

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ

КИЇВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

НЕЧИПОРЕНКО Ірина Володимирівна

**КОНСТРУЮВАННЯ ПРОСТОРОВИХ  
РІЗНИЦЕВИХ СІТОК  
СТОСОВНО ДО РОЗРАХУНКІВ ТЕЧІЙ  
ЧИСЕЛЬНИМИ МЕТОДАМИ**

05.01.01 - Прикладна геометрія, комп'ютерна графіка,  
дизайн та ергономіка

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата технічних наук

Київ - 1996

№ 36.038

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Харківському авіаційному інституті ім. М.Є.Жуковського.

Науковий керівник - кандидат технічних наук, доцент  
*Сафіуліна Кадрія Рашитівна*

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
*Ванін Володимир Володимирович,*

кандидат технічних наук, професор  
*Сідлецька Наталія Іванівна.*

Провідна організація - Харківське державне авіаційне виробниче підприємство (м.Харків).

Захист відбудеться 18 грудня 1996 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.18.06 у Київському державному технічному університеті будівництва та архітектури за адресою:

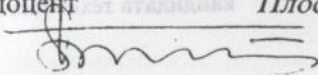
252037 м.Київ - 37, Повітрофлотський просп., 31, ауд.319.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Київського державного технічного університету будівництва та архітектури.

Автореферат розіслано 15 листопада 1996 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої ради Д 01.18.06  
кандидат технічних наук, доцент

*Плоский В.О.*





**Актуальність.** Проблема підвищення економічності та надійності лопаточних апаратів турбомашин потребує удосконалення чисельних та експериментальних методів дослідження течій рідини та газу через плоскі решітки профілів, ступені турбомашин та в просторових каналах складної конфігурації.

Такі особливості рівнянь гідрогазодинаміки як нелінійність, високий порядок (для просторових задач), поява розривних рішень часто приводять до того, що чисельний метод дослідження є найбільш ефективним, а іноді і єдино можливим.

При чисельнім дослідженні будь-яких видів течій рідини або газу широко використовуються різноманітні алгоритми дискретизації розрахункової області, тобто генерації в ній сітки.

Як відзначають провідні вчені в галузі гідрогазодинаміки (Годунов С.К., Флетчер К.), ключовим елементом, який необхідний для одержання ефективних результатів, є гнучка та універсальна техніка формування різницевої сітки.

Складна геометрична конфігурація розрахункової області, надзвичайно складна картина течії, коли в залежності від початкових параметрів потоку та геометрії лопатки, в розрахунковій області спостерігаються явища відриву потоку, зони турбулентності, стрибки ущільнення, утворюються вторинні течії - все це висуває перед дослідниками цілу низку вимог геометричного характеру, що ставляться до різницевої сітки:

- сітка повинна бути пристосованою щодо виконання крайових умов при будь-якій формі меж області;

- для забезпечення необхідної точності рішення рекомендується використання ортогональних сіток на протязі всієї області або принаймі близько її меж;

- вузли та лінії сітки, як правило, повинні загущуватися у визначених місцях, які потребують більш точного чисельного рішення (зони близько меж області, коло передньої та задньої кромки);

- сітки повинні задовольняти умові періодичності в зв'язку з тим, що розрахункова область міжпрофільного каналу періодично повторюється в решітці;

- при побудові просторової різницевої сітки виникають проблеми забезпечення гладкості ліній сітки у третьому напрямку, якщо ці лінії утворюються сполученням відповідних вузлів двовимірних сіток.

- для адаптивних сіток, які динамічно зв'язані з рішенням, основною вимогою є максимальна швидкість зміни сітки водночас з рішенням за допомогою найпростіших алгоритмів.

На жаль, сітки, які використовуються в практиці розрахунків сьогодні, не в повній мірі задовольняють сукупності перелічених вище вимог.

Наприклад, в методі "крупних часток", який був розроблений Ю.М. Давидовим та О.М. Білоцерковським, застосовується прямокутна рівномірна сітка, що не відповідає вимогам пристосованості сітки до будь-якої форми меж області. Крім того геометричні характеристики "дрібних" вічок, які утворюються при перетині сіткою меж області, необхідно кожного разу розраховувати за допомогою окремих алгоритмів.

У широко відомому методі розрахунку течій С.К. Годунова використовуються криволінійні сітки, однак відсутність ортогональності сітки викликає появу похибки у рішенні.

Застосування конформних відображень, так саме, як і розв'язання екстремальної задачі при побудові ортогональних або близьких до них сіток, не дає можливості регулювати розташування вузлів сітки на її межах. Складність алгоритмів конструювання практично виключає їх використання для побудови адаптивних сіток.

Генерація тривимірних сіток в складних просторових областях відбувається, як правило, через сполучення сіток для кількох підобластей з наступним стикуванням або перекриттям сусідніх сіток. Питання побудови єдиної просторової різницевої сітки, яка задовольняє вимогам, про які йшла мова вище, залишається ще недостатньо вивченим.

Вирішення цих проблем навпрямки зв'язане з геометричним моделюванням розрахункової області міжлопаточного каналу та побудовою дискретних сітей в ній.

З огляду на це і були сформульовані мета та задачі даної дисертаційної роботи.

**Мета роботи** полягає в створенні теоретичної та алгоритмічної бази для автоматизованого конструювання тривимірних різницевих сіток стосовно до чисельних методів розрахунків течій в решітках турбомашин.

Для досягнення головної мети досліджень були поставлені наступні **основні задачі** :

- одержати відповідність між фізичними та узагальненими координатами при запровадженні криволінійної системи координат в розрахункових областях турбомашин;

- скласти аналітичні алгоритми генерації різницевих сіток для вирішення задач обтічення ізольованого профілю та решітки профілів;

- автоматизувати формування області міжпрофільного каналу компресорної решітки;
- розробити математичну модель поверхні компресорної лопатки з урахуванням закрутки по висоті;
- провести дослідження неперервності та гладкості отриманої поверхні пера лопатки;
- створити алгоритм побудови тривимірної різницевої сітки відповідно до запропонованої моделі поверхні пера лопатки;
- використати розроблені моделі та алгоритми при розв'язанні реальної прикладної задачі.

**Методика досліджень.** Для вирішення задач, які поставлені в роботі, використовувались методи прикладної, аналітичної, диференційної, обчислювальної геометрії, теорії та розрахунку лопаточних машин, обчислювальної гідрогазодинаміки, методи та засоби машинної графіки.

Теоретичною та інформаційною базою виконаних досліджень були роботи вітчизняних та закордонних фахівців з розглянутої проблеми:

- в галузі *прикладної геометрії* І.І.Котова, Г.С.Іванова, В.Є.Михайленко, М.М.Рижова, А.В.Павлова, О.Л.Підгорного, В.С.Обухової, В.І.Якуніна, П.В.Філіпова та їх послідовників;
- в галузі *обчислювальної геометрії та дискретного геометричного моделювання* С.М.Ковальова, В.М.Найдиша, В.М.Кислоокого, Н.І.Сідлецької та їх учнів, а також А.Фокса, М.Пратта, Дж.Форсайта;
- в галузі *розрахунку течій в турбомашинах та обчислювальної гідрогазодинаміки* С.К.Годунова, О.М.Білоцерковського, Ю.М.Давидова, П.Д.Роуча, Д.Андерсона, Дж.Танехіла, Р.Плетчера, Дж.Томпсона, К.Флетчера та інших;
- з питань *використання машинної графіки як підсистеми САПР, що забезпечує машинне відображення геометричних об'єктів* В.Є.Михайленко, К.О.Сазонова, В.О.Анпілогової, а також закордонних вчених У.Ньюмена, Р.Спрулла, Д.У.Фолі, Д.Роджерса, Дж.Адамса.

**Наукову новизну роботи складають:**

- спосіб генерації ортогональних різницевих сіток за допомогою еквідистантних кривих при розрахунку течій навколо ізолюваного профілю;
- аналітичні алгоритми побудови ортогональних до меж області розрахункових сіток з застосуванням кубічних кривих в формі Ерміта при моделюванні течій в решітках профілів з довільними межовими умовами;
- алгоритм конструювання адаптивних розрахункових сіток із загушенням вузлів в областях максимальних градієнтів параметрів потоку;
- математична модель поверхні пера лопатки компресора з закруткою по висоті та дослідження її гладкості;

– спосіб побудови єдиної просторової сітки з урахуванням виду математичної моделі поверхні пера лопатки, який дозволяє автоматизувати розрахунок координат вузлів та геометричних характеристик вічок.

**Вірогідність та обґрунтованість** одержаних результатів знайшли підтвердження при використанні тестових розрахунків параметрів течії в решітці профілей NASA 65, а також при вирішенні реальної задачі впровадження в практику конструкторського бюро.

**Практична цінність** виконаних досліджень полягає в запропонованих методиках автоматизованого конструювання різницевих сіток та визначенні їх геометричних характеристик для плоскої та просторової задач розрахунків течій в решітках.

Розроблене програмне забезпечення дозволяє скоротити вартість проектування лопаточних апаратів турбомашин за рахунок зменшення часу підготовки початкових даних для обчислення параметрів течій та скорочення машинного часу при генерації різницевих сіток за алгоритмами, які ефективно реалізуються на ПЕОМ.

**На захист** виносяться положення, які складають наукову новизну, та програмне забезпечення автоматизованого конструювання різницевих сіток.

**Реалізація роботи** здійснена в НДР кафедри Теорії повітряно-реактивних двигунів Харківського авіаційного інституту та в практику Харківського конструкторського бюро з двигунобудування. Реалізація підтверджується довідками про використання результатів досліджень.

**Обсяг публікацій** за темою роботи складає 7 найменувань.

**Апробація роботи.** Основні положення дисертаційної роботи були висунуті до розгляду на Всеукраїнських науково-методичних конференціях з геометричного моделювання, інженерної та комп'ютерної графіки - м.Харків, 1993 р., м.Львів, 1994 р., м.Мелітополь, 1995 р.; на наукових семінарах кафедри нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки Київського державного технічного університету будівництва та архітектури /1995, 1996 р.р./, на наукових конференціях Харківської державної академії технології та організації харчування /1993 - 1996 р.р./, на наукових семінарах на кафедрі нарисної геометрії та інженерної графіки Харківського авіаційного інституту /1994 - 1996 р.р./.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, трьох глав, списку літератури з 111 найменувань та додатків. Робота містить 112 сторінок машинописного тексту, 42 рисунка та 2 таблиці.

## **ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність наукових досліджень, проведено огляд літературних джерел та аналіз сучасного стану в галузі теорії

побудови різницевих сіток стосовно до чисельного розв'язання задач гідрогазодинаміки. Розглянуто застосування методів дискретного моделювання, які дозволяють будувати різноманітні сітки в задачах розрахунку течій рідини та газу, будівельної механіки, формоутворення оболонок покриттів.

Визначені вимоги, що ставляться до різницевих сіток при розрахунках течій в решітках турбомашин.

Сформульовані ціль та основні задачі досліджень даної роботи, її наукова новизна та практичне значення.

У **першій главі** дисертації розглянуто побудову плоских сіток за допомогою алгебраїчних відображень. При цьому виникає необхідність введення відображення фізичного простору  $(x, y, z)$  на простір  $(\xi, \eta, \zeta)$  узагальнених криволінійних координат таким чином, що межа розрахункової області співпадає з координатною лінією у просторі узагальнених координат.

Для розв'язання задачі обтічнення решітки профілів потоком газу система рівнянь Ейлера в часткових похідних, яка може бути записана у символічному векторному вигляді

$$W_t + F_x + G_y = 0, \quad (1)$$

де

$$W = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ E \end{bmatrix}; \quad F = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ u(E+p) \end{bmatrix}; \quad G = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ v(E+p) \end{bmatrix},$$

$\rho, p, u, v$  - тиск, густина та компоненти швидкості,  $E$  - повна енергія одиниці об'єму, при переході до криволінійної системи координат перетворюються до виду, що містить додаткові члени рівнянь - часткові похідні по  $\xi, \eta$ .

Якщо немає явних аналітичних залежностей  $x = x(\xi, \eta), y = y(\xi, \eta)$ , тоді для часткових похідних  $\partial x / \partial \xi, \partial x / \partial \eta, \partial y / \partial \xi, \partial y / \partial \eta$  треба також проводити дискретизацію, яка є ще одним джерелом помилок у рішенні. Тому перевагу слід надавати таким відображенням, що можуть бути записані в явному аналітичному вигляді.

Серед трьох існуючих типів сіток ( $H, C$  та  $O$ ) найбільшу увагу привертають сітки типів  $C$  та  $O$ , які дозволяють описувати розрахункову область поблизу передньої та задньої кромки профіля з підвищеною точністю.

В роботі запропоновано спосіб побудови двовимірних ортогональних сіток типу  $C$  для профілів з гострою задньою кромкою та типу  $O$  для профілів з притупленою задньою кромкою з використанням еквідистантних кривих (рис. 1).

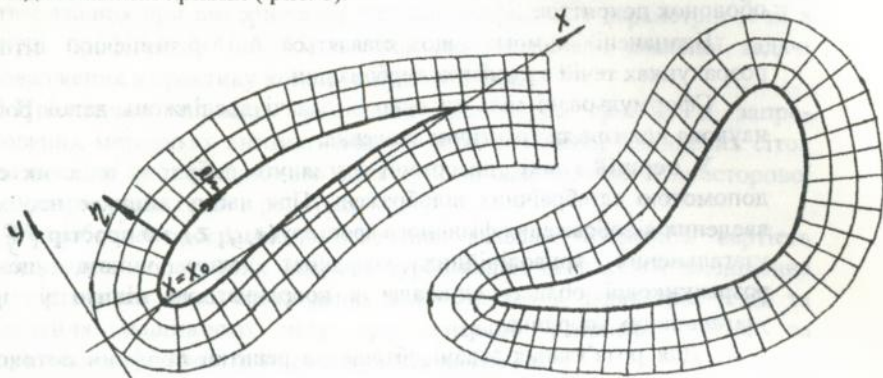


Рис.1.

Перетворення фізичної області в розрахункову одержуємо внаслідок розв'язання системи алгебраїчних рівнянь

$$\begin{cases} x(\xi, \eta) = x_0 + h_x \xi - h_y \eta \sin(\text{Arctg}(f'(x_0 + h_x \xi))), \\ y(\xi, \eta) = f(x_0 + h_x \xi) + (1/(x_0 + h_x \xi)) h_y \eta \sin(\text{Arctg}(f'(x_0 + h_x \xi))), \end{cases} \quad (2)$$

де  $h_x, h_y$  - кроки в напрямку координатних осей  $Ox$  та  $Oy$ , а  $f(x)$  - функція, що задає внутрішню межу розрахункової області або будь-яка її гладка апроксимація, яка відповідає вимогам газодинамічної задачі.

При застосуванні побудованої таким чином різницевої сітки розрахунок параметрів течії в зонах передньої та задньої кромки, де форма ліній сітки відповідає формі кривої профілю, провадиться з підвищенням точності та вірогідності результатів. Крім того, спосіб генерації сітки за допомогою алгебраїчних функцій дозволяє здійснювати загушення її ліній та вузлів в певних зонах, якщо розміщення вузлів сітки на межовій кривій задавати функцією  $h_x = h_x(\xi)$ , а вздовж осі  $Oy$  - функцією  $h_y = h_y(\eta)$ .

Двовимірною розрахунковою областю при обчисленні параметрів течії в решітці турбомашини є міжпрофільний канал. Для дискретизації фізичної області запропоновано конструювання сітки типа  $H$  таким чином, що лінії постійного значення  $\xi$  направлені за течією, а лінії постійного значення  $\eta$  - впоперек неї. Координатні лінії  $\xi = \xi_i, i = 1 \dots N$

будуємо лінійною інтерполяцією меж  $\partial\Omega_1$  та  $\partial\Omega_2$  вздовж фронту решітки (рис.2).

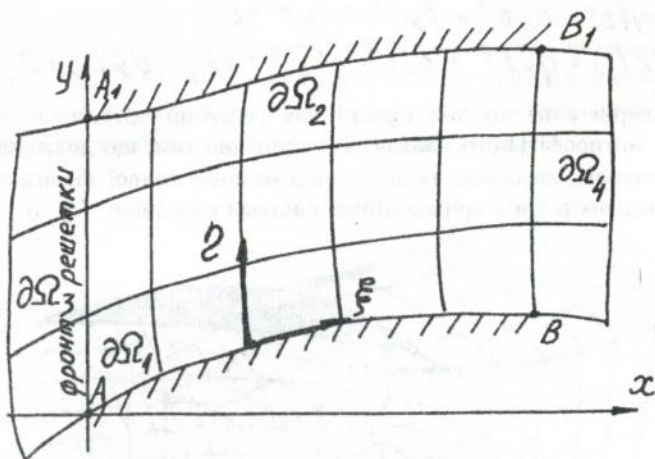


Рис.2.

Визначимо нормалізований параметр

$$\eta^* = \frac{\eta - \eta_{\min}}{\eta_{\max} - \eta_{\min}}, \quad 0 \leq \eta^* \leq 1 \quad \text{для } \eta_{\min} \leq \eta \leq \eta_{\max}, \quad (3)$$

тоді лінійна інтерполяція задається рівнянням

$$y(\xi, \eta) = (1 - \eta^*) f_1(x(\xi)) + \eta^* f_2(x(\xi)), \quad (4)$$

де  $f_1(x(\xi))$ ,  $f_2(x(\xi))$  - рівняння верхньої та нижньої меж області.

Для забезпечення загушення ліній сітки біля меж області розглянемо замість параметра  $\eta^*$  його раціональний степінь  $(\eta^*)^r$ ,  $r \in \mathbb{R}$ .

Тоді при  $r > 1$  із збільшенням  $r$  вплив функції  $f_1(x(\xi))$  на форму кривої зростає, а вплив  $f_2(x(\xi))$  - падає, тому загушення сітки відбувається поблизу нижньої межі. Навпаки, при  $r < 1$  із зменшенням  $r$  збільшується вплив верхньої межі області та загушення ліній сітки відбувається поблизу неї.

Важлива властивість різницевої сітки - її ортогональність. Якщо не вдається побудувати ортогональну по всій області сітку, необхідно забезпечити її ортогональність до меж розрахункової області. Для досягнення цієї мети за лінії  $\eta = \eta_j$ ,  $j = 1 \dots M$  вибираємо кубічні криві Ерміта, які у параметричній формі мають вигляд

$$\begin{cases} x(t) = a_x t^3 + b_x t^2 + c_x t + d_x; \\ y(t) = a_y t^3 + b_y t^2 + c_y t + d_y; \\ z(t) = a_z t^3 + b_z t^2 + c_z t + d_z, \quad 0 \leq t \leq 1. \end{cases} \quad (5)$$

Використання кривих Ерміта для генерації ортогональної до меж області міжпрофільного каналу сітки вигідно тим, що довжина управляючих векторів визначає, як далеко від межової кривої зберігається умова ортогональності ліній криволінійної системи координат  $(\xi, \eta)$  (рис.3).

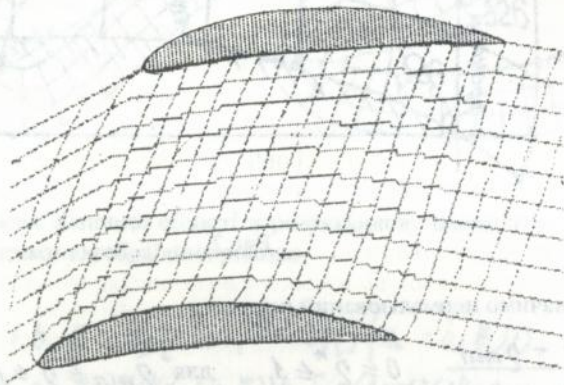


Рис.3.

Дуже важливо розповсюдити взаємну ортогональність ліній сітки на всю розрахункову область, тому подальше удосконалення способу генерації сітки полягає у введенні додаткових точок апроксимації на середній лінії каналу. Цей спосіб дозволяє конструювати сітки для складних геометричних областей із наперед заданими кутами нахилу ліній сітки до меж, а у випадку, коли початкову розрахункову область треба розбити на кілька більш простих підобластей, об'єднувати окремі сітки в єдину складену без переламів ліній на стиках.

Запропоновано розв'язувати задачу конструювання єдиної тривимірної різницевої сітки для просторових областей навколо ізолюваної лопатки та в міжлопаточному каналі на основі тієї математичної моделі поверхні пера лопатки, яка використовується у газодинамічних розрахунках. Цей спосіб дозволяє розташувати у просторі набір двовимірних сіток, які пов'язані з перерізами лопатки, таким чином,

що забезпечується гладкість ліній сітки у третьому, продольному, напрямку.

Якщо двовимірні сітки будувати за допомогою еквідистантних кривих, або ж лінійною інтерполяцією межових кривих та кривих Ерміта, тоді лінії  $\xi = \xi_{\kappa}, \kappa = 1 \dots L$  криволінійної системи узагальнених координат  $(\xi, \eta, \xi)$ , що пов'язана з поверхнею лопатки, будуть витягуватися у просторі разом з побудовою поверхні лопатки (рис.4).

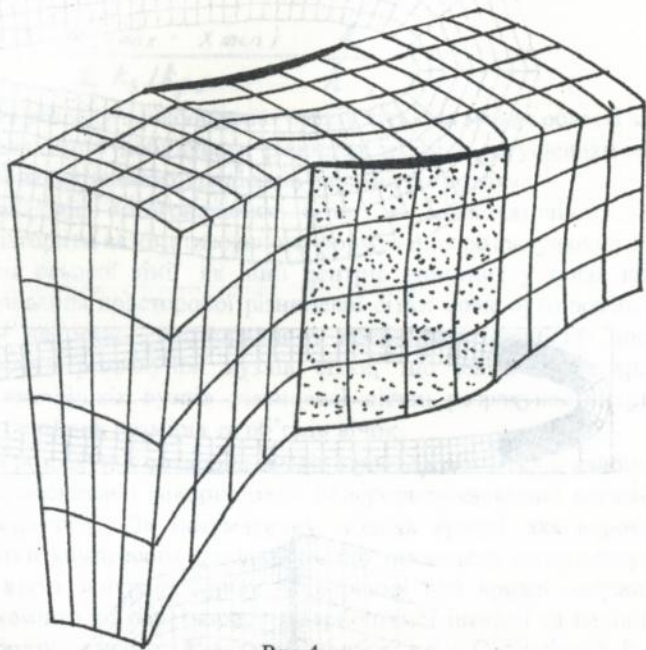


Рис.4.

Алгоритм автоматизованого конструювання просторової сітки в міжлопаточному каналі разом з побудовою поверхні лопатки є найбільш пристосованим для точного розрахунку геометричних характеристик сітки та параметрів течії, тому що враховує вид та властивості математичної моделі, за допомогою якої відтворюється лопатка.

У другій главі представлені алгоритми побудови двовимірних та тривимірних різницевих сіток для чисельного розрахунку течії в компресорних решітках.

Розглянуто випадки побудови рівномірної та нерівномірної сіток для обчислення параметрів течії навколо ізольованого профілю та в решітці профілів (рис. 5).

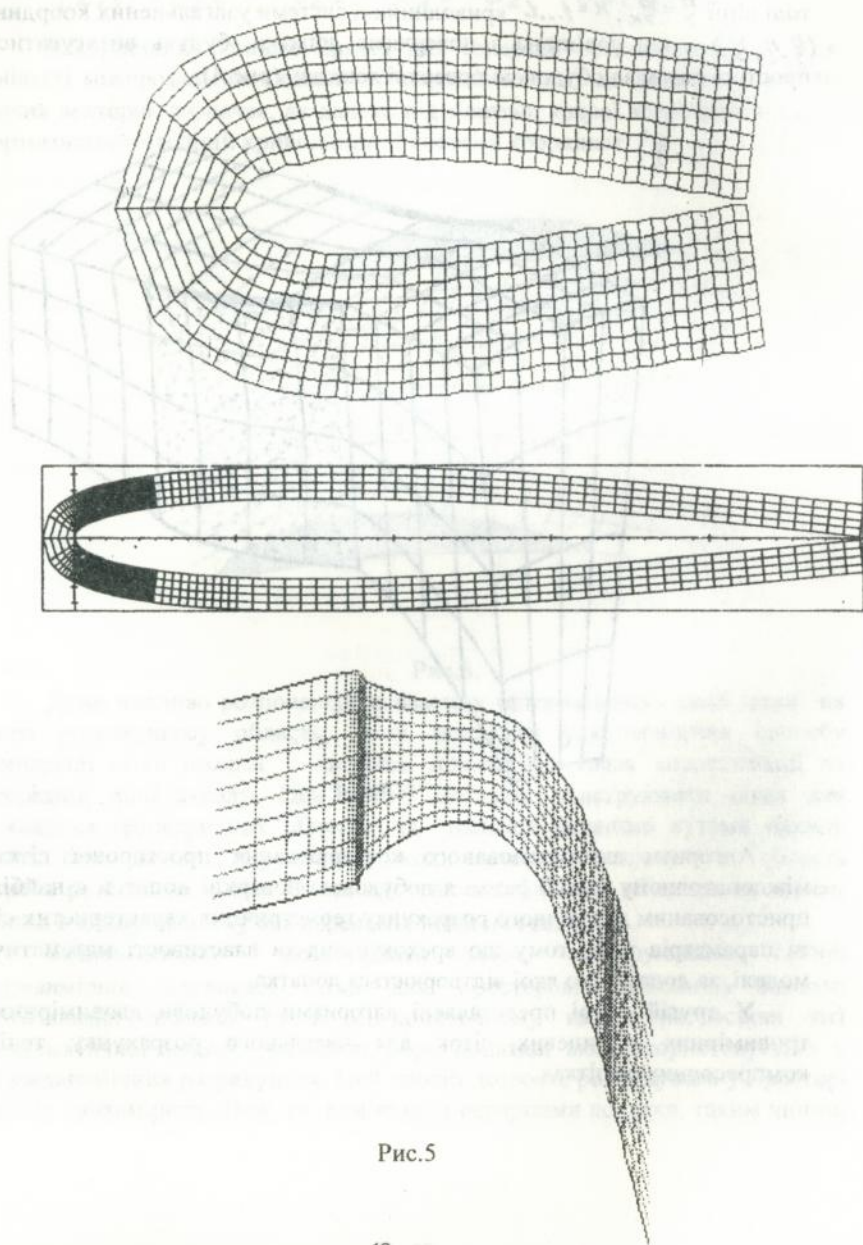


Рис.5

Для генерації адаптивних сіток, що динамічно пов'язані з рішенням, необхідно задавати такий закон зміни кроку розподілу вздовж координатних осей, який дозволить збільшити гущину сітки в зонах передбаченої швидкої зміни параметрів середовища. Це, перш за все, зони поблизу твердої межі області, де лінія контура профілю має велику кривину. В роботі визначено функціональну залежність змінного розподілу вузлів сітки вздовж осі  $Ox$  від кривини межевої кривої - контура профілю:

$$h_i = \frac{N(x_{max} - x_{min})}{\sum_{s,j} k_s / k_{j-1}} \cdot \frac{\tilde{k}}{k_{i-1}} \quad (6)$$

Введення розрахунку координат вузлів сітки на межах області за цією функцією дало змогу побудувати різницеві сітки із загушенням ліній в зонах передбачених великих градієнтів параметрів потоку.

Для генерації ортогональних сіток в міжлопаточному каналі розроблено алгоритм автоматизованого формування розрахункової області та визначення осьової лінії як лінії центрів вписаних у канал кіл.

Конструювання просторової різницевої сітки може бути розбитим на три складові частини: відтворення з необхідною точністю поверхні лопатки ( тобто розрахунок вузлів сітки, що належать поверхні ), обчислення внутрішніх вузлів різницевої сітки; розрахунок метричних коефіцієнтів, лінійних розмірів та об'ємів вічок.

З метою розрахунку межових вузлів просторової сітки з найбільшою точністю запропоновано використання неперервно-каркасної моделі пера лопатки компресора. За математичну модель кривої, яка апроксимує переріз лопатки компресора площиною, що проведена перпендикулярно до радіуса, взято замкнену криву. Утворення цієї кривої одержано за допомогою композиції перетворень гіперболічної інверсії та нелінійного зсуву з прообразу - конхкоїди Нікомеда в роботі к.т.н. Сафіуліної К.Р:

$$\begin{aligned}
 y &= f_1(\beta, \chi_1, \chi_2, x) + f_2(\beta, C_m, \chi_c, d, x); \\
 f_1 &= \frac{\beta x - x^2}{2Ax + C}; \\
 A &= F_1(\chi_1, \chi_2); \quad C = F_2(\beta, \chi_1); \\
 f_2 &= \pm \frac{L}{L+E} \cdot \sqrt{d^2 E^2 - (L+E)^2}; \\
 L &= F_3(x, \beta, \chi_c, C_m, d); \\
 E &= F_4(C_m, d); \\
 y &= F(\beta, C_m, \chi_c, \chi_1, \chi_2, d, x).
 \end{aligned} \quad (7)$$

Рівняння лопаточного профілю вміщує 6 параметрів, п'ять перших з них є геометричними характеристиками конкретного перерізу лопатки. У роботі запропоновані аналітичні залежності цих параметрів від радіусу. Визначено вид кривої, яка апроксимує лінію розміщення перерізів відносно одне одного, та закон зміни кута  $\gamma$  установалення профілю в решітці ( закрутка по висоті лопатки ), що дозволило описати математичну поверхню пера лопатки у вигляді

$$\begin{cases} x = u \cdot \cos \gamma(v) + F(u, v) \sin \gamma(v) + \varphi(v); \\ y = v; \\ z = -u \cdot \sin \gamma(v) + F(u, v) \cdot \cos \gamma(v). \end{cases} \quad (8)$$

$$F(u, v) = f_1(\theta(v), \chi_1(v), \chi_2(v), \chi) + f_2(\theta(v), c_m(v), \chi_c(v), d, \chi).$$

З точки зору вимог гідрогазодинаміки звільнення від кусочності завдання поверхні лопатки найчастіше буває головним критерієм для оцінки математичної моделі, яка відтворює розглядувану поверхню. В роботі наведено доказ гладкості одержаної поверхні пера лопатки, яка задається системою рівнянь (8). Доказ проведено через розгляд двох послідовних перетворень простору  $R^3$ , що здійснюють поворот та нелінійний зсув перерізів, набраних по висоті. Композиція перетворень зберігає гладкість поверхні з пропорційною розбивкою, яка утворюється з набору перерізів. Зміна форми та розмірів профілю передається неперервно-диференційованими функціями від радіусу.

Координати вузлів просторової сітки, яка пов'язана з математичною моделлю поверхні пера лопатки, розраховуються за аналогічними рівняннями:

$$\begin{cases} X_{ijk} = X_{i0k} \cdot \cos \gamma_j + F_j(X_{i0k}) \cdot \sin \gamma_j + \varphi_j; \\ Y_{ijk} = j h_y; \\ Z_{ijk} = -X_{i0k} \cdot \sin \gamma_j + F_j(X_{i0k}) \cdot \cos \gamma_j, \end{cases} \quad (9)$$

$$X_{i0k} = X_{i00} - h_z \cdot k \cdot \sin d_{ij};$$

$$F_j(X_{i0k}) = F_j(X_{i00}) + h_z \cdot k \cdot \sin d_{ij} \cdot \frac{1}{F'_j(X_{i00})}$$

У третій главі наведено приклади застосування алгоритмів конструювання різницевих сіток, що запропоновані в роботі. На основі описаних алгоритмів розроблено методики генерації двовимірних та тривимірних сіток в розрахункових областях навколо ізольованої лопатки та в міжлопаточному каналі.

Алгоритми реалізовані у вигляді програмних PASCAL - модулів, які об'єднані в геометричний блок та запропоновані як складова частина програмного комплексу розрахунку течій за методом "крупних часток" в науково-дослідній лабораторії кафедри Теорії повітряно-реактивних двигунів Харківського авіаційного інституту.

Алгоритми та програми геометричного блоку перевірено на тестовому прикладі - чисельному дослідженні течії у плоскій решітці профілів типу NASA 65, для яких є вірогідні експериментальні результати. На рис.6 надані графіки розподілу чисел Маха вздовж обводу профілю при розрахунку трансзвукової течії за методом "крупних часток" на рівномірній криволінійній сітці (суцільна лінія), за даними закордонної наукової преси (уривчаста лінія) у порівнянні з експериментом (умовні позначки - прямокутники). Порівняння для  $M_1 = 0,46$  та  $M_1 = 0,61$  дає змогу бачити задовільне співпадання результатів чисельного розрахунку та експерименту.

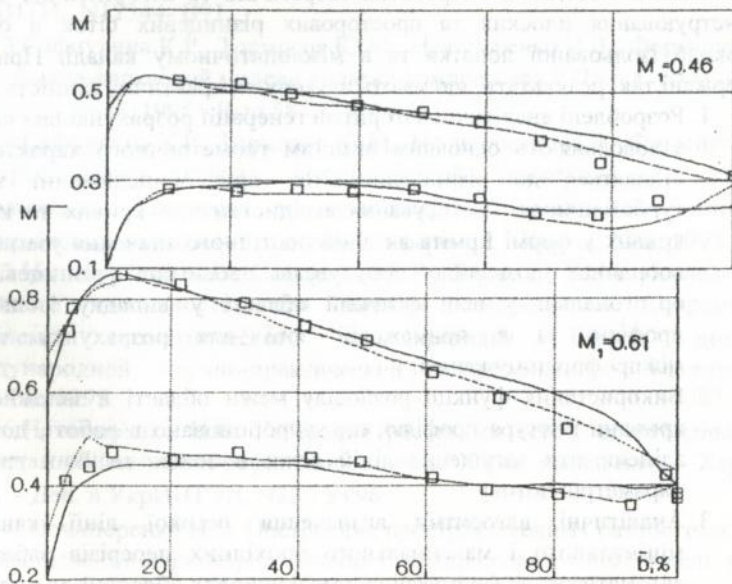


Рис.6.

Задача впровадження. Розроблені алгоритми та програми для розрахунку математичної моделі пера лопатки компресору, автоматизованого формування міжпрофільного каналу та конструювання різнице-вих сіток були впроваджені при проектуванні та виготовленні елементів проточної частини турбокомпресора в Конструкторському бюро з двигунобудування (м. Харків).

При профілюванні проточної частини компресора використовується, що в області входного спрямовуючого апарату лопатки вигинаються по параболі. При конструюванні дифузора лопаточного використовується аеродинамічний профіль, середня лінія якого вигинається по гіперболі.

Відтворення поверхні пера лопатки, розрахунок координат вузлів сітки та її геометричних характеристик здійснюється за розробленими алгоритмами.

Всі етапи газодинамічних розрахунків та профілювання робочих коліс, дифузора лопаточного, соплового апарату та інших деталей виконані за відповідними програмами на ПЕОМ.

## ВИСНОВКИ

В роботі виконано дослідження з дискретного моделювання розрахункових областей стосовно до розв'язання задач гідрогазодинаміки чисельними методами. Розроблена теоретична та алгоритмічна база для конструювання плоских та просторових різнице-вих сіток в областях навколо ізольованої лопатки та в міжлопаточному каналі. При цьому одержані такі результати, що мають наукову та практичну цінність.

1. Розроблені аналітичні алгоритми генерації розрахункових сіток, які задовольняють основним вимогам геометричного характеру, що ставляться до різнице-вих сіток при обчислюванні течій в турбомашинах. Застосування еквідистантних кривих та кубічних кривих у формі Ерміта як ліній постійного значення узагальнених координат дозволило побудувати двовимірні різнице-ві сітки, ортогональні у всій фізичній області у випадку ізольованого профілю та в приміжовій зоні для розрахунку течій в міжпрофільному каналі.
2. Використання функції розподілу межі області в залежності від кривини контура профілю, що запропоновано в роботі, дозволило здійснювати загушення ліній сітки в зонах великих градієнтів параметрів потоку.
3. Аналітичні алгоритми визначення осьової лінії каналу та мінімального і максимального прохідних перерізів забезпечили автоматизоване формування розрахункових областей для плоскої та просторової задач гідрогазодинаміки.

4. Спосіб генерації єдиної тривимірної різницевої сітки на основі математичної моделі поверхні пера лопатки дав змогу одержати гладкість ліній сітки у всіх координатних напрямках.
5. Прикладні програми, що розроблені на основі запропонованих алгоритмів, об'єднані в геометричний блок побудови різницевих сіток. Геометричний блок використаний у складі програмного комплексу розрахунку течій в решітках турбомашин і дозволяє визначити координати вузлів сітки та її геометричні характеристики із задовільною точністю. Розроблені алгоритми та програми для розрахунку математичної моделі пера лопатки компресору, автоматизованого формування міжпрофільного каналу та конструювання різницевих сіток впроваджені в конструкторську практику.

Основні положення дисертації опубліковані у таких роботах:

1. Сафиулина К.Р., Тормосов Ю.М., Нечипоренко И.В. Проектирование межлопаточного канала решетки профилей. / Харьк. авиац. ин-т. - Харьков, 1991. - Деп. в ВИНТИ, N12343- B91.

2. Сафиулина К.Р., Тормосов Ю.М., Нечипоренко И.В. Построение эквидистантного профиля. / Харьк. авиац. ин-т. - Харьков, 1991. - Деп. в ВИНТИ, N12344- B91.

3. Сафиулина К.Р., Тормосов Ю.М., Нечипоренко И.В. Формирование непрерывно-каркасной модели лопатки компрессора. // Прикл. геом. и инж. графика. - Киев, 1995 - Вып.58 - С.143-145.

4. Сафиулина К.Р., Тормосов Ю.М., Нечипоренко И.В. Формирование межпрофильного канала компрессорной решетки. // Геометричне моделювання, інженерна та комп'ютерна графіка. Тези доповідей всеукраїнської науково-методичної конференції. - Харків: ХП, 1993.

5. Нечипоренко И.В., Сафиулина К.Р., Тормосов Ю.М. Исследование гладкости поверхности пера лопатки компрессора. // Современные проблемы геометрического моделирования. Тезисы докладов международной научно-практической конференции. - Мелитополь: МГАТА, 1995.

6. Нечипоренко И.В. Генерация расчетных сеток, ортогональных к границам области межпрофильного канала. / Харьк. авиац. ин-т. - Харьков, 1996. - Деп. в УкрИНТЭИ, N82 - Ук96.

7. Нечипоренко И.В. Построение пространственных разностных сеток при вычислении параметров течения в компрессоре. / Харьк. авиац. ин-т. - Харьков, 1996. - Деп. в УкрИНТЭИ, N83 - Ук96.

Нечипоренко Ирина Владимировна. Конструирование пространственных разностных сеток применительно к расчетам течений численными методами.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.01.01 - Прикладная геометрия, компьютерная графика, дизайн и эргономика.

Киевский государственный технический университет строительства и архитектуры. Украина, Киев, 1996.

Защищаются 7 научных работ, в которых изложены теоретические положения о способах построения плоских и пространственных разностных сеток при расчете параметров течения в решетках турбомашин. Теоретические разработки применены при создании алгоритмов расчета координат узлов и геометрических характеристик ячеек разностных сеток.

Ключевые слова: пространственная разностная сетка, численные методы в гидродинамике, эквидистанта, кубические кривые в форме Эрмита, поверхность пера лопатки, межпрофильный канал

Nechyporenko Iryna Volodymyrivna. *Building Spatial Differential Grids as Applied to Calculation of Flows with Numeric Methods.*

The competition thesis for scientific degree of Candidate of Technical Sciences in specialization 05.01.01—Applied geometry, computer graphics, design, and ergonomics.

The Kyiv State Technical University of Construction and Architecture. Kyiv, Ukraine, 1996.

Seven research papers are presented describing theoretical methods of building flat and spatial differential grids in calculating flow parameters in turbine grating. Theoretical methodology has been applied in creating the algorithms for calculating the coordinates of assemblies and geometric characteristics of differential grid cells.

Key words: spatial differential grid, numeric methods in liquid and gas dynamics, equidistant, cubic curves in the Hermite form, blade fin surface, inter-profile duct.

AP. 20.020

434062

Ав 36.038

Нечетвертое издание  
пространственных рисунков дается применительно к различным  
техническим назначениям рисунков.

Дисциплина для студентов инженерной специальности «Применение геометрии»  
технического университета № 15.01.01 - Прикладная геометрия  
и черчение (техническое образование).

Курсовая работа подготовлена кафедрой инженерной  
геометрии и черчения Ленинградского государственного  
университета им. А.А.Жданова.

В книге описаны методы построения проекций плоских и  
пространственных фигур, методы построения плоских и  
пространственных фигур по заданным параметрам точек и  
линий, методы построения разверток поверхностей, применены при  
решении задач на построение точек и линий в геометрических  
картинах и в проекциях.

В книге описаны методы построения проекций плоских и  
пространственных фигур, методы построения плоских и  
пространственных фигур по заданным параметрам точек и  
линий, методы построения разверток поверхностей, применены при  
решении задач на построение точек и линий в геометрических  
картинах и в проекциях.

Содержание: 1. Плоские проекции. 2. Пространственные проекции. 3. Геометрические построения.

1. Плоские проекции. 2. Пространственные проекции. 3. Геометрические построения. 4. Черчение.

1. Плоские проекции. 2. Пространственные проекции. 3. Геометрические построения. 4. Черчение. 5. Развертки.

1. Плоские проекции. 2. Пространственные проекции. 3. Геометрические построения. 4. Черчение. 5. Развертки. 6. Компьютерная графика.

1. Плоские проекции. 2. Пространственные проекции. 3. Геометрические построения. 4. Черчение. 5. Развертки. 6. Компьютерная графика. 7. Конструкция и изготовление.

430204