

Харківський авіаційний інститут
ім. М.Є.Жуковського

На правах рукопису

Меняйлов Андрій Володимирович

УДОСКОНАЛЕННЯ ДИФУЗОРНИХ КАНАЛІВ
ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК
НА БАЗІ ВИКОРИСТОВУВАННЯ ПРОФЕЛІВ
ІЗ ВІДКОРЕГОВАННОЮ ДИФУЗОРНІСТЮ

05.14.07 - механіка рідини, газу та плазми

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків - 1996

333

AB 36. 395

Дисертація

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00761082 (O)

Роботу виконано на кафедрі проєктування та конструювання
Харківського авіаційного інституту

Науковий керівник - кандидат технічних наук, доцент
Угрюмов Михайло Леонідович

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор
Холявко Володимир Ілліч,
кандидат технічних наук, доцент
Фролов Борис Іванович

Провідна установа - інститут проблем машинобудування
Національної Академії Наук (м. Харків)

Захист відбудеться _____ о ____ годині в ауд. № _____ на
засіданні спеціалізованої вченої ради Д 02.27.04 в Харківському
авіаційному інституті за адресою : 310070, м. Харків, вул. Чкалова, 17.

Пропонуємо взяти участь у обговоренні дисертації та надіслати відгук
на автореферат, засвідчений печаткою установи.

Автореферат розіслано "___" _____ 1996 року.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, доцент

В.Ю. Незим

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРАЦІ.

Актуальність дисертаційної праці витікає з необхідності поліпшення аеродинамічних характеристик лопатевих венців компресора, що працює при високих дозвукових швидкостях на вході. Трансзвукове обтікання звичайних профелів характеризується присутністю місцевих надзвукових зон вздовж поверхні розрідження профіля, які мають внутрішні (висячі) стрибки ущільнення. Спостережливе при цьому зростання втрат пов'язано із втратами у самому стрибку та із втратами, визваними взаємодією прикордонного шару із стрибком. Створення профілів, розрахункове надкритичне обтікання яких не супроводжується появою стрибків ущільнення, вимагало проведення фундаментальних досліджень.

Здобуті в останні часи успіхи у розробці чисельних методів рішення рівнянь обтікання профелів створили сприятливі умови для удосконалення теоретичних методів проєктування (обернена задача аеродинаміки) та дослідження обтікання (пряма задача) трансзвукових профелів. У прямій задачі задаються форма профіля та необхідні кордонні умови, а характеристики течії коло профіля знаходяться із рішенням. У оберненій задачі задається розподіл тиску на профелі, по якому знаходиться форма профіля.

Переконливі результати вивчення надкритичних крилових профелів дають ґрунт для надії, що застосування надкритичних профелів підвищить к.к.д. компресорів, на вході до яких течія характеризується великими дозвуковими відносними числами Маха.

При проєктуванні надкритичних профелів для компресорів важливо мати на поміті, що течія у каналі компресора характеризується рядом ускладнюючих задачу особливостей, не властивих течії коло ізольованого профіля. Цьому методи проєктування та технологія виготовлення крилових профелів можуть виявитися нездатними при розробці лопатевих машин. Так, кордонні умови, які задаються у задачі

розрахунку течії у межлопатевому каналі компресора, більше нагадують кордонні умови для дифузора, аніж для ізольованого профіля. Окрім того, присутність сусідніх лопатей в умовах, коли збурення у трансзвуковому потоці поширюються перпендикулярно напрямку середньої течії, може знизити ефект застосовування надкритичних профелів. Течія у межлопатевому каналі компресора легко підвласна запиранню, виникненню якого може спряти невірно спроектована форма надзвукової частки каналу. Треба також відзначити, що такі особливості течії як тривимірність та нестационарність, а також ефекти, пов'язані із в'язкістю, у межлопатевому каналі компресора можуть виявитися більш істотними, аніж у випадку ізольованого профіля.

Відмінна особливість надкритичного профіля - наявність на його поверхні ділянки, яка забезпечує необхідний розподіл швидкості у зоні надзвукової течії, за якою лежить зона ізоентропійного гальмування струму аж до задньої кромки. Використовування таких профелів дозволяє уникнути не тільки втрат у самих стрибках ущільнення при розрахункових умовах, але також і втрат, обумовлених взаємодією стрибків із прикордонним шаром. Можливість забезпечення надкритичного обтікання профелів без стрибків ущільнення дозволяє збільшити на них навантаження у порівнянні із звичайними профілями, а в наслідок цього, зменшити число лопатей, необхідне для створення заданого ступеню підвищення тиску у компресорі. Це робить необхідним поглиблене вивчення можливостей створення та застосовування надкритичних ґраток профелів.

Дисертаційна праця посвячена проблемі удосконалення дифузorzорних каналів енергетичних установок на базі використання профелів із відкорегованою дифузорністю. У наведеній праці визначення форми профіля по заданому розподілу тиску (швидкості) на ньому здійснюється у ході глобальних ітерацій із змінюванням конту-

ру поза кінцями на малі величини із застосуванням прямого методу розрахунку течії. Вплив прикордонного шару ураховується за допомогою ітераційної процедури, у якій по черзі робиться розрахунок у зоні нев'язкої течії та у зоні прикордонного шару.

Метою дисертаційної праці є розробка та удосконалення метода проєктування дифузорних каналів енергетичних установок на базі використання профелів із вікорегованою дифузорністю.

Для досягнення цієї мети були поставлені та вирішені наступні задачі :

- 1) запропонована модифікація розрахункової схеми обтікання плоскої ґратки профелів струмом ідеального політропного газу, яка дозволяє отримати практично експериментальні значення кута повороту струму у ґратці;
- 2) розроблено метод визначення профільних втрат у наближенні прикордонного шару, який показує добре співпадання розрахункових результатів із порівнюваним методом для тестових прикладів;
- 3) запропоновано алгоритм побудови оптимального (у розумінні профільних втрат у залежності від конкретного місця плоскої ґратки по висоті вінця) розподілу тиску по поверхні профіля ґратки у вигляді шматково-гладких функцій. Показана спроможність зменшення коефіцієнта втрат повного тиску при такому розподілу тиску по поверхні профіля;
- 4) розвинена запропонована науковим керівником формулювка варіаційної оберненої крайової задачі аеродинаміки про змінення контурів у міцній постановці. Поправки до координат поверхні початкового профіля знаходяться у залежності від різниці завданого та наявного розподілу тиску;
- 5) розроблено алгоритм вибору профіля ґратки для попереднього наближення при вирішенні варіаційної оберненої крайової задачі аеродинаміки, середня лінія якого побудована з дуги кола та відрізка пря-

мої лінії, а початковий симетричний профіль має контур у формі поліному 3-го ступеню та клина на виході;

6) розроблено алгоритм глобальних ітерацій для побудови квазірішення варіаційної оберненої крайової задачі аеродинаміки. Вибрано критерії збігання таких глобальних ітерацій та показано їх збігання ;

7) розроблено пакет прикладних програм для рішення варіаційної оберненої крайової задачі аеродинаміки та керуючої програми для використання. Керуюча програма працює у оконному діалоговому режимі та здійснює взаємодію проміж процесами вибору та підготовки файлів входних даних, розрахунку по програмам пакету, відображення, перегляду та передачі вихідної інформації.

Новими науковими наслідками є розробка та реалізація метода проектування дифузорних каналів енергетичних установок на базі використання профелів із відкорегованою дифузорністю шляхом побудови квазірішення оберненої крайової задачі аеродинаміки. У тому числі розроблено пакет прикладних програм, об'єднаний керуючою програмою, який дозволяє у зручному для використання діалоговому режимі вирішити наступні задачі :

- розрахувати обтікання плоскої ґратки профелів струмом ідеального політропного газу із струменевим обтіканням вихідної кромки;
- визначити параметри прикордонного шару на поверхні профіля та знайти втрати повного тиску;
- побудувати оптимальний початковий (для оберненої задачі аеродинаміки) розподіл тиску по поверхні профіля ґратки, який забезпечує зменшення втрат повного тиску у залежності від конкретного місця плоскої ґратки по висоті вінця;
- змінити контур профіля у залежності від різниці завданого (оптимального) та початкового розподілу тиску.

Новими також є наслідки профілювання втулочного та периерій-

ЛІТЕРАТУРА
Л. В. Сторожинський
Л. В. Сторожинський

ного перетинів спрямляючого апарату вентилятора двигуна Д-18ТМ(ТР).

На захист виносяться :

- алгоритм модифікації розрахункової схеми обтікання плоскої ґратки профелів струмом ідеального політропного газу;
- метод визначення профільних втрат у наближенні прикордонного шару;
- алгоритм побудови оптимального (у розумінні профільних втрат у залежності від конкретного місця плоскої ґратки по висоті вінця) розподілу тиску по поверхні профіля ґратки у вигляді шматочно-гладких функцій;
- алгоритм вибору профіля ґратки для попереднього наближення при рішенні варіаційної оберненої крайової задачі аеродинаміки;
- реалізація методу глобальних ітерацій для побудови квазірішення варіаційної оберненої крайової задачі аеродинаміки;
- розробка пакету прикладних програм для рішення варіаційної оберненої крайової задачі аеродинаміки та керуючої програми для користувача;
- розробка та реалізація методу проектування дифузорних каналів енергетичних установок на базі використання профелів із відкорою дифузорністю шляхом побудови квазірішення оберненої крайової задачі аеродинаміки;
- наслідки перепрофілювання контурів плоских ґраток спрямляючого апарату двигуна Д-18ТМ(ТР) у втулочному та периферійному перетинах.

Вірогідність та обґрунтованість основних положень та наслідків дисертаційної праці підтверджуються :

- використанням фундаментальних законів та класичних теоретичних наслідків проведених досліджень при побудові математичних моделей;

- зіставленням наслідків розрахунків :
 - а) із даними експериментальних досліджень плоских ґраток профелів;
 - б) із наслідками розрахунків по порівнюваному методу визначення профільних втрат, яка базується на обробці даних продувок плоских ґраток профелів та прийнята у ЗМКБ "Прогрес" у якості базової при проєктуванні осьових компресорів;
- проведеними методологічними дослідженнями алгоритмів та усього комплексу прикладних програм.

Практична цінність праці.

1. Розроблені та упроваджені у практику проєктування осьових компресорів наступні пакети програм :

- розрахунку координат плоскої ґратки профелів;
- розрахунку течії ідеального політропного газу;
- розрахунку втрат повного тиску;
- побудови оптимального початкового (для оберненої задачі аеродинаміки) розподілу тиску по поверхні профіля ґратки;
- визначення поправок до контуру профіля у залежності від різниці між завданним (оптимальним) та початковим розподілом тиску.

2. Використовування пакету прикладних програм дозволило провести чисельні дослідження течій у плоских ґратках профелів, зіставити їх із експериментальними даними та результатами розрахунків по порівнюваному методу визначення втрат повного тиску.

3. На ґрунті проведених розрахунків запропоновані варіанти перепрофілювання втулочного та периферійного перетинів спрямляючого апарату вентилятора двигутна Д-18ТМ(ТР).

Основи наслідки.

Розроблений пакет прикладних програм для проєктування та удосконалення дифузорних каналів енергетичних установок на базі використання профелів із відкорегованою дифузорністю впроваджено у практику проєктування та доводки осьових компресорів у

Запоріжському машинобудівному конструкторському бюро "Прогрес".

Чисельні дослідження течії у спрямляючому апараті вентилятора двигуна Д-18ТМ(ТР) дозволили запропонувати модифікацію профелів у втулочному та периферійному перетинах.

Основні наукові та прикладні наслідки дисертаційної праці пройшли апробацію на :

- 9-й міжнародній науково-технічній конференції по компресоробудуванню, м. Казань, 1993 р.;
- міжнародній науково-технічній конференції "Удосконалення енергетичних та транспортних турбоустановок методами математичного моделювання, обчислювального та фізичного експериментів", м. Зміїв, 1994 р.;
- на наукових семінарах кафедри прикладної та обчислювальної математики Харківського авіаційного інституту ім. Н.С.Жуковського.

По темі дисертації опубліковано 6 друкованих праць, з них дві доповіді на науково-технічних конференціях та чотири інформаційних аркуша.

Особистий внесок дисертанта у праці, які опубліковані разом із співавторами складається з розробки нових та у подальшому розвитку запропонованих науковим керівником математичних моделей. Дисертант особисто розробив пакет прикладних програм та провів розрахунково-теоретичні дослідження по удосконаленню профілювання плоских ґраток профелів.

Структура та обсяг праці.

Дисертаційна праця складається із вступу, семи розділів, заключення, списку використаних джерел, який включає 54 найменування.

Праця викладена на 134 сторінках машинописного тексту, містить 57 малюнків та 21 таблицю.

ЗМІСТ ПРАЦІ

У вступі обгрунтована актуальність вибраного напрямку праці, сформульована ціль дослідження та дана загальна характеристика праці.

У 1-му розділі наведено огляд стану теорії обернених крайових задач аеродинаміки у наступний час. При побудові рішення ОКЗА у наступний час застосовуються наступні методи :

- а) методи безпосереднього рішення, у яких вирішуються початкові рівняння у невідомих кордонах чи використовуються тейлоровські апроксимації для залежностей, визначаючих функції у залежності від форми профіля (наприклад, метод середньої лінії току);
- б) методи модифікації, які зводяться до рішення оберненої задачі аеродинаміки про зміну контурів. Модифікація контуру профіля здійснюється з використанням інформації про розподіл тиску по початковому контуру та завданому гідродинамічно цілеспрямованому розподілу тиску (ГЦРТ), який наближено по формі до попереднього;
- в) методи модифікації, які зводяться до задач про змінення контурів як послідовність рішення прямих задач. На кожному кроці ітерацій після рішення прямої задачі визначаються нев'язки, інакше відхилення теперішнього розрахункового розподілу тиску від ГЦРТ, та по ним знаходяться поправки до теперішніх значень координат поверхні попередньо взятого профіля;
- г) методи чисельної оптимізації, які спираються на рішення прямих задач.

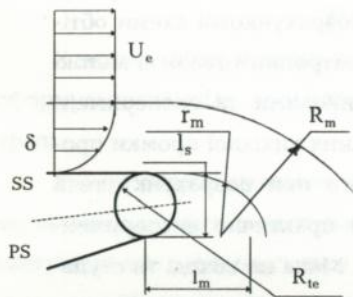
У наведеній праці розглядається постановка варіаційної оберненої крайової задачі аеродинаміки побудови дифузорних ґраток профелів при сталому безвідривному обтіканні струмом ідеального політропно-го газу з урахуванням в'язкості у наближенні прикордонного шару. У алгоритмі отримання квазірішення ОКЗА застосовується метод регуляризації А.Н.Тихонова.

У 2-му розділі розглядена модифікація розрахункової схеми обтікання плоскої ґратки профелів ідеальним політропним газом з метою поліпшення узгодженості проміж розрахунковими та експериментальними даними. Облік струменевого обтікання вихідної кромки профіля у вигляді умови Чаплигіна-Жуковського при розрахунку течії ідеального газу у ґратці дозволяє отримати практично експериментальні значення кута повороту струму, чисел Маха на виході та ступеню підвищення статичного тиску. Постанова умови Чаплигіна-Жуковського на вихідній кромці змінює розподіл швидкості по поверхні профіля тільки в околиці вихідної кромки на відстані максимум 20% хорди профіля. У таблиці 1 наведено порівняння деяких розрахункових та експериментальних параметрів (розрахунок 1 проведено по початковій схемі, а розрахунок 2 - з обліком струменевого обтікання вихідної кромки) для двох плоских ґраток.

Таблиця 1

Параметр	ґратка №1			ґратка №2		
	Експ.	Розр.1	Розр.2	Експ.	Розр.1	Розр.2
М вх	0,63	0,63	0,63	0,64	0,64	0,64
i , град.	2,5	2,5	2,5	-2,5	-2,5	-2,5
$\Delta\alpha$, град.	13,0	13,1	14,4	35,0	33,7	35,0
P2/P1	1,0900	1,0615	1,0663	1,1420	1,1140	1,1120
М вих	0,5000	0,5528	0,5541	0,4500	0,4946	0,4978

У розділі 3 поставлено мету визначення профільних втрат з обліком взаємодії прикордонних шарів, виникаючих на поверхнях тиску та розрідження, а також визначення кромочних втрат, які є слідством повного вирівнювання полів тиску та швидкості за вихідними кромками ґратки профелів. Розрахунки втрат повного тиску по запропонованому методу дають цілком задовільну точність при зіставленні з експериментальними даними, а також із результатами розрахунків по порівнюваному методу.



Мал. 1. Околиця взаємодії прикордонних течій

- коефіцієнт втрат повного тиску

$$\delta_{\sigma} = \frac{k}{k+1} \cdot \zeta_{te} \cdot \varepsilon(\lambda_{te}) \cdot \lambda_{te}^2;$$

- коефіцієнт кромочних втрат

$$\zeta_{кр} = \zeta_{te} - \zeta_{fr}, \zeta_{fr} = \frac{2 \cdot \delta_{ГН}^{**}}{t \cdot \cos(\alpha_{te}) - 2 \cdot R_{te} - \delta_{ГН}^{**}};$$

$$\delta_{te}^{**} = \delta_c^{**} \cdot \left(\frac{U_c}{U_{te}}\right)^{(H_c+2)}, H_c = \frac{\delta_c^{**} + H_{te}}{2 \delta_c^{**}}, \delta_{te}^{**} = H_{te} \cdot \delta_{te}^{**},$$

$$\delta_{ГН}^{**} = \delta_s^{**} \cdot (U_{me} / U_{te})^{(H_{cs}+2)} + \delta_p^{**} \cdot (U_{me} / U_{te})^{(H_{cp}+2)}$$

$$H_{cs} = (H_s + H_{te}) / 2, H_{cp} = (H_p + H_{te}) / 2, \delta_{ГН}^{**} = H_{te} \cdot \delta_{ГН}^{**}$$

На мал. 2 зображені експериментальні значення коефіцієнта втрат повного тиску, коефіцієнти втрат повного тиску, отримані по викладеному методу та коефіцієнти втрат повного тиску, розраховані по прийнятому у ЗМКБ "Прогрес" методу, для двох плоских ґраток при числах Маха на вході $M_{ВХ}=0,6$ та $M_{ВХ}=0,7$. Для обох розглянутих ґраток мається добре узгодження проміж розрахунками по викладеному методу та по методу, який використовується у ЗМКБ "Прогрес", у районі оптимальних кутів атаки. При цьому похибка розрахунку втрат повного тиску у крапці мінімуму втрат складає :

- для ґратки А +4,4% ($M_{ВХ}=0,6$) та +1,4% ($M_{ВХ}=0,7$) (див. мал. 2, а);

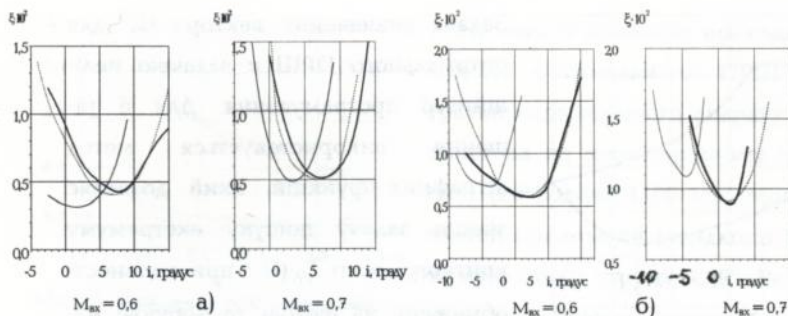
- для ґратки Б -5,2% ($M_{ВХ}=0,6$) та 0,0% ($M_{ВХ}=0,7$) (див. мал. 2, б),

при зіставленні розрахункових методів.

У відповідності із прийнятою схемою взаємодії прикордонних течій (див. мал. 1) при припущенні про малий розмір неоднорідності струму коефіцієнти втрат розраховуються по формулам :

- коефіцієнт втрат кінетичної енергії

$$\zeta_{te} = \frac{2 \cdot \delta_{te}^{**}}{t \cdot \cos \alpha_{te} - \delta_{te}^{**}};$$



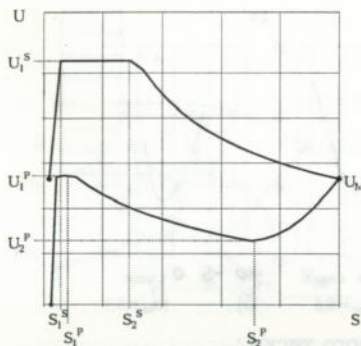
Мал. 2. Коефіцієнт втрат повного тиску :

— експеримент; метод ЗМКБ "Прогрес"; — запроп. метод

Метод може використовуватися для визначення коефіцієнта втрат повного тиску з достатньою точністю при кутах атаки, які знаходяться у районі оптимальних значень ± 5 градусів.

У розділі 4 описно побудову оптимального початкового (для рішення оберненої задачі аеродинаміки) розподілу швидкості у класі параметрично завданих шматочно-гладких функцій у залежності від безрозмірної дугової абсциси для кожної із поверхонь профіля окремо. Під "оптимальним" мають на думці такий розподіл швидкості, який у залежності від розташування перетину по висоті вінця, має найбільш сприятливу характеристику - мінімум профільних втрат для профелів у центральній частині вінця чи мінімум перепаду тиску (швидкості) впоперек межлопатевого каналу для перетинів у торцової стінки.

Схема завданого ПРШ, який забезпечує мінімум профільних втрат, зображено на мал. 3. Оптимальне ПРШ шукаємо у класі параметрично завданих шматочно-гладких функцій $U_1(S)$ у залежності від безрозмірної дугової абсциси $S = S/S_m$ (S_m - довжина дуги від вхідної до вихідної кромки) для кожної із поверхонь профіля окремо.

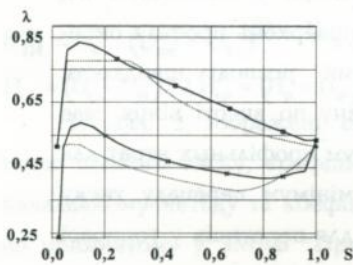


Мал. 3. Схема початкового розподілу швидкості

Задача визначення вектора U_1^0 для оптимального ПРШ є задачею нелінійного програмування. Для її рішення використовується метод штрафних функцій, який дозволяє звести задачу пошуку екстремуму критерію якості $\zeta_w(U_1)$ при наявності обмежень на фазові та керуючі параметри до задачі без обмежень для допоміжної функції. Для забезпечення єдиного та стійкого рішення задачі нелінійного програмування при визначенні вектора U_1^0 зкористуємося методом регуляризації для цільової функції у вигляді :

$$M_{\beta} [U_1 (U_1^0, s)] = \zeta_w [U_1 (U_1^0, s)] + \frac{1}{\beta} G (U_1^0, \Phi^0)$$

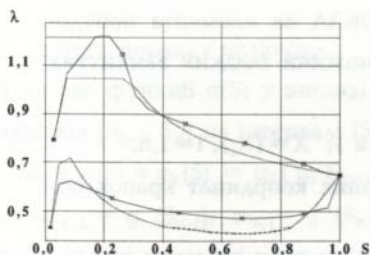
де $\{\beta\}$ - спадаюча послідовність позитивних чисел : $\beta \rightarrow 0$.



Мал. 4. Розподіл приведеної швидкості по поверхні профелів
 ————— початковий профіль;
 оптимальний ПРШ

На мал. 4 показано приклад побудови оптимального ПРШ для ґратки спрямляючого апарату вентилятора двигуна Д-18ТМ(ТР) на втулочному перетині (на радіусі 687 мм) при відносній приведеній швидкості 0,605 та куті входу струму 48,9°. Оптимальний розподіл швидкості дозволяє зменшити втрати повного тиску з $0,3535 \cdot 10^{-2}$ у початковій ґратці, до $0,3293 \cdot 10^{-2}$ у ґратці,

яка може мати знайдене ПРШ. Це дозволить зменшити коефіцієнт втрат повного тиску на 7,3%.



Мал. 5. Розподіл приведеної швидкості по поверхні профелів :
 ————— початковий профіль;
 ————— оптимальний ПРШ

ні розрідження початкового профіля на відстані 0,536 довжини дуги від носика (у районі розрахункового положення стрибка ущільнення). Оптимальний розподіл швидкості дозволяє зменшити втрати повного тиску із достатньо високого рівня $2,5832 \cdot 10^{-2}$, у початковій ґратці, до $0,2647 \cdot 10^{-2}$ у ґратці, яка може мати знайдений ПРШ. Запропонований алгоритм винаходу оптимального (у розумінні коефіцієнту втрат повного тиску) розподілу швидкості реалізовано у вигляді пакету прикладних програм, який дозволяє у оконному діалоговому режимі побудувати ПРШ для рішення оберненої задачі газодинаміки із використанням умови незмінності формпараметра прикордонного шару у якості критерію безвідривності. Це дозволяє отримати відповідний розподіл швидкості у явному вигляді.

5-й розділ посвячено розгляду питання формулювання та рішення оберненої задачі теорії ґраток як задачі модифікації форми середньої частини деякого попередньо взятого профіля. У фундамент викладок положені припущення :

- деформації контурів профіля є малими;
- корекція профіля виконується поза його кінцями;
- знайдений профіль забезпечує завдану циркуляцію швидкості, яка співпадає із циркуляцією попереднього профіля.

На мал. 5 показано приклад побудови оптимального ПРШ для ґратки спрямляючого апарату вентилятора на периферійному перетині (на радіусі 1100 мм) при відносній приведеній швидкості 0,813 та куті входу струму $48,9^\circ$. Результати розрахунку параметрів прикордонного шару показують присутність відриву струму по поверх-

Запровадимо поняття квазірішення ОКЗА як елемента побудованого спеціальним чином компактної множини гладких замкнутих простих контурів (множини коректності) :

$$D_{2n} = \{ X \in R_X^{2n}; r_j(X) \leq \Delta_j < \infty, j=1, k \}; X = \{X_i\}, i=1, n,$$

де $X_i = (X_i, Y_i)^{S,P}$ - множина пар безрозмірних координат крапок обводів профіля у площині (x, y) ;

$r_j(X) \leq \Delta_j$ - обмеження, які дозволяють додержувати умови розрахованості та контруктивної здійсненності.

Пошук квазірішення ОКЗА дозволяє звести в цілому некоректну обернену задачу до умовно коректної. Знаходження квазірішення зведемо до пошуку функції δX , яка визначає мінімум функціоналу :

$$\rho_{\pi}(P, P_1) = \rho_{\pi}(P_0 + A_h(\delta X), P_1) = f_e[\delta X], \Delta e$$

$$\delta \dot{X} = \arg \min_{\delta X} \left\{ f_e[\delta X] \delta X = X - X_0, X \in D_{2n}^{\pi} \right\}.$$

Для забезпечення єдиного та стійкого рішення варіаційної задачі використовуємо метод регуляризації А.Н. Тихонова. Завдамо послідовність $\{\beta_k\}$ спадаючих позитивних чисел : $\beta_k \rightarrow 0$. Тоді для заданої точності $\epsilon > 0$ буде існувати параметр $\beta(\epsilon)$ та відповідний йому елемент $\delta X(\beta)$, який мінімізує функціонал

$M_{\beta}[\delta X] = f_e[\delta X] + \beta \Omega[\delta X]$, де $\Omega[\delta X]$ - стабілізуючий функціонал, а β - параметр регуляризації. Міцна постановка при рішенні варіаційної оберненої крайової задачі аеродинаміки дозволяє запобігти необхідності у спеціальних методах сглажування та асимптотичного зрощування, що значно спрощує реалізацію алгоритму та пошвидшує збіг пошуку рішення.

Рішення задачі знаходилося у класі двічі гладких функцій у вигляді кубічного інтерполяційного сплайну $\delta^*(S) = g(S)$, який забезпечує :

1) безперервність функції $g(S) \in C^2(S_{LE}, S_{TE})$ разом із своїми похідними

до другого порядку включно;

2) вигляд функції $g(S)$ у вигляді кубічного многочлену на кожному із відрізків $[S_{k-1}, S_k]$ на інтервалі $[S_{LE}, S_{TE}]$:

$$\delta^*(S) = g(S) \equiv g_k(S) = g_k(S, S_{k-1}, \delta^*_{k-1}, m_{k-1}, m_k), \quad k = 1, n,$$

де $m_{k-1} = g''(S_{k-1})$, $m_k = g''(S_k)$;

3) однородні кордонні умови $g(S_{LE}) = g'(S_{LE}) = g(S_{TE}) = g'(S_{TE}) = 0$.

Проведені тестові розрахунки для плоских ґраток профелів у різноманітних умовах обтікання струмом ідеального політропного газу дозволяє зробити наступні висновки :

- для до- і трансзвукового режиму течії рішення варіаційної ОКЗА у вигляді поправок до координат початкового профіля стійке до відносно малих варіацій входних даних та дозволяє отримати модифікований профіль із завданням обмеженнями на розмір максимального змінення координат;
- розрахунок течії ідеального газу у ґратці модифікованих профелів показує на змінення розподілу швидкостей по його контуру у бік завданого оптимального розподілу швидкості;
- розрахунок втрат повного тиску на виході із ґратки модифікованих профелів дає зменшити його значення у співвідставі з початковими профілями;
- необхідно кілька глобальних ітерацій з корекцією контура профіля для досягнення оптимального початкового розподілу швидкості.

Пошук квазірішення ОКЗА, який описано у розділі 5, базується на рішенні задачі про змінення контурів типа "нев'язка-поправка", який базується на рішенні прямих задач. Особисту увагу у такому випадку треба приділяти вибору попереднього профіля (який може відрізнятися від початкового) для його модифікації. Коли характеристики такого профіля (наприклад, кут повороту струму, циркуляція швидкості, розподіл тиску по поверхнях, втрати повного тиску) будуть

мати тенденцію наближення до оптимального ПРТ (ПРШ), то це дозволить суттєво знизити час пошуку квазірішення ОКЗА вказаним методом. Рішенню цієї проблеми присвячено розділ 6.

У наведеній праці при побудові дозвучового профіля застосована середня лінія у вигляді дуги кола та відрізка прямої лінії на виході. Початковий симетричний профіль має контур у формі поліному 3-го ступеня на вході та клиновидної частки на виході. Він зображений на мал. 6.

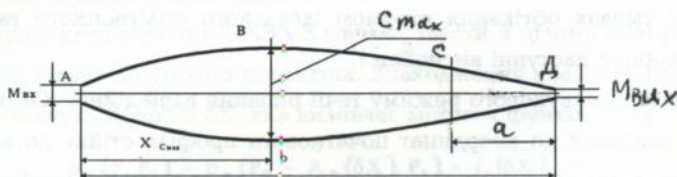
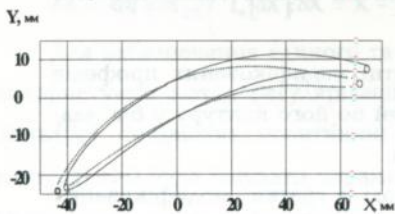


Рис. 6. Початковий симетричний профіль



Мал. 7. Початковий профіль (А) та новий тип профілю (Б):
 — А; - - - - - Б

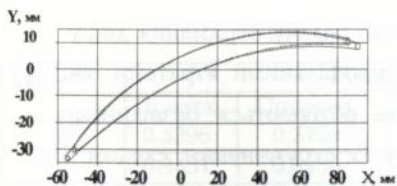
На мал. 7 наведені початковий (А) та новий (Б) профілі у втулочному перетині спрямляючого апарату вентилятора Д-18ТМ(ТР), які побудовані на однакові геометричні параметри. Розрахунки коефіцієнта втрат повного тиску по параметрам прикордонного шару на виході із ґратки да-

ють наступні значення :

- для ґратки із початкових профелів (А) - $0,5396 \cdot 10^{-2}$;
- для ґратки із нових профелів (Б) - $0,3738 \cdot 10^{-2}$.

При цьому значення безрозмірної циркуляції швидкості та кута виходу струму складають відповідно :

- для ґратки із початкових профелів - 0,3451 та $95,31^\circ$,
- для ґратки із нових профелів - 0,3456 та $96,21^\circ$.



Мал. 8. Початковий профіль (А) та новий тип профілю (Б):
 — А; - - - - - Б

На мал. 8 наведені початковий (А) та новий (Б) профілі у периферійному перетині спрямляючого апарату вентилятора Д-18ТМ(ТР), які побудовані на однакові геометричні параметри. Розрахунки коефіцієнту втрат повного тиску

по параметрам прикордонного шару на виході із ґратки дають наступні значення :

- для ґратки із профелів А - $4,6337 \cdot 10^{-2}$;

- для ґратки із профелів Б - $0,3349 \cdot 10^{-2}$;

при значеннях безрозмірної циркуляції швидкості та кута виходу струму, рівних відповідно :

- для ґратки із профелів А - 0,4523 та $94,36^\circ$,

- для ґратки із профелів Б - 0,4438 та $94,21^\circ$.

Таким чином новий профіль (Б) забезпечує безвідривне обтікання при тому ж куті виходу струму, що і початковий профіль (А), та має на 1,9% менше значення безрозмірної циркуляції швидкості. Втрати повного тиску у ґратці із профелів Б більш аніж на порядок менші, аніж у ґратці із профелів А внаслідок ліквідації відриву прикордонного шару.

Biggla 7 присвячено організації ітераційного процесу, у якому використовується інформація про ґратку прототип γ_0 та попередньо взятий контур γ_0' . На кожному L-кроці глобальних ітерацій після рішення прямої задачі змінюється геометрія контуру профіля з метою наближення розрахункового розподілу тиску $P_L(S)$ до завданого оптимального ПРТ $\hat{P}_1(S)$. ГЦРТ при цьому знаходилося у фіксованому класі коректних розподілів, які забезпечують умови розрахованості та конструктивної здійсненності. На прикладі спрямляючого апарату

вентилятора двигуна Д-18ТМ(ТР) розглянемо задачу отримання дифузійної ґратки профелів із мінімальними профільними втратами, які мають завданий кут повороту струму та обтікаються безвідривно плоским сталим струмом ідеального газу із струменевим сходом з кромки кінцевої товщини при великих числах Рейнольдса.

ґратка-прототип втулочного перетину знаходиться у плоскому перетині на радіусі $R=687$ мм. У якості попередньо взятого профіля для пошуку рішення оберненої задачі взято профіль, побудова якого описана у розділі 6. Для цього профіля кути згибу та наставлення підібрано так, щоб забезпечити кут виходу струму та значення безрозмірної циркуляції швидкості рівні відповідним величинам для початкового профіля при відносній приведеній швидкості струму 0,613 та куті входу струму $49,8^\circ$ ($i=0,5^\circ$).

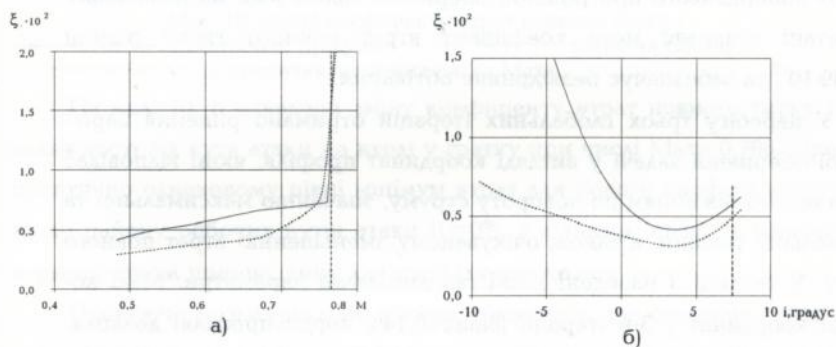
Оптимальний розподіл швидкості дозволяє зменшити втрати повного тиску з $0,5396 \cdot 10^{-2}$, у початковій ґратці, до $0,3614 \cdot 10^{-2}$ у ґратці, яка може мати винайдений ПРШ, що відповідає зменшенню коефіцієнту втрат повного тиску на 49,3%. Побудова нового профіля у якості попереднього при рішенні оберненої задачі вже на початковому етапі дозволяє мати коефіцієнт втрат повного тиску рівний $0,3738 \cdot 10^{-2}$, т.ч. необхідно ще на 3,4% зменшити втрати повного тиску, щоб наблизитися до оптимального розподілу швидкостей по контуру профіля.

У перебігу трьох глобальних ітерацій отриманно рішення варіаційної оберненої задачі у вигляді координат профіля, який відповідає завданним обмеженням по повороту струму, значенню максимальної та мінімальної товщин, а також очікуваному зменшенню втрат повного тиску. У таблиці 2 наведено деякі газодинамічні параметри, а малі значення поправок до координат у 3-й ітерації ($\delta_{\max} < 0,16\%$ хорди профіля) дозволяють зробити висновок, що досягнуто збігу глобальних ітерацій.

Таблиця 2

Парам.	Профіль гратки				
	Початк.	Поперед.	Модиф. 1	Модиф. 2	Модиф. 3
$\xi \cdot 10^2$	0,5396	0,3768	0,3689	0,3671	0,3665
Γ	0,3451	0,3456	0,3525	0,3525	0,3532
β , град.	95,310	96,205	96,484	96,575	96,831

На мал. 9, а зображено зміну значення коефіцієнту втрат повного тиску у залежності від числа Маха на вході у гратку при куті атаки $0,5^\circ$. На цьому ж малюнку наведено критичне значення числа Маха, знайдене по прийнятому у ЗМКБ "Прогрес" методу. При робочому числі Маха на вході (рівному 0,578), а також аж до режиму запирання новий профіль забезпечує більш низькі втрати, аніж профіль-прототип.



Мал. 9. Зміна коефіцієнту втрат повного тиску :

————— початковий профіль; рішення ОКЗА;

----- критичне значення числа Маха та зривний кут атаки

На мал. 9, б наведено зміну коефіцієнта втрат повного тиску у залежності від кута атаки на вході у гратку при числі Маха 0,578. У всьому діапазоні наведених кутів атаки новий профіль має більш низькі втрати та менш стрімку зміну коефіцієнту втрат повного тиску, аніж профіль-прототип.

Гратка-прототип периферійного перетину знаходиться у плоскому перетині на радіусі $R=1100$ мм. У якості попередньо взятого профіля для пошуку рішення оберненої задачі взято профіль, побудова якого дана у розділі 6.

Розрахунки течії ідеального газу у плоских гратках проведені при відносній приведеній швидкості струму 0,812 та куті входу струму $48,9^\circ$ ($i=0,0^\circ$).

Профіль-прототип обтікається з відривом струму по спинці у крапці із відносною довжиною дуги 0,4176 та має велику величину коефіцієнта втрат повного тиску - $4,6337 \cdot 10^{-2}$. Оптимальний розподіл швидкості дозволяє зменшити втрати повного тиску до $0,3314 \cdot 10^{-2}$ у гратці, яка може мати винайдений ПРШ. Побудова нового профіля у якості попереднього при рішенні оберненої задачі вже на початковому етапі дозволяє мати коефіцієнт втрат повного тиску рівний $0,3349 \cdot 10^{-2}$ та забезпечує безвідривне обтікання.

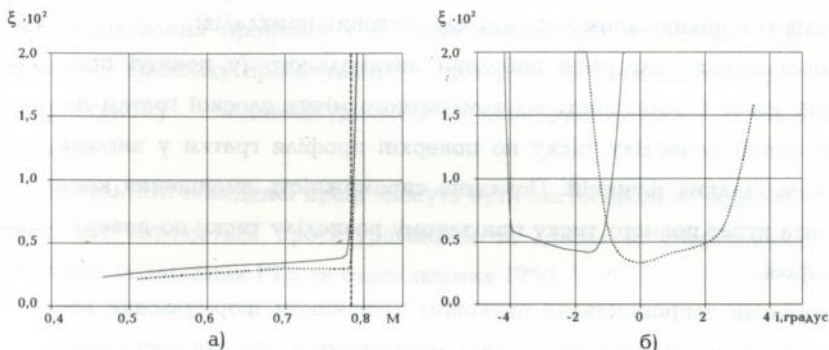
У перебігу трьох глобальних ітерацій отримано рішення варіаційної оберненої задачі у вигляді координат профіля, який відповідає завданням обмеженням по повороту струму, значенню максимальної та мінімальної товщин, а також очікуваному зменшенню втрат повного тиску. У таблиці 3 наведені деякі газодинамічні параметри. Малі корекції координат у 3-й ітерації ($\delta_{\max} < 0,14\%$ хорди профіля) дозволяють зробити висновок, що досягнуто збігу глобальних ітерацій.

Таблиця 3

Парам.	Профіль гратки				
	Початк.	Поперед.	Модиф. 1	Модиф. 2	Модиф. 3
$\xi \cdot 10^4$	4,6637	0,3349	0,3254	0,3229	0,3279
Γ	0,4523	0,4438	0,4454	0,4417	0,4406
β , град.	94,355	94,207	93,511	92,847	92,749

На мал. 10, а зображено зміну значення коефіцієнту втрат повного тиску у залежності від числа Маха на вході у гратку при куті атаки $0,0^\circ$. На цьому ж малюнку наведено критичне значення числа

Маха, знайдене по прийнятому у ЗМКБ "Прогрес" методу. При робочому числі Маха на вході (рівному 0,786), а також аж до режиму запирання новий про-філь забезпечує більш низькі втрати, аніж профіль-прототип.



Мал. 10. Зміна коефіцієнту втрат повного тиску :

————— початковий профіль; рішення ОКЗА;
 - - - - - критичне значення числа Маха

На мал. 10, б наведено зміну коефіцієнту втрат повного тиску у залежності від кута атаки на вході у ґратку при числі Маха 0,786. При практично однаковому рівні мінімум втрат для нового профіля усунуто до району робочих кутів атаки ($i=0^\circ$), а діапазон праці із малими втратми трохи ширше, аніж для профіля-прототипа.

Проведені розрахунки на міність показують, що отримані запаси статичної міцності для вінця із новими профілями у периферійному та втулочному перетинах відповідають запасам міцності надійно працюючих серійних конструкцій газотурбінних двигунів.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Віповідно до мети дисертаційної праці були поставлені та вирішені наступні задачі :

1) запропонована модифікація розрахункової схеми обтікання плоскої ґратки профелів струмом ідеального політропного газу, яка дозво-

ляє отримати практично експериментальні значення кута повороту струму у ґратці;

2) розроблено метод визначення профільних втрат у наближенні прикордонного шару, який показує добре співпадання розрахункових результатів із порівнюваним методом для тестових прикладів;

3) запропоновано алгоритм побудови оптимального (у понятті профільних втрат у залежності від конкретного місця плоскої ґратки по висоті вінця) розподілу тиску по поверхні профіля ґратки у вигляді шматково-гладких функцій. Показана спроможність зменшення коефіцієнта втрат повного тиску при такому розподілу тиску по поверхні профіля;

4) розвинена запропонована науковим керівником формулювка варіаційної оберненої крайової задачі аеродинаміки про змінення контурів у міцній постановці. Поправки до координат поверхні початкового профіля знаходяться у залежності від різниці завданого та наявного розподілу тиску;

5) розроблено алгоритм вибору профіля ґратки для попереднього наближення при вирішенні варіаційної оберненої крайової задачі аеродинаміки, середня лінія якого побудована з дуги кола та відрізка прямої лінії, а початковий симетричний профіль має контур у формі поліному 3-го ступеню та клина на виході;

6) розроблено алгоритм глобальних ітерацій для побудови квазірішення варіаційної оберненої крайової задачі аеродинаміки. Вибрано критерії збігання таких глобальних ітерацій та показано їх збігання;

7) розроблено пакет прикладних програм для рішення варіаційної оберненої крайової задачі аеродинаміки та керуючої програми для використання. Керуюча програма працює у оконному діалоговому режимі та здійснює взаємодію проміж процесами вибору та підготовки файлів входних даних, розрахунку по програмам пакету, відображення, перегляду та передачі вихідної інформації;

8) розроблені нові профілі у втулочному та периферійному перетинах спрямляючого апарату вентилятора двигуна Д-18ТМ(ТР), які забезпечують необхідні газодинамічні та міцнісні характеристики.

Розроблений пакет прикладних програм для проектування та удосконалення дифузорних каналів енергетичних установок на базі використання профелів з відкорегованою дифузорністю упроваджено у практику проектування та доводки осьових компресорів у Запорізьському машинобудівному конструкторському бюро "Прогрес".

Результати наведеної праці можуть бути застосовані на підприємствах, які займаються проектуванням та доводкою енергетичних установок (авіаційних ГТД та стаціонарних ГТУ).

Основний зміст дисертації опубліковано у працях :

- 1) Белик В.В., Меньшиков В.А., Меньяйлов А.В., Письменный В.И., Скоб Ю.А., Угрюмов М.Л. Результаты расчетно-экспериментальных исследований, направленных на изыскание возможностей повышения экономичности осевых компрессоров // Девятая международная научно-техническая конференция по компрессоростроению : Тез. Докл. - Казань, 1993. - С.72.
- 2) Меньяйлов А.В., Письменный В.И., Скоб Ю.А., Угрюмов М.Л. Пакет прикладных программ для проектирования осевых компрессоров на базе профилей с откорректированной диффузорностью // Международная научно-техническая конференция "Совершенствование энергетических и транспортных турбоустановок методами математического моделирования, вычислительного и физического экспериментов" : Тез. докл. - г. Змиев, 1994. - Ч.1, с. 75.
- 3) Меньяйлов А.В., Угрюмов М.Л. Определение оптимального исходного распределения давления (скорости) // Информационный листок №35-96, Запорожский ЦНТЭИ, 1996.

- 4) Меняйлов А.В., Угрюмов М.Л. Расчет течения идеального газа в плоской решетке со струйным обтеканием выходной кромки // Информационный листок №36-96, Запорожский ЦНТЭИ, 1996.
- 5) Меняйлов А.В., Угрюмов М.Л. Расчет коэффициента профильных потерь // Информационный листок №37-96, Запорожский ЦНТЭИ, 1996.
- 6) Меняйлов А.В., Угрюмов М.Л. Постановка и решение вариационной обратной задачи аэродинамики // Информационный листок №38-96, Запорожский ЦНТЭИ, 1996.

АННОТАЦИЯ

Меняйлов А.В. Совершенствование диффузорных каналов энергетических установок на базе использования профилей с откорректированной диффузорностью.

Диссертация является рукописью, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

05.14.07 - механика жидкости, газа и плазмы, технические науки,

Харьковский авиационный институт, Харьков, 1996.

Защищается 6 работ, которые содержат описания математически корректной постановки и устойчивого численного метода построения квазирешений вариационной обратной задачи аэродинамики. Разработан новый метод оптимизации для проектирования компрессорных решеток профилей с откорректированной диффузорностью, который основан на решении двух задач: обратной задачи теории пограничного слоя с целью получения оптимального распределения давлений, называемого исходным распределением давлений, и гибридной задачи теории решеток с целью получения решетки профилей. Изменение формы профиля при проектировании моделировалось введением толщины вытеснения.

Построение математической модели осуществлено с минимальным количеством управляющих параметров, учитывая формализованное обобщение опыта специалистов о физически обусловленном поведении характеристик решеток профилей. Разработанная методика реализована в виде комплекса программ, использовавшегося для моделирования и проектирования реальных объектов, результаты которых признаны адекватными.

ABSTRACT

Menyaylov A.V. Energetics plants diffusion channels improvement using the Controlled Diffusion Airfoils.

The Dissertation is a manuscript presented on competition academic degree of technical sciences candidate by speciality 05.14.07 - fluid, gas and plasma mechanics.

Kharkov Aviation Institute, Kharkov, 1996.

6 works which are defended contain the descriptions of a mathematical-ly correct statement and steady numerical method for the construction of variational inverse aerodynamics problem quasi-solutions. A new optimization method for the 2D compressor cascade are elaborated to design the controlled-Diffusion Airfoils on the bases of two inverse problems : one an inverse boundary layer problem in order to produce the optimum pressure distribution called the target pressure distribution, and the other hybrid cascade problem in order to obtain the blade section. In the design mode, changes to the blade shape are modeled using a displacement thickness technique. The mathematical method model is developed with minimum number of control parameters taken into account the formalized generalization of the experience on physically caused behavior of compressor cascade characteristics. The methodics developed is realized as complete of computing programs used for the modeling and design of real objects with results that admitted adequate.

КЛЮЧОВІ СЛОВА

Двовимірний аеродинамічний розрахунок, гратка профелів, в'язкість, турбулентний прикордонний шар, коефіцієнт втрат повного тиску, до-, транс- та надзвукові режими.

АВТОРЕФЕРАТ ДИСЕРТАЦІЇ

Підписано до друку 17.12.1996

Формат 60x84 1/16 Папір друк. №1.

Умовн.-друк. арк. 1,0. Облік.-вид. арк. 1,32.

Тираж 70 прим. Замовлення №324. Безкоштовно

Друкарня Запорізького машинобудівного конструкторського

бюро "Прогресс" ім. А.Г.Івченка

330068, Запоріжжя, вул. 8 Березня,15
