

УДК 629.735.03:621.43.031.3(045)

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ В РЕШІТЦІ АЕРОДИНАМІЧНИХ ПРОФІЛІВ

Ю. М. Терещенко, К. В. Дорошенко, А. Техрані

Національний авіаційний університет

Terj@nau.edu

Наведено результати чисельного моделювання течії в решітках аеродинамічних профілів для різних розрахункових сіток з різними моделями турбулентної в'язкості при коефіцієнті швидкості $\lambda = 0,385—0,86$. Порівняльне оцінювання точності розрахунків моделювання течії в решітках аеродинамічних профілів виконано за допомогою порівняння результатів чисельного і фізичного експериментів.

Ключові слова: решітка аеродинамічних профілів; чисельне моделювання; розрахункова сітка; модель турбулентності.

In work are represented results of numerical simulation of flow at compressor cascade at various mesh and various turbulence models. Flow calculation are done at velocity coefficient $\lambda = 0,385—0,86$. Results of numerical simulation of flow at compressor cascade and results of physical experiment are compared.

Keywords: compressor cascade; numerical simulation; mesh; turbulence model.

Вступ

Одним із головних завдань аеродинамічного проектування газотурбінних двигунів є створення високоефективних компресорів і турбін [1]. Використання під час аеродинамічного проектування сучасних обчислювальних методів дає змогу на більш високому рівні розв'язувати задачі підвищення ефективності газотурбінних двигунів за рахунок покращення внутрішньої аеродинаміки компресорів.

У сучасній практиці проектування газотурбінних двигунів широко використовується чисельний експеримент.

Відомо, що будь-який CFD програмний комплекс потребує налаштування перед проведенням чисельних розрахунків, яке складається з підбору відповідних параметрів геометрії розрахункової області, розрахункової сітки, моделей турбулентності і т.д., які б забезпечували найкращий збіг з експериментом. Слід зазначити, що при моделюванні течії в лопаткових вінцях у працях різних авторів використовуються структуровані і неструктуровані адаптивні сітки, найчастіше застосовуються такі моделі турбулентності: як $k-\varepsilon$, $k-\omega$, SST [2–7]; розрахункова схема повинна мати порядок апроксимації не нижчий за другий [2].

У цій роботі ставиться завдання порівняльного оцінювання точності розрахунків під час використання різних моделей турбулентності для моделювання течії в решітках аеродинамічних профілів.

Розв'язання задачі й аналіз результатів

Чисельний експеримент складається з таких етапів [8–9]:

- побудова геометричної моделі;
- побудова розрахункової сітки (*mesher*);
- визначення початкових і граничних умов;

– чисельне розв'язання задачі (*solver*);

– візуалізація рішення;

– аналіз рішення (оцінка точності).

Розглянемо етапи чисельного експерименту.

Вважається, що при побудові геометричної моделі для дослідження одного вінця лопатки повинна бути виконана така умова: вхідна і вихідна ділянки розрахункової області мають бути приблизно рівні хорді лопатки. Розрахункова область для даної задачі складається з однієї лопатки (хорда лопатки $b = 52$ мм, крок $t = 32$ мм) і одного міжлопаткового каналу, довжина вхідної ділянки — 40 мм, довжина вихідної ділянки — 100 мм.

Значну роль при моделюванні відіграє вибір розрахункової сітки. Існує багато можливостей для їх класифікації. За формою комірок: трикутні, чотирикутні, гібридні (2D). За способом нумерації вузлів: регулярні, нерегулярні.

В регулярних сітках використовуються двійкова (2D) і трійкова (3D) системи нумерації вузлів. Для нерегулярних сіток задаються глобальна і локальна нумерації вузлів і визначається відповідність між глобальною і локальною нумераціями. За способом розташування вузлів: адаптивні і рівномірні. В адаптивних сітках вузли сітки згущуються в областях високих градієнтів управляючої функції, або поблизу інших особливих кривих (поверхонь). Використання деяких сіток диктується даною задачею. Наприклад, в задачах зі складною геометрією часто використовують нерегулярні сітки з трикутними комітками (або гібридні) як більш адекватні.

Для більшості задач використовуються адаптивні сітки. Для розв'язання такої задачі вибрано три варіанти нерегулярної сітки. Варіант № 1 — нерегулярна сітка без адаптації — 200 000 комірок, варіант № 2 — адаптивна нерегулярна сітка —

500 000 комірок, варіант сітки № 3 — адаптивна нерегулярна сітка складається з 1 200 000 комірок.

Під час визначення початкових і граничних умов важливе місце займає вибір моделі турбулентної в'язкості. Розрахунок турбулентної течії газу виконувався шляхом чисельного розв'язання осереднених рівнянь Нав'є–Стокса (рівнянь Рейнольдса). При осереднюванні за часом у рівняннях з'являються нові члени, які можна інтерпретувати як градієнти додаткових напружень і теплових потоків, пов'язаних з турбулентним рухом. Ці нові величини повинні бути пов'язані з характеристиками осередненої течії за допомогою моделей турбулентної в'язкості. Існує безліч моделей турбулентності, проте найчастіше для розрахунку течії у вінцях лопаток використовуються моделі турбулентної в'язкості k - ϵ , k - ω і SST.

Моделі турбулентності типу k - ϵ краще описують властивості зсувних течій, а моделі типу k - ω мають перевагу при моделюванні пристінкових функцій.

Модель турбулентності SST Ментера [9] записується шляхом суперпозиції моделей k - ϵ і k - ω . Плавний перехід від k - ω моделі в пристінній області до k - ϵ моделі в ядрі потоку забезпечується введенням вагової емпіричної функції F_1 .

У даній роботі було проведено серію розрахунків з моделями турбулентності k - ϵ , k - ω і SST.

Для розрахунку було використано розрахункова схема другого порядку з локальним використанням розрахункової схеми першого порядку (*High resolution*), оскільки це найточніша з розрахункових схем, закладених у солвері [2].

Було проведено серію газодинамічних розрахунків у пакеті CFX для компресорної решітки аеродинамічних профілів. Перший етап розрахунків було виконано для трьох розрахункових сіток з використанням моделі турбулентності SST. Розрахунок течії був проведений при куті атаки $i = 2^\circ$ при $\lambda = 0,375$ – $0,86$. На рис. 1 показано схему решітки аеродинамічних профілів (хорда лопатки $b = 52$ м, крок $t = 32$ мм).

Для можливості коректно поставити умову періодичності розрахункова область складалася з одної лопатки і одного міжлопаткового каналу.

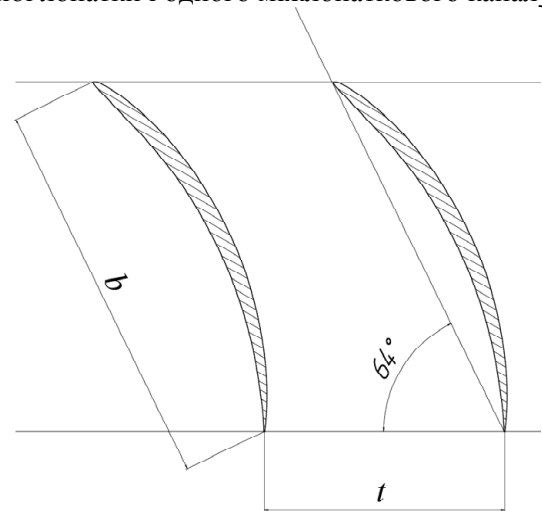


Рис. 1. Схема решітки аеродинамічних профілів

На рис. 2 показано миттєве поле розподілення повного тиску для сітки № 3 при $\lambda = 0.4$.

Дослідження впливу розрахункової сітки проводилося шляхом порівняння результатів трьох серій розрахунків описаної вище решітки аеродинамічних профілів. Як критерій якості сітки використовувався розподіл коефіцієнта втрат повного тиску за решіткою, показаного на рис. 3.

З наведених розподілів видно, що практично збігається з експериментом розподіл втрат повного тиску, отриманий на сітці № 3. У свою чергу, варіант № 2 близький до експерименту, а найгрубіша сітка дає дуже розмиті кромкові сліди. Таким чином, перевага в розглянутих варіантах повинна бути віддана найдрібнішій адаптивній сітці № 3.

Далі для розрахункової сітки № 3 було проведено серію розрахунків при куті атаки $i = 2^\circ$ при $\lambda = 0,375$ – $0,86$ для трьох моделей турбулентності k - ϵ , k - ω і SST. Результати розрахунків порівнювалися з експериментальними даними розподілу коефіцієнта втрат повного тиску за решіткою аеродинамічних профілів (рис. 4).



Рис. 2. Розподіл миттєвого поля повного тиску для сітки № 3 при $\lambda = 0.4$

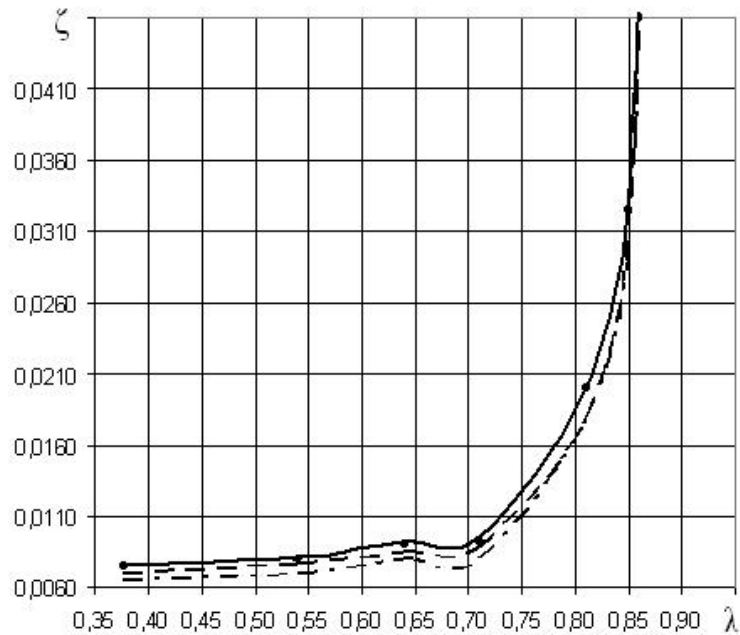


Рис. 3. Залежність коефіцієнта втрат повного тиску ζ від коефіцієнта швидкості λ :
 - - - - сітка №1; - · - · - сітка №2; — — сітка №3; • — експериментальні дані [10]

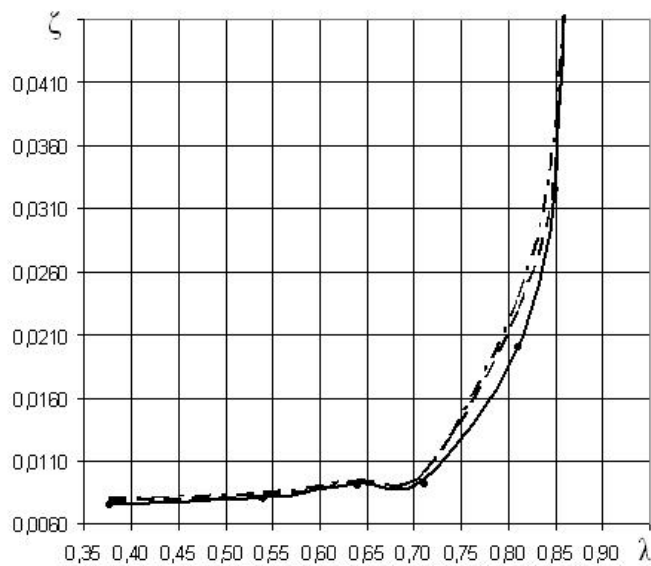


Рис. 4. Залежність коефіцієнта втрат повного тиску ζ від коефіцієнта швидкості λ
 - - - - $k-\epsilon$; - · - · - $k-\omega$; — — SST; • — експериментальні дані [10]

Результати розрахунків течії в решітці аеродинамічних профілів з використанням різних моделей турбулентності добре узгоджуються з результатами фізичного експерименту (рис. 4). Найбільшу точність мають результати розрахунків з використанням моделі SST. Це підтверджує думку багатьох авторів про використання саме моделі SST для моделювання течії в лопаткових машинах.

Висновки

Було проведено серію розрахунків за визначенням параметрів течії, що забезпечують найкращий збіг з експериментом.

На основі зіставлення результатів розрахунків з експериментальними даними можна зробити висновок, що для моделювання течії в решітках аеродинамічних профілів слід використовувати дрібну адаптивну сітку і модель турбулентності SST.

ЛІТЕРАТУРА

1. Терещенко Ю. М. Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров / Ю. М. Терещенко // — М. : Машиностроение, 1987. — 168 с.

2. *Бойко А. В.* Применение вычислительной аэродинамики к оптимизации лопаток турбомашин / А. В. Бойко, Ю. Н. Говорущенко, М. В. Бурлака // — Х. : НТУ «ХПИ», 2012. — 192 с.
3. *Юн А. А.* Теория и практика моделирования турбулентных течений / А. А. Юн. — М. : Либроком, 2009. — 274 с.
4. Chen, Naixing *Aerothermodynamics of turbomachinery: analysis and design/* Naixing Chen. — Singapore: John Wiley & Sons Pte Ltd, 2010. — 461 p.
5. *Wilcox D. C.* Reassessment of the Scale-Determining Equation for Advanced Turbulence Models. // *AIAA Journal*. — 1988. — 26, № 11. — P. 1299–1310.
6. Koubogiannis D. G., Athanasiadis A. N., Giannakoglou K. C. One- and two-equation turbulence models for the prediction of complex cascade flows using unstructured grids // *Computers & Fluids* — 2003. — 32, № 3. — P. 403–430
7. *Song Yin, Donghai Jin, Xingmin Gui, Fang Zhu.* Application and comparison of SST model in numerical simulation of the axial compressors // *Journal of Thermal Science* — 2010. — 19, № 4. — P. 300–309
8. *Терещенко Ю. М.* Теорія теплових двигунів / Ю. М. Терещенко, Л. Г. Бойко, С. О. Дмитрієв [та ін.]; за ред. Ю. М. Терещенка. — К. : Вища шк., 2001. — 382 с.
9. *Menter F. R.* Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications// *AIAA J*. — 1994. — 32, №11. — P. 1299–13102
10. *Аэродинамические* характеристики компрессорных решеток / В. С. Свечников, А. Б. Кириллов // *Технический отчет ЦАГИ № 142*. — М. : ЦАГИ, 1957. — 54 с.

Стаття надійшла до редакції 10.07.2014.