omega + \oint_{\sigma} (E + p) \bar{v} d\bar{\sigma} = 0.$$

де t - час, ρ , p - густина, тиск; $\hat{T} = \{T^{ik}\} = \{\rho v^i v^k + g^{ik} p\}$ - тензор густини потоку імпульса; g^{ik} - метричний тензор,

$E = p[\epsilon + 0.5(\bar{v}^2 - \bar{v}_e^2)]$, $\hat{H} = \{\rho a_e^i + 2e^{ijk} \omega_j v_k\}$, \bar{a}_e , \bar{v}_e , \bar{v} - прискорення і швидкості переносного і відносного руху газу; e^{ijk} - тензор Леві-Чівіта. Система доповнюється рівняннями стану ідеального газу.

Для одержання різницевої апроксимації системи рівнянь область течії Ω розбивається на елементарні шестигранні об'єми або комірки. Перший підхід до побудови різницевої схеми і розробки алгоритму полягає у використанні для всієї області єдиної системи координат, вибір якої продиктований особливостями меж всієї області і не залежить від конкретного розбиття. У цьому випадку різницеві аналоги інтегральних законів збереження маси, імпульсу і енергії одержимо, інтегруючи кожне з рівнянь Ейлера по елементарному об'єму різницевого розбиття:

$$\rho_{m_1+\frac{1}{2}}^{n+1} = \rho_{m_1+\frac{1}{2}}^n - \frac{\Delta t}{\Omega_{m_1+\frac{1}{2}}} \sum_{k=0,1} [(\rho \bar{v} \cdot \bar{\sigma})_{m_1+k, m_2+\frac{1}{2}, m_3+\frac{1}{2}} + (\rho \bar{v} \cdot \bar{\sigma})_{m_1+\frac{1}{2}, m_2+k, m_3+\frac{1}{2}} + (\rho \bar{v} \cdot \bar{\sigma})_{m_1+\frac{1}{2}, m_2+\frac{1}{2}, m_3+k}] ,$$

$$(\rho \bar{v})_{m_1+\frac{1}{2}}^{n+1} = (\rho \bar{v})_{m_1+\frac{1}{2}}^n - \frac{\Delta t}{\Omega_{m_1+\frac{1}{2}}} \sum_{k=0,1} [(\hat{T} \bar{\sigma})_{m_1+k, m_2+\frac{1}{2}, m_3+\frac{1}{2}} + (\hat{T} \bar{\sigma})_{m_1+\frac{1}{2}, m_2+k, m_3+\frac{1}{2}} + (\hat{T} \bar{\sigma})_{m_1+\frac{1}{2}, m_2+\frac{1}{2}, m_3+k}] - \Delta t H_{m_1+\frac{1}{2}} ,$$

$$E_{m_1+\frac{1}{2}}^{n+1} = E_{m_1+\frac{1}{2}}^n - \frac{\Delta t}{\Omega_{m_1+\frac{1}{2}}} \sum_{k=0,1} [((E+p) \bar{v} \cdot \bar{\sigma})_{m_1+k, m_2+\frac{1}{2}, m_3+\frac{1}{2}} + ((E+p) \bar{v} \cdot \bar{\sigma})_{m_1+\frac{1}{2}, m_2+k, m_3+\frac{1}{2}} + ((E+p) \bar{v} \cdot \bar{\sigma})_{m_1+\frac{1}{2}, m_2+\frac{1}{2}, m_3+k}] .$$

Верхні індекси позначають номер часового слоя, нижні полуцілі індекси відносяться до центру комірки. Спосіб обчислення об'ємів елементарних комірок $\Omega_{m_1+\frac{1}{2}}$ і площ бокових граней $\sigma_k \cdot \sigma_k$ ($k=1,2,3$) залежить від вибору системи координат і структури різницевого розбиття розрахункової області.

При другому підході вибір криволінійної системи координат здійснюється так, що у ній усі поверхні розбиття є координатними. В цьому випадку вираз для векторного елемента поверхні $d\bar{\sigma}$ k -тої грані, елементарного об'єму має вигляд

$$d\bar{\sigma}^k = d\sigma^k \frac{\bar{e}^k}{|\bar{e}^k|} = \sqrt{g_{kk}} d\sigma^k \bar{e}^k, \quad \Delta\Omega_{m_1+\frac{1}{2}} = \sqrt{g} \Delta q^1 \Delta q^2 \Delta q^3 ,$$

криволінійний базис задається за допомогою фундаментального метричного тензора і у алгоритмі з'являється масова операція перерахунку компонент векторних величин. Подання осередненого по об'єму комірки вектора швидкості \bar{U} у вигляді суми нормальної і тангенціальної складових до грані, що розглядається: $\bar{U} = \bar{U}_n + \bar{U}_\tau$, $U_n^k = n^k U^i n^j g^{ij} / (\bar{n} \cdot \bar{n})$, $U_\tau^k = U^k - n^k U^i n^j g^{ij} / (\bar{n} \cdot \bar{n})$, $k=1,2,3$

дозволяє розв'язати задачу розпаду розрива на грані.

Узагальненням схеми Годунова є її модифікація на основі принципу "мінімальних значень похідної", виконана Колганом. Поля газодинамічних параметрів у межах кожної розрахункової комірки апроксимуються на основі лінійної інтерполяції по значенням параметрів у центрах суміжних комірок. Компоненти градієнта скалярного поля φ можуть бути обчислені із лінійних рівнянь, зв'язаних прирости

параметра в центрах суміжних комірок:

$$\varphi_{m_j - \frac{1}{2}} - \varphi_{m_j + \frac{1}{2}} = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial q^k} \right)_{m_j - \frac{1}{2}} \cdot \left[q_{m_j - \frac{1}{2}}^k - q_{m_j + \frac{1}{2}}^k \right]; \quad j=1,2,3.$$

Система рівнянь для компонент градієнта у системі координат локально орієнтованого базису перетворюється у діагональну і компоненти градієнту обчислюються явно. Другий набір значень компонент градієнту φ знаходиться з аналогічних лінійних співвідношень на симетричному шаблоні. Вибір компонент градієнту для данної комірки виконується з попарного порівняння похідних на основі принципу мінімальних значень похідних:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial q^k} = \begin{cases} \text{sign} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial q^k} \right) \cdot \min \left\{ \text{abs} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial q^k} \right) \text{I}, \text{abs} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial q^k} \right) \text{II} \right\}, & \text{если} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial q^k} \right) \text{I} \cdot \left(\frac{\partial \varphi}{\partial q^k} \right) \text{II} > 0, \\ 0, & \text{если} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial q^k} \right) \text{I} \cdot \left(\frac{\partial \varphi}{\partial q^k} \right) \text{II} < 0. \end{cases}$$

Суть модифікації Колгана полягає у визначенні газодинамічних параметрів у центральних точках граней комірок з обох сторін загальної межі на основі співвідношень для похідних. Для цих значень параметрів далі вирішується задача розпаду розрива.

Крім просторової інтерполяції параметрів у середині комірки використовується екстраполяція за часом. А саме, для рівнянь Ейлера у дивергентній формі $\partial U^k / \partial t + \nabla_1^T \text{ik} + H^k = 0$, $(k=1, \dots, 5)$ інтерполяція газодинамічних параметрів на грань комірки з номером $(m_1, m_2+1/2, m_3+1/2)$ в напрямку координати q^1 згідно з ідеєю Колгана виконується за формулою

$$U = U_{m_i + \frac{1}{2}} + \left[\frac{\partial U}{\partial q^1} \right]_{m_i + \frac{1}{2}} \Delta q^1 + \frac{\tau}{2} \left[\frac{\partial U}{\partial t} \right]_{m_i + \frac{1}{2}}.$$

Похідна за часом $\partial U / \partial t$ обчислюється по правим частинам системи рівнянь руху на попередньому часовому шарі.

Обмірковуються формулювання і чисельна реалізація крайових умов на свободних межах розрахункової області. На основі аналізу загальної теорії характеристик автором розвинено квазіодновимірну нестационарну теорію характеристик у напрямі локальної нормалі до свободної межі. Одержано п'ять співвідношень на характеристиках

$$\begin{aligned} d_{\lambda_1} p - a^2 d_{\lambda_1} \rho + \frac{1}{\lambda_1} f_1(g_{ik}, p, \rho, \bar{v}, \omega) dq^3 &= 0, \\ d_{\lambda_2} v^1 + \frac{1}{\lambda_2} f_2(g_{ik}, p, \rho, \bar{v}, \omega) dq^3 &= 0, \\ d_{\lambda_3} v^2 + \frac{1}{\lambda_3} f_2(g_{ik}, p, \rho, \bar{v}, \omega) dq^3 &= 0, \end{aligned}$$

$$d\lambda_4 v^3 - \frac{2}{k-1} d\lambda_4 a + \frac{1}{\lambda_4} f_4(g_{ik}, p, \rho, \bar{v}, \omega) dq^3 = 0,$$

$$d\lambda_5 v^3 + \frac{2}{k-1} d\lambda_5 a + \frac{1}{\lambda_5} f_5(g_{ik}, p, \rho, \bar{v}, \omega) dq^3 = 0,$$

де $d\lambda_i = \frac{1}{\lambda} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial q_i^3}$ - диференціали, взяті уздовж характеристичного напрямку λ_i ($i=1, 2, 3, 4, 5$),

$$\lambda_{1,2,3} = \frac{v_3}{\sqrt{g_{33}}}, \quad \lambda_4 = \frac{v_3 - a}{\sqrt{g_{33}}}, \quad \lambda_5 = \frac{v_3 + a}{\sqrt{g_{33}}}.$$

Характеристичну форму рівнянь газової динаміки одержано у припущенні незалежності газодинамічних параметрів від змінних q^1 і q^2 в ортогональній системі координат $\{q^i\}$. Трактовка крайових умов для нерухомого каналу така: а) на вході в розрахункову область зберігаються

$$V_3 + 2a/(k-1) = J_+, \quad p/\rho^k = S, \quad V_1 = V_{1-\infty}, \quad V_2 = V_{2-\infty}$$

б) на виході розрахункової області - $V_3 - 2a/(k-1) = J_-$.

У главі розглянуто постановку задачі про течію через турбінний ступінь, що працює в умовах колової нерівномірності і нестационарності вхідних і вихідних газодинамічних параметрів.

Пряме чисельне моделювання роботи відсіка "ступінь - неосесиметричний пристрій" через різномасштабність об'ємів пристрою і каналів ступеня зустрічає технічні труднощі, тому в роботі пропонується квазістатичне наближення.

Аналіз типових розподілів параметрів у міжступеневих зазорах від впливу вхідних, вихлопних патрубків, трактів відбору з кількістю труб $n \leq 2$ показує, як правило, наявність для номінальних режимів (наближено) симетрії в розподілах і крупномасштабну (порівняно з кроком ротора або статора) структуру нерівномірності. Такі розподіли параметрів можна з задовільною точністю апроксимувати кусково-сталого функцією з довжиною ділянок сталості Ω_i , в кілька разів більшою за крок решітки статора чи ротора. Це дозволяє виконати розрахунок ступеня на кожній з ділянок сталості крайових параметрів в рамках моделі ізольованого ступеня. Загальне рішення про течію у каналах ступеня на повнім оберті ротора здійснюється суперпозицією рішень про течію у ступені на всіх ділянках (рис. 1).

Кількість ділянок кусково-сталого апроксимації Ω_i вибирається з урахуванням особливостей течії у відсіку, а саме, плавності і характеру розподілів параметрів у зазорі, і визначається кількістю гармонік, що враховуються у Фур'є-розкладанні обертальної складової сили на лопатках ротора.

У третій главі теорія аеродинамічної взаємодії ступеня і прист-

рою застосовується до моделювання течій у вхідних відсіках. На підставі обзору показано, що по дослідженням вхідних відсіків, вхідних патрубків є лише обмежені експериментальні результати ЦКТИ-ПОАТ"ХТЗ", БІТМ, що відносяться до продувок моделей окремих ізольованих патрубків; варіанти патрубків, досліджені у літературі, не охоплюють всіх відомих конфігурацій; теоретичні моделі вхідного патрубка відсутні.

У главі викладено метод розрахунку просторової нестационарної течії через вхідний патрубок, що дозволяє одержати нестационарні локальні і інтегральні газодинамічні характеристики течії у патрубках, колекторі і радіальному кільцевому конфузори підводу у проточну частину; розглядаються варіанти розрахункової області для вхідних патрубків ЦТТ і ЦНТ(рис.2); обговорюються варіанти тривимірної нестационарної моделі взаємодії вхідного пристрою і 1-го ступеню, і способи їх реалізації. У складі відсіку розглянуто варіанти ступеню: а) на основі теплового розрахунку, б) двовимірні моделі, в) повна тривимірна нестационарна модель. Обговорюється доцільність поступового розрахунку патрубка в ізольованій постановці і наступного розрахунку набору ступенів для урахування впливу патрубка на ступінь.

В частині глави, присвяченій газодинамічним дослідженням, розглянуто газодинаміку вхідного патрубка з радіальним і тангенціальним підводами пари в колектор. Показано, що для типових конфігурацій патрубка (рис.5) течія має розвинену вихрову структуру, що складається з рециркуляційних зон по обидві сторони підводящої труби, які стискають основну течію у колекторі і створюють колову нерівномірність параметрів і нестационарність. Колові розподіли витрати, кутів атаки направляючих лопаток і тиску немонотонні; максимуми витрати на колі входу в ступінь розміщуються повз дуг виходу з підводящих труб(рис.5). Ефект зміщення визваний підвищенням тиску у проточній частині на дугах проти патрубків внаслідок різкого повороту ліній тока з колектора у проточну частину. Максимуми кутів атаки на колі входу у ступінь зміщені на 10° - 20° від підводящої труби, досягають значень 30° - 40° і відрізняються для корневих і периферійних поясів направляючих лопаток. Зміщення максимуму кута атаки у вказанному діапазоні помічено у дослідках і.Г.Гоголева, де одержано значення кутів атаки вище 50° .

Перелічені фактори роблять структуру колових залежностей тиску мілкомасштабною, приводять до сдвигу максимуму амплітудно-

частотної характеристики статичного тиску на вході в ступінь в сторону гармонік високих оборотних кратностей, що підвищує вібронавантаженість лопаток першого ступеня.

Плавне поєднання підводящих труб з колектором при радіусі скруглення $r/R_{\text{труби}}=1.0+1.1$ істотно знижує розміри і інтенсивність циркуляційних зон, розмах статичного тиску зменшується в 3 рази, знижуються кути атаки соплових лопаток.

Вивчення тангенціальних схем підводу виявляє лінійний, в цілому, характер розподілу параметрів у колекторі вздовж кола, що вказує на можливість одержання рівномірних розподілів при профілюванні периферійної стінки колектора за лінійним законом $R(\varphi)$.

Для двохтрубною конфігурації вхідного патрубку виконано порівняння результатів розрахунків по Cz з експериментальними даними ЦКТИ-ПОАТ "ХТЗ" в ізольованій постановці (рис. 5). Основні відміни, помічені в областях підвищеної нестационарності, досягають 18% поблизу витискувача та пояснюються його спрощеним моделюванням у розрахунку. Результати зіставлення вказують, що модель патрубка на базі рівнянь Ейлера дає результати, які якісно і кількісно відповідають дослідним.

Дослідження газодинаміки різних типових підводів показують:

- збільшення числа труб (при $F_{\text{ВХ}} = \text{idem}$) знижує нерівномірність у колекторі, але в цьому випадку визначальним є кут θ входу труби в колектор: при $\theta=90^\circ$ нерівномірність мінімальна, при тангенціальному підводі $\theta<90^\circ$ нерівномірність росте; в цьому випадку для зниження нерівномірності доцільна установка витискувача у колекторі між патрубками;

- вогнутий розділювач течії у колекторі традиційної конструкції збільшує розмах нестационарних пульсацій по числах Sh на 50%, інтенсивність і розміри циркуляційних зон у колекторі, і виправданий при малій поперечній площі колектора.

Вирівнення колових розподілів витрати, кутів атаки можна досягти організацією змінної вздовж кола площі поперечного перетину колектора, кривизни випуклої стінки конфузора підводу пара у точну частину.

Для ряду основних конфігурацій підводу виконано розрахунки течії і змінних сил на лопатках першого ступеня ЦНТ ($D/I=12$). Показано, що колові розподіли колової компоненти сил на лопатці подібні коловим розподілам витрати на вході у ступінь (рис. 5). Зіставлення даних розрахунку з полуміричними формулами оцінки сил ін-

ших авторів показало, що останні дають занижені до 35% значення сил через неврахування кутів атаки діафрагми. Показано, що розмах низькочастотних складових сил на лопатках 1-го ступеня може бути зменшено вдвое, а спектральний состав зміщено в сторону низьких гармонік при виконанні заходів, що знижують інтенсивність циркуляційних зон у колекторі.

Моделювання течії у регулюючому ступені при підводі до одного сегменту виявило появу 10% негативного закиду колової сили при переході лопатки від дуги підводу у "тінь" і на зворотному переході (рис. 6); явище уперше зареєстровано експериментально Г.С. Самойловичем на ступенях з парціальним підводом.

В четвертій главі на основі огляду показано, що головна частина досліджень з газодинамики навколовідбірних відсіків має експериментальний характер і спрямована на підвищення економічності; в основному відсутні дані по структурі та особливостям течій в трактах відбору і навколовідбірних ступенях, переважають інтегральні оцінки течії, одержані в експериментах і на одновимірних моделях.

В главі обосновано концепцію аеродинамічної взаємодії у відсіку з відбором робочого тіла і наведено оцінки похибки моделювання від кусково-сталої апроксимації параметрів у щілині відбору при відборах не вище 30-35% від загальної витрати.

Подано різні моделі навколовідбірного відсіку: "довідбірний ступінь - тракт відбору - фрагмент зазора"; "фрагмент зазора - тракт відбору - післявідбірний ступінь"; "довідбірний ступінь - тракт відбору - післявідбірний ступінь". Через некратність у загальному випадку періодів довідбірного і післявідбірного ступенів пропонується осереднення параметрів вздовж колової координати у зазорі.

В главі запропоновано різні моделі тракту відбору: а) у повній тривимірній постановці (рис. 3); б) двовимірна з осередненням в шарі змінної товщини, перпендикулярному осі турбіни; ефективна для трактів с широкою міжобійменною щілиною і вузькими колекторами.

В частині глави, присвяченій газодинамічним дослідженням, розглянуто течії в трактах з різними характеристиками колекторів. Розрахунками виявлено механізм і фактори, що визначають нерівномірність в щілині відбору. Виявлено існування позитивного радіального градієнта тиску внаслідок повороту стока проти центра патрубку, що знижує колову нерівномірність і підвищує опір тракту (рис. 8). Ефект уперше зареєстровано експериментально В.І. Гродзинським.

ДІБ ім. В. Степаніка
АН України

Дослідженнями показано, що фактори, які формують крупномасштабну структуру розподілу тиску в щілині - кількість патрубків (n), кутові розміри дуг входу (φ) - визначають в основному початкову групу гармонік тиску. Закрутка, ефект екранування (проти центру труби), відношення $F_{\text{щ}}/F_{\text{ко}}$, z/h - формують тонку структуру розподілу тиску і визначають другу групу гармонік. Умови входу в патрубок формують малі поправки до розподілу параметрів у щілині та визначають третю (найбільш високочастотну) групу гармонік.

Двовимірні і одновимірні моделі виявляють в основному першу групу гармонік. Запропонована тривимірна модель тракту виявляє дві перші групи гармонік і частково - третю - про що свідчать зіставлення з даними експериментів (рис. 7). А саме, розрахунок за тривимірною моделлю виявляє сплеск тиску проти патрубка для радіально спрямованих труб (експеримент ХІІ) і для тангенціального відводу (експеримент ІІІ). В останньому випадку труднощі зіставлення викликає сильна нестационарність течії в колекторі через малу величину $F_{\text{щ}}/F_{\text{ко}}$.

Систематичні дослідження трактів на базі тривимірної моделі дозволили розробити полуемпіричний метод оцінки нерівномірності тиску в щілині на основі осередненого коефіцієнта

$$K_p = (\bar{p}_{\text{max}} - \bar{p}_{\text{min}}) / [0,5/\rho_{\text{вх}} (G/F_{\text{вх}})^2]$$

де \bar{p}_{min} - середнє значення тиску на ділянці межобойменої щілини, розміщеної проти патрубка, \bar{p}_{max} - середнє значення тиску на іншій частині щілини. Аналіз структури течії і урахування тривимірних ефектів у тракті дозволяє одержати формулу для K_p

$$K_p = \frac{k_1 (R/r)^2}{4n^2 \{1 + [(R\varphi)/(4\pi\alpha) \cdot (F_{\text{щ}}/F_{\text{ко}})]\}^2} \cdot \left\{ [F_{\text{щ}}/(\alpha F_{\text{ко}})]^2 - \frac{4n^{2p} k_2 (r/R)^2}{(1 - n\varphi/2\pi)^2} \right\},$$

де k_1, k_2 - коефіцієнти, що залежать від втрат енергії у тракті.

Вираз для K_p веде до висновків якісного характеру:

1. При умові нехтування внутрішніми втратами коефіцієнт колової нерівномірності K_p залежить від геометричних параметрів тракту - n , $F_{\text{щ}}/F_{\text{ко}}$, r/R , φ і не залежить від витрати у відбір.
2. Збільшення відношення $F_{\text{щ}}/F_{\text{ко}}$ при незмінних інших параметрах веде до росту K_p ; при умові $n\varphi = \text{const}$ коефіцієнт нерівномірності K_p обмежений зверху.
3. Рівномірний коловий розподіл тиску у щілині досягається при критичному відношенні $F_{\text{щ}}/F_{\text{ко}} = \frac{2n\alpha \cdot r/R\sqrt{k_1}}{1 - n\varphi/(2\pi)}$.
4. Збільшення куткового розміру вхідного перетину труби знижує K_p .

5. При фіксованих n , φ і $F_{\text{щ}}/F_{\text{ко}}$ збільшення відношення R/r веде до зростання коефіцієнту R_p .

Експерименти та розрахунки різних трактів показують добрий збіг по R_p (рис. 7-9). Експерименти проф. О. С. Ласкіна підтверджують зниження нерівномірності при значеннях $F_{\text{щ}}/F_{\text{ко}}$, близьких до критичних, і вказують на ріст рівня нестационарності.

Полуемпіричний метод дозволяє урахувати вплив форми патрубка і колектора на R_p . В роботі показано, що колова нерівномірність тиску залежить від коефіцієнта форми меридіанного перетину колектора $\delta_k = h_k/z$. А саме, мінімум R_p при $F_{\text{щ}}/F_{\text{ко}} = \text{const}$ досягається для $\delta_k = F_{\text{ко}} / (\varphi R + z_{\text{п}})^2$, що стверджується тривимірним розрахунком. Так само, вплив форми поперечного перетину патрубка на R_p можна оцінити, вводячи коефіцієнт $\delta_{\text{п}} = z_{\text{п}} / (2R \sin(\varphi/2))$ форми патрубка. із основної формули для R_p одержуємо, що мінімум коефіцієнта R_p відповідає співвідношенню $\delta_k = F_{\text{ко}} \delta_{\text{п}} / [F_{\text{п}}(1 + \delta_{\text{п}})^2]$. Для поширеного випадку патрубка круглого перетину ($\delta_{\text{п}} = 1$) це дає $\delta_k = F_{\text{ко}} / (4F_{\text{п}})$, що треба урахувати при проектуванні трактів.

Дослідження навколівідбірних відсіків при двох-, трьохтрубних відборах 30-35% витрати на моделі КТ 1070 (відсіки 2-3, 4-5) дозволили сформулювати загальні особливості у розподілі сил на робочій лопатці. На рис. 11 показано нерівномірність тиску в міжступеневому зазорі і крокові розподіли сил на лопатці в характерних точках кола. Встановлено: головний вклад в силу на навколівідбірних лопатках вносить крупномасштабна нерівномірність параметрів у зазорі; крокові складові сил для лопаток до- і післявідбірного ступенів порівняні за величиною; рівні обертальної складової сил в 10-15 разів вище крокової. Режим роботи довідбірного ступеня є більш навантаженим і низкочастотна складова сили діє переважно на периферійні пояси лопатки; течія у післявідбірному робочому вінці носить періодично діагональний характер, розмах обертальної складової приблизно однаковий для всіх поясів лопатки.

Рекомендації по аеродинамічному удосконаленню трактів відбору, зниженню нерівномірності тиску у щілині і сил на робочих лопатках навколівідбірних ступенів:

- для зниження опору колектора і зменшення розмаху нерівномірності в щілині доцільне збільшення площі поперечного перетину колектора при збереженні оптимального відношення висоти до осьового розміру колектора;
- при обраній формі поперечного перетину патрубка і заданих пло-

щах щілини і поперечного перетину колектора існує оптимальна форма поперечного перетину колектора;

- при технологічних обмеженнях на форму меридіанного перетину колектора зниження нерівномірності тиску в щілині можливе за рахунок вибору оптимальної форми вхідного перетину патрубків;

- для зниження впливу змінних режимів роботи навколівідбірних ступенів на формування нерівномірності тиску в щілині і колекторі і для зменшення перерозподілу витрат у двохпатрубових конфігураціях доцільно вибирати патрубки з радіально-орієнтованою віссю на початковій ділянці і плавним позднанням меж з периферійною стінкою колектора;

- більш сприятливе і рівномірне навантаження лопатки довідбірного ступеня досягається зниженням теплоперепаду на робочий вінець для переведення його на дозвуковий режим роботи по всьому діапазону витрат у відбір;

- зниження обертальної складової сили на лопатці післявідбірного ступеню забезпечується усуненням періодично діагонального характеру течії в каналах післявідбірного ступеня, зменшенням відривних явищ у корневих поясах каналів статора, розмішених на дугах інтенсивного відбору, що досягається підходящим профілюванням периферійної обмежувачої поверхні проточної частини зазора і діафрагми.

У п'ятій главі з огляду витікає відсутність у вітчизняній літературі теоретичних і експериментальних робіт з газодинаміки нестационарних течій у вихлопному відсіку. Експерименти з визначення нестационарних характеристик потоку унікальні і виконані за рубежом. Дослідження осереднених за часом характеристик течії на моделях виконані в основному в МЕІ (проф. А. Е. Зарянкін, доц. В. Ф. Касілов) і ХПІ (проф. А. В. Гаркуша).

В главі описано метод розрахунку просторової нестационарної трансзвукової течії нев'язкого газу в вихлопних системах, що складаються з дифузора і збірної камери достатньо довільної конфігурації. Передбачено описання внутрішніх елементів: дефлекторів, кільцевих лопаток, спеціального профілювання зовнішнього обводу, направляючих елементів у просторі збірної камери і т.п. Варіанти розбиття розрахункової області подано на рис. 4. Розглянуто моделі нестационарної течії через тривимірний дифузор, патрубок, вихлопний відсік.

На основі метода реалізовано програмний комплекс з тривимірної

нестационарної трансзвукової моделі вихлопного відсіку парової турбіни, що містить аеродинамічну взаємодію останнього ступеня і патрубку з використанням кусково-сталої апроксимації колових розподілів параметрів течії в зазорі (гл. 2). Запропоновано частну постановку задачі про наскрізний розрахунок тривимірної течії в останньому ступені і осерядіальному (осекільцевому) дифузори.

Метод апробовано шляхом зіставлення розрахункових і експериментальних даних про просторову нестационарну структуру течії в конфузорах і дифузорах (рис. 10, 13). Чисельні дослідження ізольованих свободних вихлопних патрубків показали відповідність одержаної вихрової структури у збірній камері до спостережаної у дослідках А. В. Гаркуші, В. Ф. Касілова (рис. 10). Зокрема виявлено: закрутка потоку підвищує нерівномірність течії на вході у свободний патрубок; стиснення камери перегородкою, перпендикулярною осі, сприяє підвищенню нерівномірності течії по всіх поясах дифузора; зростання градієнта вхідного профілю швидкості веде до росту колової нерівномірності статичного тиску у патрубок на дозвукових режимах; на трансзвукових режимах відбувається зниження нерівномірності.

Дослідженнями стаціонарних характеристик течії у відсіку "ступінь-патрубок" підтверджено, що на маловитратних і навантажених режимах джерелом закиду вологі в ступінь є прикорнева відривна область у дифузори (рис. 10); встановлено: модель взаємодії адекватно відображує структуру течії і роботу відсіку у широкому діапазоні режимів, є основою для створення в'язкої моделі; колова нерівномірність повного тиску у міжступеневому зазорі подібна аналогу для статичного тиску і на номінальному режимі нижче, ніж на часткових; на розрахункових режимах нерівномірність потоку у відсіку нижче, ніж у ізольованому патрубок за рахунок сглажуючої дії ступеня; на номінальних режимах перші амплітуди обертальної і крокової складових сили порівняні за величиною (рис. 16); зміна 1-ї амплітуди обертальної складової сили в залежності від режиму відповідає зміні коефіцієнтів нерівномірності кінетичної енергії і статичного тиску K_p у міжступеневому зазорі, віднесених до швидкісного напору; функція відношення колового розмаху статичного тиску до його середньої величини ω_p в залежності від режиму не характеризує зміну обертальної складової сили на лопатці.

У дослідженнях виявлено автоколивання витрати, структури течії, руху ударної хвилі уздовж опуклої оболонки дифузора при стаціонарних умовах на межах для навантажених режимів відсіку. Зо-

крема, для модельного дифузора з обводами, заданими радіусами концентричних кол при перепадах $0.5 < \epsilon = p_{out}/p_{oc} < 0.85$, коефіцієнті дифузорності $1 \leq n \leq 2$ і осьовому вході течія характеризується існуванням місцевої надзвукової зони на зовнішній оболонці, інтенсивність і розміри якої зростають із зростанням перепаду. Від значення $\epsilon = 0.8$ у каналі виникає область зворотньої течії за стрибком стиснення, яка періодично змінює свої розміри за часом. Пульсація зворотньої зони супроводжується переміщенням стрибка стиснення уздовж зовнішньої оболонки і змінює його інтенсивності, коливаннями параметрів у каналі і витрати через вхідний та вихідний перетини (рис. 15).

Дослідженнями показано, що позитивний меридіанний кут γ у вхідному перетині, а також кут закрутки α зменшують амплітуду коливань, збільшують частоту, і ріст цих параметрів веде до фіксації стрибка. Аналіз автоколивань в залежності від коефіцієнтів n, ϵ дозволяє побудувати діаграму стійкості течії для сімейства дифузоров з $n = \text{var}$ в залежності від перепаду (рис. 12). Виявлено, що чисельне рішення задачі про течію у дифузорі залежить від початкових даних. Серія розрахунків при збільшенні перепаду ($\epsilon > 0.5$) породжує першу гілку рішення с удвоєнням довжини циклу на інтервалі $0.6 < \epsilon < 0.7$ (рис. 12). Друга серія розрахунків при зменшенні перепаду породжує другу гілку рішення, коливання на якій настають при $\epsilon = 0.55$, мають меншу амплітуду і більшу частоту. На режимах $\epsilon > 0.65$ течія жорстко переходить на першу гілку рішення. Таким чином, існує гістерезис появи автоколивань по частоті, супроводжуваний біфуркаціями циклу, що характеризує нестійку роботу дифузора. У главі описаний механізм створення циркуляційної зони в моделі і вказані причини збудження автоколивань.

Явище уперше експериментально виявлено Р. Майером в 1986 р. на осерадіальному дифузорі у складі патрубка з підключеним останнім ступенем. Для дифузоров Майера моделюванням також відкрито існування діапазону автоколивань при рівномірних стаціонарних крайових умовах, що вказує на загальний характер явища.

Для кількісного зіставлення результатів розрахунків з даними дослідів автором розроблено полуміричну модель надбандажної струмини на основі вимірювань Майера, що моделюється вдвом пари у периферійній області міжступеневого зазору на вході в дифузор (рис. 13). Показано, що високоенергетична закручена струмина зменшує амплітуду і збільшує частоту автоколивань. Для дослідних па-

раметрів струмини розрахунковий діапазон частот осесиметричної течії у дифузорі складає $100+146\text{Гц}$, що у 1.3 рази нижче дослідних значень. Показано, що порушення осесиметричності течії на вході в дифузор внаслідок впливу кожуха(що виражається у змінному удвож кола перепаді на перетини дифузора), розширює діапазон частот у меридіанних перетинах і внаслідок явища синхронізації веде до появи двох домінуючих мод коливань, тобто до биття з частотами $9-11\text{Гц}$ (рис.14). Биття з частотою близько 10Гц зареєстровано у дослідах Майєра.

По результатах досліджень нестационарних характеристик течій у відсіку "ступінь - патрубок" встановлено: модель відсіку адекватно відображує нестационарні інтегральні і локальні характеристики системи, є ефективним інструментом для прогнозу параметрів автоколивань у дифузорах та діапазону режимів їх існування. Полупемпірична модель надбандажної струмини дозволяє достовірно моделювати автоколивання потоку у дифузорі патрубку; биття в автоколиваннях характерні для дифузорів з малим кутом дотичної вхідної ділянки зовнішньої оболонки; частота биття слабо залежить від режиму(рис.18), а визначається коловим перепадом тиску у надбандажній струмині; амплітуди перших гармонік обертальної і пульсаційної складових сил на лопатці порівняні за величиною(рис.17). На основі аналізу низькочастотної частини спектру нестационарності у вихлопному відсіку одержано формулу для спектру комбінаційних частот збурюючих сил на робочих лопатках в залежності від частоти обертання ротора та частот головних мод автоколивань f_p^I, f_p^{II} , що складають биття:

$$f_e = \{ |jn \pm kf_p^I|, |jn \pm kf_p^{II}|, \quad j,k = 0, 1, 2, \dots \}.$$

Враховуючи широкий діапазон частот шуму дифузора ($100+150\text{Гц}$) на різних режимах, можна припустити, що лопатки зазнають впливу широкого спектру частот, та їх відстроювання має враховувати комбінаційні частоти збудження.

Заходами, що спрямовані на зниження вібронапруженості лопаток останніх ступенів на режимах вище номінального, є:

- усунення, зменшення або керування витратою надбандажної струмини;
- використання дифузорів з малою кривизною і великим кутом ($>20^\circ$) початкової ділянки зовнішньої оболонки;
- застосування вдуву, або відсосу пари через перфоровану початкову ділянку зовнішньої оболонки дифузора (у випадку широкого діапазону режимів з автоколиваннями).

Дисертаційна робота є вкладом у розвиток н о в о г о наукового напрямку в теорії турбомашин – математичного моделювання аеродинамічної взаємодії турбінного ступеня з пристроями підводу або відведення робочого тіла. У процесі досліджень уперше розв'язано ряд важливих теоретичних і практичних задач і одержано наступні нові наукові результати.

1. Обґрунтовано можливість аналізу нестационарних просторових відривних (трансзвукових) внутрішніх течій в областях складної форми на основі скінченно-різницевої моделі нев'язкого і не-теплопровідного газу в інерційному діапазоні турбулентності.

2. Запропоновано тривимірне узагальнення явної різницевої схеми 2-го порядку точності годуновського типу з інтерполяцією за часом для інтегрування рівнянь Ейлера, розвинено метод розрахунку нестационарних просторових течій в областях складної форми, що допускає розвинені відриви на гострих краях і стрибках згущення.

3. Для чисельної реалізації крайових умов внутрішніх задач одержано загальний вид диференціальних співвідношень для газодинамічних параметрів на характеристиках повної системи рівнянь газодинаміки у квазіодновимірному наближенні.

4. Уперше розроблено загальну концепцію економічного чисельного моделювання тривимірної трансзвукової нестационарної течії газу в ступеню турбомашини, що аеродинамічно взаємодіє з неосесиметричним пристроєм проточної частини типу патрубка або камери відбору. Концепція дозволяє виділяти крокову і обертальну складові змінних аеродинамічних сил на лопатках ротора.

5. Уперше розроблено постановки і метод розв'язання прямої задачі про тривимірну трансзвукову нестационарну течію газу в пристроях проточної частини турбіни: вхідному патрубку, тракті відбору, вихлопній системі; створено програмне забезпечення для розв'язання цих задач.

6. Створено програмні комплекси для моделювання тривимірної трансзвукової нестационарної течії через відсік "вхідний патрубок – 1-й ступінь", відсік з відбором робочого тіла, відсік "останній ступінь – вихлопна система" парової турбіни; запропонована концепція і постановки допускають пряме розповсюдження на випадок в'язких течій.

7. Запропонований розрахунковий метод, моделі течій в пристро-

ях проточної частини апробовано на тестових задачах, зіставленням з експериментальними даними інших авторів.

Із застосуванням розроблених моделей і програмного забезпечення виконано дослідження і одержано нові відомості про просторову структуру, особливості і нестационарність у вхідних патрубках, трактах відбору і вихлопних патрубках, а також вхідних, навколовідбірних і вихлопних відсіках парових турбін.

8. Дослідженнями в х і д н и х відсіків уперше показано, що розподіли параметрів потоку на вході в перший ступінь не монотонні і їх максимуми досягаються за дугами виходу з підводящих труб, що сдвигає максимальні значення амплітуд спектрального складу сил на робочій лопатці в область високих гармонік; розподіли колових компонент змінної аеродинамічної сили на робочій лопатці подібні коловим розподілам витрати на вході в ступінь.

Розмах низькочастотних складових сил на робочій лопатці може бути зменшено вдвічі, а їх спектральний склад сдвинуто в сторону нижчих гармонік при виконанні заходів, що знижують інтенсивність рециркуляційних зон у колекторі (плавне зведення меж підводящих труб з колектором, установка стискувачів, спеціальне профілювання поперечного перетину колектора і т. д.).

Використання увігнутого розділителя течії в колекторі традиційної конструкції підвищує нестационарність, інтенсивність і розміри рециркуляційних зон у колекторі і справджується при малій поперечній площі колектора.

Для регулюючого ступеня уперше чисельно показано можливість появи негативних значень колової компоненти лопаточної сили при роботі з одним підводом.

9. Чисельний аналіз течій в т р а к т а х в і д б о р у показав: основними факторами, що визначають гармонічний склад статичного тиску в щілині, є кількість патрубків, відношення площ вхідного перетину щілини і поперечного перетину колектора, кутові розміри дуг входу і умови входу в патрубки.

Завдяки виявленню особливостей структури течії запропоновано і апробовано двовимірні чисельні моделі тракту відбору в шарі, перпендикулярному осі турбіни; показано їх перспективність для моделювання аеродинаміки трактів відбору ЦНТ з широкою міжобійменною щілиною.

На основі аналізу просторової структури течії у тракті відбору побудовано і апробовано елементарну багатопараметричну теорію оп-

тимальної камери відбору; виявлено механізм і фактори, що формують нерівномірність параметрів у камері, запропоновано рекомендації по конструюванню колектора з мінімальною нерівномірністю параметрів в щілині.

Виявлено зв'язок сил на робочій лопатці і низькочастотної частини спектру нерівномірності статичного тиску в щілині відбору; уперше теоретично встановлено різницю та загальні особливості в течіях через довідбірний і післявідбірний ступені при значних витратах у відбір; запропоновано заходи по зниженню вібронатаженості робочих лопаток навколівідбірних ступенів при великих відборах.

10. Із застосуванням розробленого метода уперше виконано дослідження просторових нестационарних трансзвукових течій: в осерадіальних дифузорах; у вихлопних патрубках парових турбін; у відсіках "останній ступінь - вихлопний патрубок" в широкому діапазоні режимів.

Чисельні дослідження ізольованих вихлопних патрубків показали відповідність одержаної вихрової структури в дифузорі і сборній камері експериментально зареєстрованій у дослідах А.В.Гаруші, В.Ф.Касілова.

Дослідження течій у відсіку "ступінь - патрубок" показали:

- модель взаємодії адекватно відображує структуру течії і роботу відсіку в широкому діапазоні режимів; є основою для створення зв'язкої моделі;

- колова нерівномірність повного тиску в міжступеневому зазорі подібна аналогу для статичного тиску і на номінальному режимі нижче, ніж на часткових; на розрахункових режимах нерівномірність потоку у відсіку нижче, ніж в ізольованому патрубку;

- коефіцієнти нерівномірності кінетичної енергії і статичного тиску в міжступеневому зазорі відображують зміни 1-ї амплітуди обертальної складової сили на лопатці залежно від режиму; відношення колового розмаху статичного тиску до його середньої величини не характеризує зміну обертальної складової сили.

У дослідженнях нестационарних течій в елементах вихлопних відсіків встановлено такі нові результати:

- уперше чисельно виявлено явище автоколивань структури течії та ударної хвилі для навантажених режимів роботи осерадіальних дифузоров з нестационарними і осередненими газодинамічними параметрами течії, що кількісно відповідають дослідним на всьому діапазоні

режимів;

- виявлено існування гістерезиса по частоті автоколивань залежно від перепаду тиску на дифузор;
- встановлено причини виникнення і підтримання автоколивань для рівномірного потоку на вході в дифузор, вплив на них режимних характеристик, геометрії зовнішнього контуру дифузора;
- побудовано полуемпіричну модель надбандажної струмини і встановлено її вплив на зниження амплітуди і збільшення частоти коливань у осерадіальному дифузорі;
- для течій у вихлопних патрубках на навантажених режимах одержано биття автоколивань, що по частотах співпадають з дослідними;
- виявлено визначальну роль колової нерівномірності течії у патрубок в виникненні биття.

Дослідженнями нестационарних характеристик течії у відсіку "ступінь - патрубок" встановлено:

- модель відсіку адекватно відображує нестационарні інтегральні і локальні характеристики системи; є ефективним інструментом для прогнозу параметрів автоколивань у дифузорах і діапазона режимів їх існування;
- биття в автоколиваннях течії характерні для дифузорів з малим кутом дотичної вхідної ділянки зовнішньої оболонки; частота биття слабо залежить від режиму, а визначається коловим перепадом тиску у надбандажній струмині;
- амплітуди перших гармонік обертальної і пульсаційної складових сили на лопатці порівняні за величиною.

Одержано наближену формулу для спектру комбінаційних частот збурюючих сил на робочих лопатках в залежності від частоти автоколивань, яка дозволяє прогнозувати вібронапружений стан робочих лопаток.

Запропоновано заходи, спрямовані на зниження вібронавантаженості робочих лопаток останніх ступенів на навантажених режимах.

Основні публікації по роботі

1. Беловол А. В., Гнесин В. И., Солодов В. Г. Математическое моделирование течения газа в камерах отбора турбомашин. Харьков: ИПМаш АН УССР, 1990. Препринт № 322. - 37 с.
2. Беловол А. В., Гнесин В. И., Солодов В. Г. Исследование неравномерности параметров течения в камерах отбора турбомашин. - Харьков: ИПМаш АН УССР, 1990. Препринт № 338. - 45 с.
3. Беловол А. В., Гнесин В. И., Солодов В. Г. Газодинамика камер отбора

- паровых турбин. - Харьков, ИПМаш АН УССР, 1990. Препринт № 339. - 24 с.
4. Беловол А. В., Гнесин В. И., Солодов В. Г. Математическое моделирование течений газа в камерах отбора турбомашин // Теплоэнергетика. - 1990, № 11. - С. 81-86.
 5. Беловол А. В., Гнесин В. И., Солодов В. Г. Влияние закрутки потока и формы патрубков на течение в камере отбора теплофикационной турбины // Пробл. машиностроения. - 1991, вып. 35. - С. 73-77.
 6. Беловол А. В., Гнесин В. И., Солодов В. Г. Моделирование пространственного течения в трактах отбора и выхлопных системах турбомашин. - В кн.: Использование численных методов при решении прикладных задач аэромеханики.: Научн. тр. респ. конф. Харьков, ХАИ, 1991, С. 243-246.
 7. Богод А. Б., Гнесин В. И., Гуревич Ю. Г., Солодов В. Г. и др. Численное моделирование течений в элементах турбомашин. - Материалы VII Всесоюзного съезда по теоретической и прикладной механике, (Москва, 15-21 авг. 1991 г.). М., МГУ: 1991, С. 51-52.
 8. Галацан В. Н., Пястик Д. Н., Солодов В. Г. Пространственная структура течения во входном устройстве и ее влияние на нестационарные характеристики первой ступени турбины. - В кн.: Аэроупругость турбомашин: Материалы XIII Всесоюзн. конф. (Севастополь, 26-30 мая 1991 г.), Труды ШИАМ, № 1924, 1991, С. 36-37.
 9. Гнесин В. И., Соколовский Г. А., Солодов В. Г. Многомерная разностная схема 3-го порядка точности для сквозного счета уравнений газодинамики // Проблемы машиностр. - 1979, вып. 9. - С. 99-102.
 10. Гнесин В. И., Соколовский Г. А., Солодов В. Г. Численное решение уравнений газодинамики турбомашин // В кн.: Расчет смешанных течений в решетках турбомашин. Киев: Наук. думка, гл. II, 1981. - С. 46-70.
 11. Гнесин В. И., Соколовский Г. А., Солодов В. Г. Трехмерный поток газа через лопаточный венец осевой турбины // В кн.: Расчет смешанных течений в решетках турбомашин. - Киев: Наук. думка, гл. V, 1981. - С. 113-148.
 12. Гнесин В. И., Соколовский Г. А., Солодов В. Г. Численное решение прямой задачи о трехмерном течении идеального газа в лопаточном аппарате мощной турбины // *Strojnický Casopis*, vol. 32, № 1, 1981. - p. 7-21.
 13. Гнесин В. И., Солодов В. Г. Математическое моделирование пространственного течения в двухступенчатой турбине с промежуточным отбором. // In: *Steam Turbines of Large Output: Proc. of IX Int. Conf. (Karlovy Vary, Nov. 28-30, 1989) Prague, 1989, part II.* - P. 174-178.
 14. Гнесин В. И., Солодов В. Г. Влияние неоднородности потока в камере отбора и в выхлопном патрубке на нестационарные характерис-

- тики турбинной ступени //Теплоэнергетика. -1988, № 4. -С.22-26.
15. Гнесин В.И., Солодов В.Г. Расчет вторичных течений невязкого газа в пространственных решетках турбомашин // Пробл. машиностр. - 1983, вып. 19. - С.91-95.
16. Гнесин В.И., Солодов В.Г. Численное исследование нестационарных характеристик турбинных ступеней, аэродинамически взаимодействующих с камерой отбора //Изв. вузов СССР. Энергетика, 1989, №10. -С. 93-97.
17. Гнесин В.И., Солодов В.Г. Численное моделирование аэродинамического взаимодействия двух турбинных ступеней с промежуточным отбором рабочего тела. - В кн.: Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов, Куйбышев: Куйбышевский авиационный ин-т, 1989. - С.25-32.
18. Гнесин В.И., Пясик Д.Н., Солодов В.Г. Численное исследование переменных аэродинамических сил на лопатках околоотборных ступеней мощных теплофикационных турбин. - В кн.: Проблемы прикладной аэромеханики., Харьков: ХАИ, 1988. С. 3-8.
19. Солодов В.Г. Численное моделирование нестационарного пространственного течения рабочего тела во входных патрубках турбин. - //Проблемы машиностроения, 1993, вып. 39. -С.73-80.
20. Солодов В.Г. Численное моделирование трехмерного нестационарного течения идеального газа через выхлопной патрубок турбомашин //Проблемы машиностроения, 1994, вып. 40.,113-119с.
21. Солодов В.Г. Математическое моделирование пространственного течения газа в трактах отбора и выхлопных системах турбомашин. - В кн.: "Вопросы повышения эффективности судовых технических средств".Тез. докл. рег. конф.(Владивосток,30-31 окт.1990г). -С.48-49.
22. Солодов В.Г. Неустойчивые и колебательные режимы систем выхлопа паровых турбин. - В кн.: Международная н.-т. конф. "Совершенствование энергетических и транспортных турбоустановок методами математического моделирования, выч. и физ. экспериментов." (Змиев, 26-29 сент. 1994), ИПМаш НАН Украины, ч.1, стр. 14-15.
23. Солодов В.Г. Математическое моделирование аэродинамического взаимодействия турбинной ступени и выхлопного патрубка //Вестник Харьк. автодор. техн. ун-та, 1995, вып.2. -С.46-52.
24. Gnesin V., Solodov V. The Mathematical Simulation of Unsteady 3D Flow through Two-Stage Turbine Section. - In: Engineering Aero-HydroElasticity: Proc. of Int. Conf EAHE (Prague, Dec.5-8, 1989)-Prague, 1989, part II. - P.p. 372-377.
25. Gnesin V., Solodov V. The Mathematical Simulation of Unstea-

- dy 3D Flow through Two-Stage Turbine Section with the Intermediate Extraction of Working Medium.-In: Unsteady Aerodynamics and Aeroelasticity of Turbomachines and Propellers: Proc. of 5th Symp. UAATP (Beijing, Sept. 18-21, 1989), Beijing, PRC - P.p. 459-475.
26. Gnesin V., Solodov V. Turbine Stage Aerodynamical Interaction with Supplying and Rejecting Devices of Flow Path.-Proc. of Int. Symp. on Experimental and Comput. Aerothermodynamics of Internal Flows (ISAIF, Prague, July 12-15, 1993) part II.-P.243-248.
27. Gnesin V., Solodov V. Mathematical Simulation of Unsteady 3D Compressible Flow through Two-Stage Turbine Section with the Intermediate Extraction of a Working Medium.- Abstr. of Proc. 5th Symp. UAATP (Beijing, Sept. 18-23, 1989) Beijing, PRC.-P.p. 56-57.
28. Gnesin V., Solodov V. Numerical Simulation of Oscillatory Instabilities of Turbines Axial-Radial Diffuser Flow.- Book of Abstr. of Proc. 7th Int. Symp. on Unsteady Aerodynamics and Aeroelasticity of Turbomachines (Kyushu, Japan, 25-29 Sept., 1994) 7th ISUAAT, Fukuoka, Japan.- pp. 1-4.
29. Gnesin V., Solodov V. Effect of Spatial Nonstationary Flow Structure in Supplying and Rejecting Devices of Flow Path on Turbine Stage.- Proc. of 5th Int. Conf. of Fluid Mechanics (ICFM5), Cairo, Egypt, Jan 2-5, 1995. Part II, p.p.661-669.
30. Gnesin V., Solodov V. Numerical Simulation of Oscillatory Instabilities of Turbines Axial-Radial Diffuser Flow. - Proc. of the 7th Int. Symp. on Unsteady Aerodynamics and Aeroelasticity of Turbomachines, Kyushu, Japan, 25-29 Sept., 1994 (Ed. Y.Tanida, M.Namba) Elsevier Science B.V., 1995, 14p.
31. Solodov V., Gnesin V. Nonstationary 3D Numerical Model of Last Turbine Stage - Exhaust Hood Aerodynamical Interaction.- Proc. of 1st European Conf. "TURBOMACHINERY - FLUID DYNAMIC AND THERMODYNAMIC ASPECTS", Erlangen, Germany, 1-3, March, 1995, p. 359-373.
32. Solodov V.G. Numerical Simulation of Unstable and Oscillatory Flow Regimes in Steam Turbines Exhaust Systems.- Abstracts of Proc. 3d Int. Congress on Industrial and Applied Mathematics (Regensburg, Germany, 3-7, July, 1995) ICIAM 95, Gamburg, Germany, p. 446.

коловий розподіл параметра у зазорі

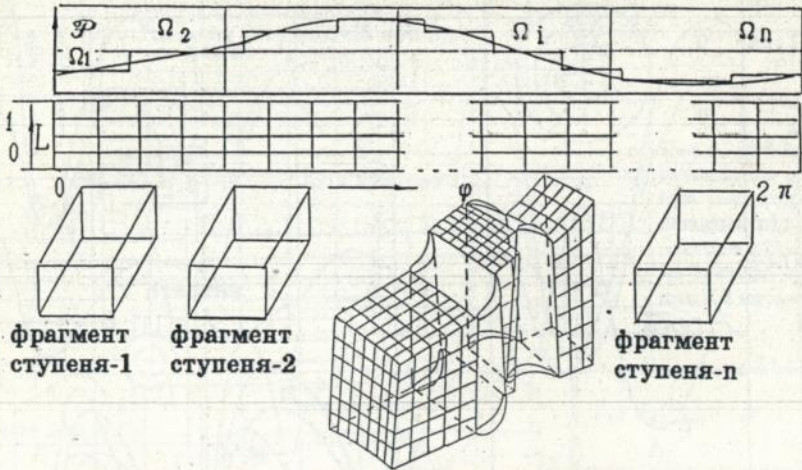


Рис.1 Концепція стику ступеня і пристроя

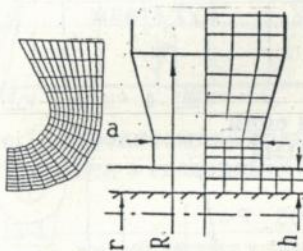


Рис.2. Схема розрахункової області вхідного патрубку

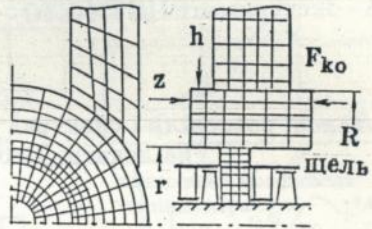


Рис.3. Схема розрахункової області тракта відбору

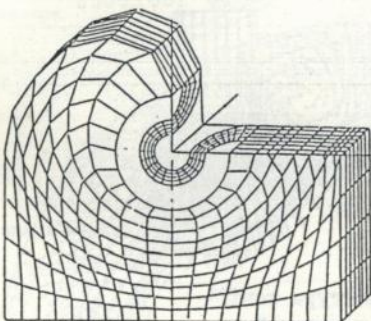
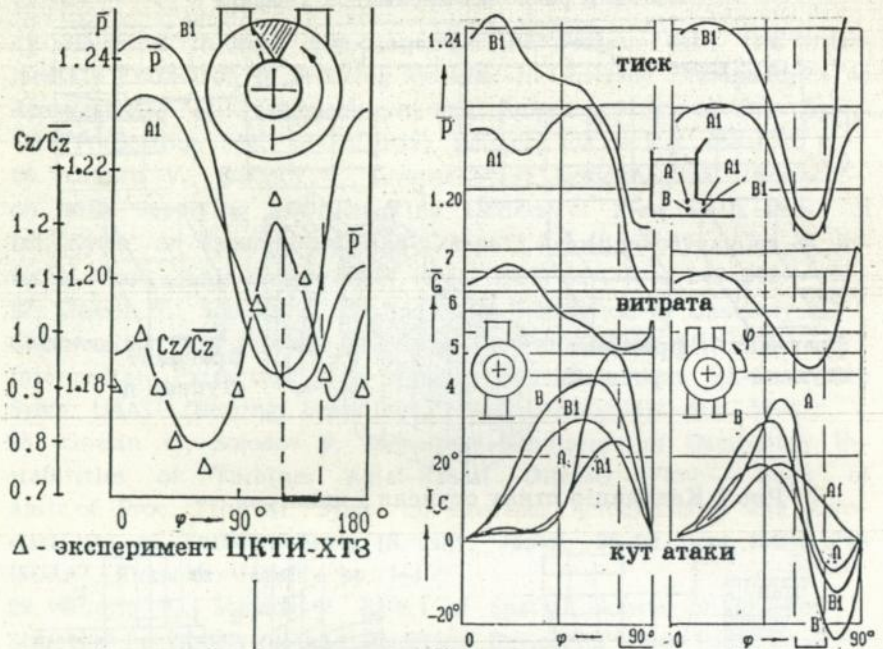
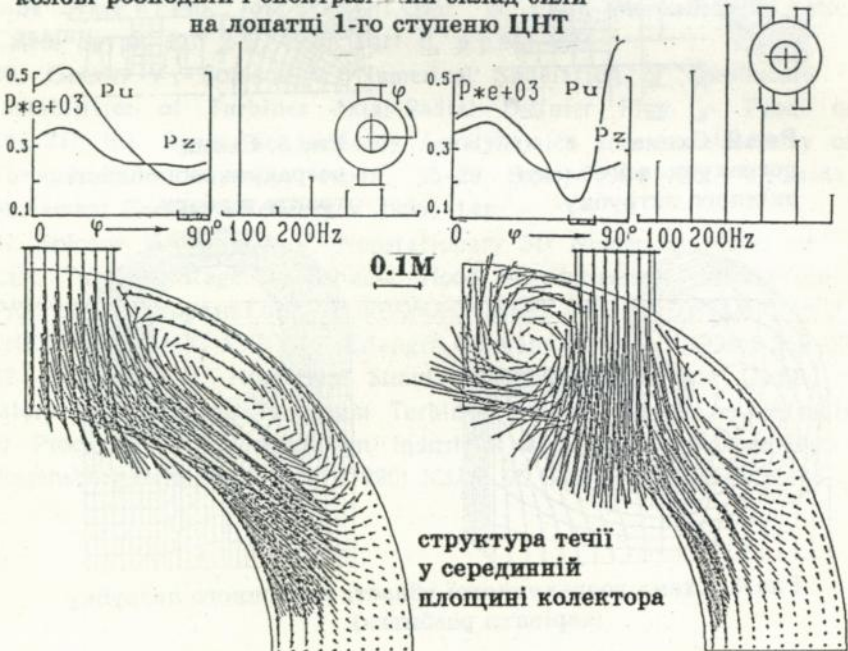


Рис.4. Схема розрахункової області вихлопного патрубку (варіанти розбиття)



кові розподіли і спектральний склад сили на лопатці 1-го ступеню ЦНТ



структура течії у середній площині колектора

Рис.5. Течія в елементах вхідного відсіку



Рис.6. Зміна компонент сили при переході лопатки від сектора підводу до сектора вентиляції і зворотно



Рис.7. Аеродинамика тракту відбору: зіставлення з експериментом ЛПІ

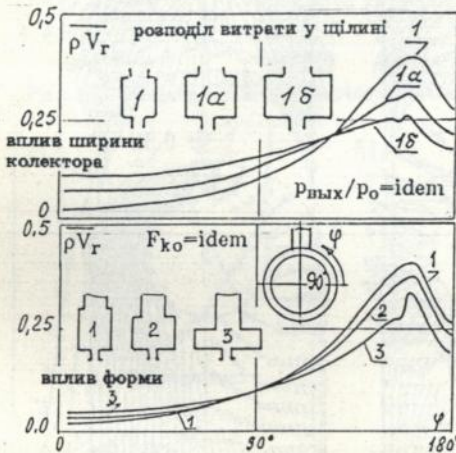


Рис.8.

Вплив геометрії колектора відбору

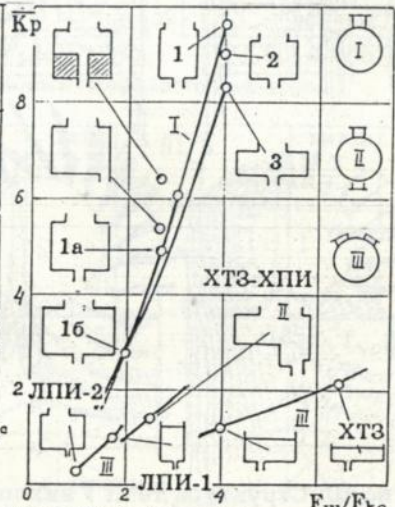


Рис.9. Тривимірний розрахунок і полуемпіричний метод

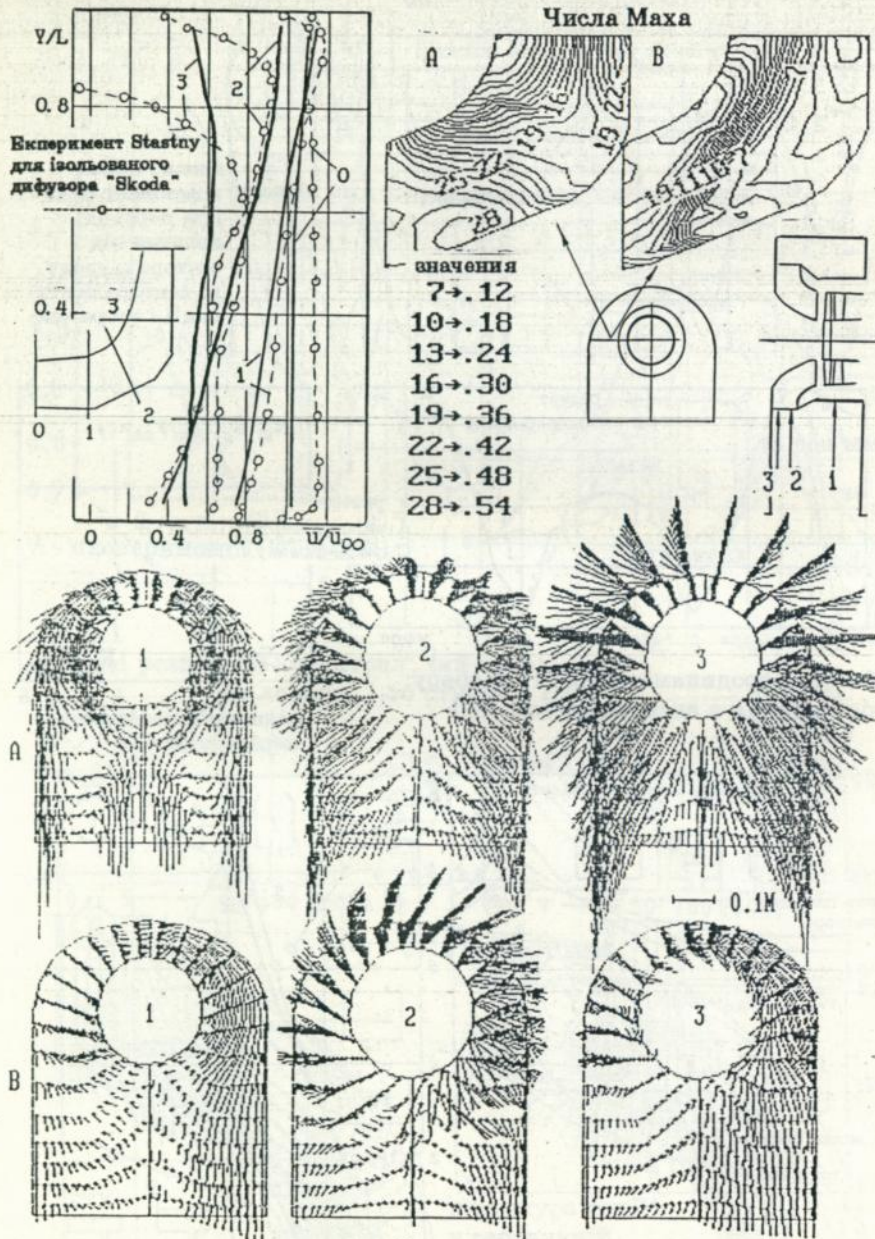


Рис.10. Структура течії у вихлопному патрубку на номінальному(А) та частичному (028GV) режимах відсіку

$$\delta r = (P_c \text{ отбором} - P_{\text{без отбора}}) / P_{0c}$$

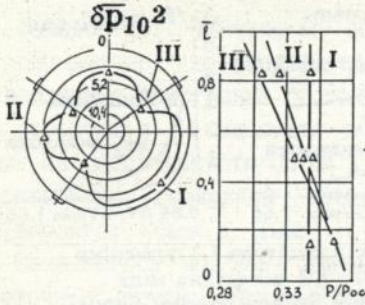
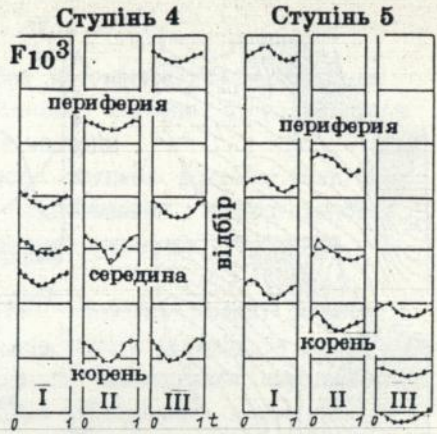


Рис.11.



Розподіли $P_{ст}$ на вході у щілину і у площі зазору

t -час проходження РЛ каналу стагора
Крокові розподіли сили на лопатках до- і післявідбірних ступенів у точках I, II, III

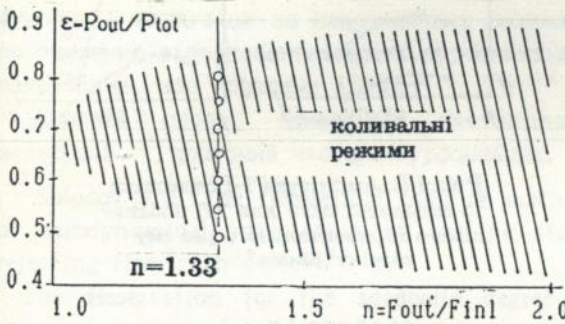


Рис.12. Область стійкості і гістерезис частоти модельного дифузора

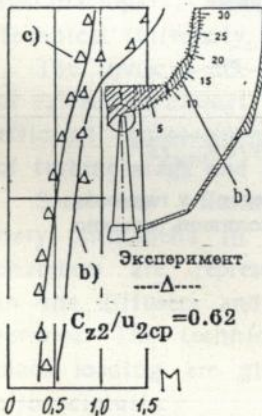


Рис.13. Зіставлення з дослідом Майєра

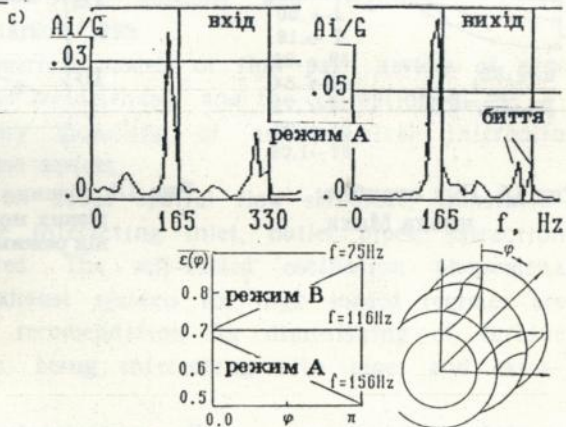


Рис.14. Ефект просторовості: биття втрати; розширення діапазона частот

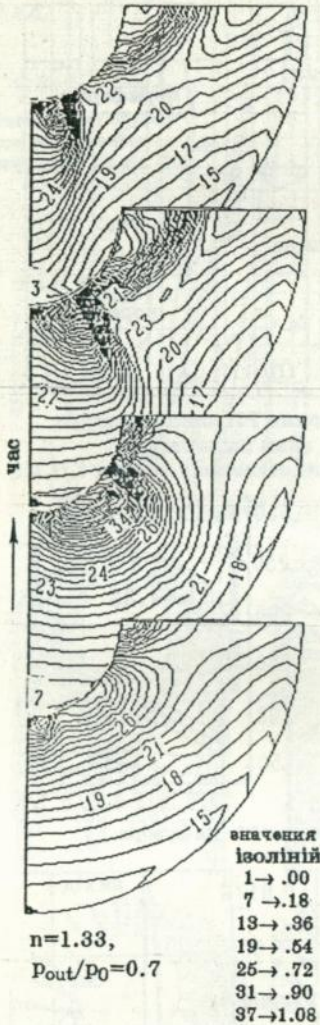


Рис.15. Рух стрибка:
числа Маха

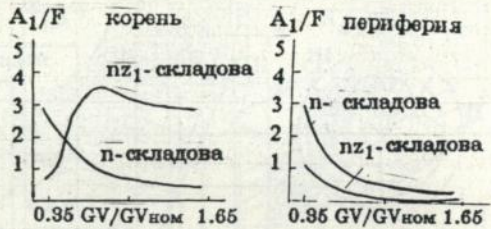


Рис.16. Амплітуда 1-ї гармоніки
НЧ і ВЧ складових сили
на робочій лопатці відсіку "Skoda"

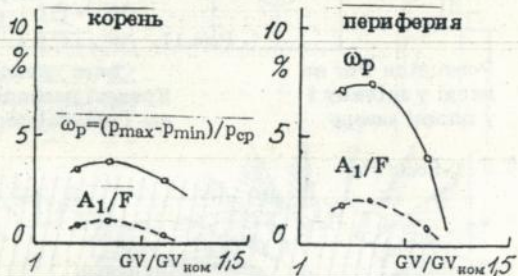


Рис.17. Амплітуда 1-ї гармоніки
р-складової сили для РЛ поблизу
лівого горизонтального роз'єму
відсіку "Skoda"

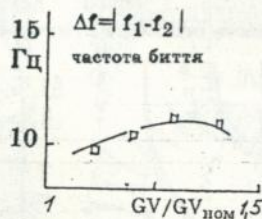


Рис.18. Різниця частот 1-х гармонік
різних мод коливань залежно
від режиму

Солодов В.Г. Теоретичні основи математичного моделювання аеродинамічної взаємодії турбінного ступеня з підводящими і відводящими пристроями проточної частини.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.04.12 - турбомашини і турбоустановки. Харківський державний автомобільно-дорожній технічний університет, Харків, 1995.

Захищаються нев'язкі тривимірні чисельні моделі пристроїв у проточній частині типу патрубка або тракта відбору, а також концепція економічного квазістаціонарного моделювання аеродинамічної взаємодії турбінного ступеня з цими пристроями.

Одержано нові відомості про просторову структуру, нестационарність у вхідних, вихлопних патрубках, камерах відбору, ступенях, взаємодіючих з ними. Виявлено автоколивальні явища у дифузорах і патрубках на навантажених режимах. Видано рекомендації по зниженню вібронавантаженості турбінних лопаток, взаємодіючих з патрубками, або трактами відбору.

Ключові слова: тривимірні нестационарні течії, чисельне моделювання, проточна частина турбомашини, автоколивання.

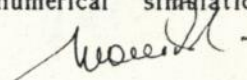
Solodov V.G. The theoretical basis of mathematical modelling of aerodynamical interaction of turbine stage with supplying and rejecting flow path devices.

The dissertation for the academic degree of doctor for technical sciences on the speciality 05.04.12 - turbomachines and turbo-installations. Kharkov State Automobile and Highway Technical University, Kharkov, 1995

The inviscid 3D numerical models of flow path devices of pipe or extraction circuit type are defended, and the conception of the efficient quasi-stationary modelling of aerodynamical interaction of turbine stage and these devices.

Some new information about spatial flow structure, nonstationary phenomena in the interacting inlet, outlet pipes, extraction chambers are represented. The self-excited oscillation phenomena in the diffusers and exhaust systems for high loaded regimes are revealed. The technical recommendation for diminishing of turbine blade loading are given, being interacting with pipes and extraction circuits.

Key words: 3d nonstationary flow, numerical simulation, turbine flow path, self-excited oscillations.



Підп. до друку 25.09.95

Формат А5

папір газетний

надруковано на ризографі

Ум. друк арк. 1,5

Обл.-вид. арк. 1,4

Тир. 40 прим.

Зам. 196

ХДАДТУ, 310078, Харків, ул. Петровського, 25

Харківський державний автомобільно-дорожній
технічний університет, **РВВ**

444043

AB 33.173