

*Представлено результати чисельного моделювання течії в ступені осьового компресора. Порівняння результатів чисельного експерименту з даними фізичних досліджень показало, що похибка розрахункового дослідження становить 0.3...8.6 %. На основі аналізу результатів чисельного експерименту встановлено, що для вирішення задач внутрішньої аеродинаміки компресорів доцільним є використання моделі турбулентної в'язкості SST і дрібної адаптивної сітки*

*Ключові слова: моделювання течії, розрахункова сітка, модель турбулентної в'язкості, ступінь компресора, примежевий шар*

*Представлены результаты численного моделирования течения в ступени осевого компрессора. Сравнение результатов численного эксперимента с данными физических исследований показало, что погрешность расчетного исследования составляет 0.3...8.6 %. На основе анализа результатов численного эксперимента установлено, что для решения задач внутренней аэродинамики компрессоров предпочтительным является использование модели турбулентной вязкости SST и мелкой адаптивной сетки*

*Ключевые слова: моделирование течения, расчетная сетка, модель турбулентной вязкости, ступень компрессора, пограничный слой*

# ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕЧІЇ В СТУПЕНІ ОСЬОВОГО КОМПРЕСОРА З РІЗНОЮ ТОПОЛОГІЄЮ РОЗРАХУНКОВОЇ СІТКИ

**Ю. М. Терещенко**

Доктор технічних наук, професор\*

E-mail: Terj@nau.edu.ua

**К. В. Дорошенко**

Кандидат технічних наук\*

E-mail: Kiki\_ua@ukr.net

**І. О. Ластівка**

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри

Кафедра вищої математики\*\*

E-mail: lola@nau.edu.ua

**Ю. Ю. Терещенко**

Кандидат технічних наук\*

E-mail: Terj-nau@ukr.net

\*Кафедра авіаційних двигунів\*\*

\*\*Національний авіаційний університет

пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058

## 1. Вступ

Осьові компресори є одним з основних елементів сучасних газотурбінних двигунів. Підвищення ефективності та економічності газотурбінних двигунів у значній мірі залежить від вирішення проблеми вдосконалення внутрішньої аеродинаміки осьових компресорів [1]. Удосконалення параметрів і характеристик компресорів ґрунтується на результатах досліджень, які ведуться в двох напрямках.

Перший напрямок забезпечує отримання надійних методів аеродинамічного проектування, яке ґрунтується на результатах фізичного моделювання процесів у проточній частині осьових компресорів.

Другий напрямок передбачає отримання надійних методів аеродинамічного проектування компресорів на основі використання методів математичного моделювання, що забезпечують отримання заданих параметрів компресорів без тривалих і трудомістких доводочних робіт.

У свою чергу, вирішення задач за другим напрямком передбачає вирішення прямої і зворотної задач газодинаміки турбомашин. Вирішення прямої задачі забезпечує отримання надійних методів аеродинамічного проектування компресорів, що забезпечують отримання заданих параметрів. Вирішення оберненої задачі передбачає розробку розрахункових методів,

отримання та аналізу характеристик компресорів за відомою геометрією проточної частини.

Експериментальні методи досліджень не завжди дозволяють побачити і проаналізувати картину течії в компресорі [1, 2]. Тому на даний час для розробки і дослідження шляхів аеродинамічного вдосконалення осьових компресорів використовується методи чисельного моделювання течії в компресорах.

Під час використання чисельного експерименту одним з актуальних питань є обґрунтований вибір моделі турбулентної в'язкості і топології розрахункової сітки.

## 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Дослідженням аеродинаміки компресорів присвячена велика кількість теоретичних і експериментальних робіт. Особливий інтерес представляють дослідження течії в ступенях осьових компресорів за допомогою чисельного експерименту, який дозволяє проаналізувати якісну картину обтікання в міжлопаткових каналах на всіх режимах роботи. У роботі [3] наведено літературний огляд дослідних робіт щодо використання методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) для аналізу течії в турбомашині. Розглянуто проблеми, які виникають при використанні чисельного моделювання, а також проаналізовані переваги і недоліки CFD аналізу в

турбомашин. Матеріали статті розкривають загальні тенденції використання чисельного експерименту в турбомашин. Чисельний експеримент дозволяє досліджувати різні режими течії в компресорах. У роботі [4] представлені результати моделювання течії та оцінка впливу нерівномірності потоку на вході в компресор на стійкість течії. Однак в роботі не викладено методу розрахунку границі стійкої роботи компресора. У роботах [5, 6] надано результати чисельного моделювання течії при критичних режимах роботи компресорних решіток. Авторами розглянуто питання визначення оптимальних параметрів багаторядних компресорних решіток за допомогою математичного моделювання. Але в цих роботах при створенні математичних моделей не враховувались ефекти тривимірного обтікання. Автори роботи [7] за допомогою чисельного експерименту розглядали задачу оптимізації форми лопатки компресора з метою підвищення ККД компресора. В роботі [8] розглядається задача розрахунку характеристики осьового компресора. Однак не наведено достатнього обґрунтування вибору розрахункової сітки.

При вирішенні задач чисельного моделювання течії в елементах компресора використовуються різні моделі турбулентної в'язкості. У роботі [9] рівняння Нав'є-Стокса замикаються моделлю турбулентної в'язкості SST, але не наводиться порівняння результатів з моделлю турбулентної в'язкості  $k-\epsilon$ . У роботі [10] запропоновано використання модифікованої моделі турбулентної в'язкості  $k-\omega$ , що забезпечує високу точність розрахункового дослідження течії в елементах осьового компресора. Але використання модифікованої моделі турбулентності  $k-\omega$  ускладнюється зміною програмного коду. У роботі [11] авторами представлені результати щодо вибору моделі турбулентної в'язкості при розрахунку втрат тиску в проточній частині газотурбінного двигуна. З двох розглянутих моделей (SST і  $k-\epsilon$ ) обґрунтовано вибір моделі турбулентної в'язкості  $k-\epsilon$ . Однак розрахунки проводилися для розрахункової сітки без адаптації примежевого шару.

Таким чином можна констатувати, що чисельний експеримент широко використовується для дослідження течії в елементах компресора. Однак результати робіт [4–11] показують, що для вирішення різних задач моделювання течії в елементах компресорів доцільне застосування різних моделей турбулентної в'язкості і топологій розрахункової сітки. Тому вирішення певного класу задач вимагає попереднього налаштування чисельного експерименту, тобто проведення тестових задач.

### 3. Мета і завдання дослідження

Мета даної роботи – порівняльна оцінка точності різних топологій розрахункової сітки і моделей турбулентної в'язкості для моделювання течії в ступені осьового компресора.

Для досягнення мети в роботі поставлені наступні задачі:

- створити 3D модель ступеня осьового компресора з різними варіантами топології розрахункової сітки;
- провести розрахункове дослідження та оцінити точність розрахунків;
- обґрунтувати застосування доцільних варіантів топологій розрахункової сітки і моделей турбулентної

в'язкості при розрахунках течії в ступені осьового компресора.

### 4. Метод дослідження течії в ступені осьового компресора

Для дослідження течії в ступені осьового компресора обрано метод чисельного експерименту. Чисельний експеримент включає наступні етапи [12]:

- побудова геометричної моделі;
- побудова розрахункової сітки;
- визначення початкових і граничних умов;
- чисельне вирішення задачі;
- візуалізація розв'язку задачі;
- аналіз розв'язку.

Для проведення дослідження в ступені осьового компресора використовувалась груба, дрібна та дрібноадаптивна неструктурована розрахункова сітка.

Розрахунок турбулентної течії газу виконувався шляхом чисельного розв'язання осереднених рівнянь Нав'є-Стокса. Під час чисельного моделювання течії використовувалися модель турбулентної в'язкості SST [13] і  $k-\epsilon$  [14].

Достовірність отриманих результатів забезпечувалась використанням апробованих методів розрахунку та оцінювалась узгодженням результатів розрахунків з даними експериментальних досліджень інших авторів [15].

### 5. Результати дослідження моделювання течії в ступені компресора

Об'єктом дослідження обрано ступінь осьового компресора (рис. 1), що складається з вхідного напрямного апарату (ВНА), робочого колеса (РК) і напрямного апарату (НА). Лопатковий вінець ВНА складається з 30 лопаток, РК і НА мають по 24 лопатки.

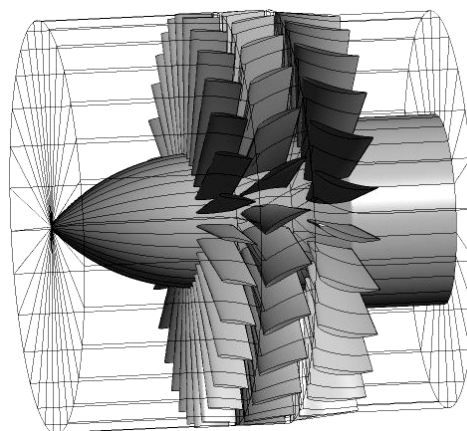


Рис. 1. 3D модель ступеня осьового компресора

На рис. 2 зображена схема і основні геометричні параметри дозвукової решітки лопаткового вінця осьового компресора.

Нижче, в табл. 1, приведено геометричні характеристики лопаткових вінців:  $r$  – радіус перерізу, мм;  $t/b$  – відносний крок решітки;  $\beta_1$  – кут входу потоку;  $\beta_2$  – кут виходу потоку;  $\gamma$  – кут між хордою профілю  $b$  і площиною обертання ротора.

Таблиця 1

Геометричні характеристики лопаткових вінців

Вхідний напрямний апарат					
г, мм	80	104	136	168	200
t/b	0.48	0.624	0.816	1.008	1.2
$\gamma$	89° 18'	87° 37'	85° 10'	83°	81° 46'
Робоче колесо					
г, мм	80	104	136	168	200
t/b	0.468	0.589	0.742	0.878	1.005
$\beta_1$	62° 37'	57° 55'	51° 47'	46° 42'	42° 09'
$\beta_2$	101° 43'	96° 27'	88° 30'	80° 03'	71° 13'
$\gamma$	85° 01'	80° 23'	73° 40'	66° 57'	60° 02'
Напрячний апарат					
г, мм	80	104	136	168	200
t/b	0.475	0.55	0.633	0.699	0.747
$\gamma$	76° 30'	74° 40'	72° 17'	69° 59'	67° 36'

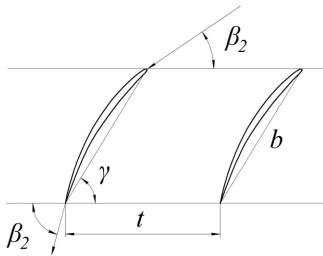


Рис. 2. Схема і основні геометричні параметри дозвучової решітки лопаткового вінця осевого компресора

Для коректного використання умови періодичності розрахункова область складалася з однієї лопатки і міжлопаткового каналу ВНА, однієї лопатки і міжлопаткового каналу РК, однієї лопатки і міжлопаткового каналу НА.

У даній роботі була проведена серія розрахунків з моделями турбулентної в'язкості k-ε, SST і трьома варіантами тривимірних неструктурованих розрахункових сіток. Досліджувались груба розрахункова сітка, дрібна розрахункова сітка і дрібна адаптивна розрахункова сітка (рис. 3).

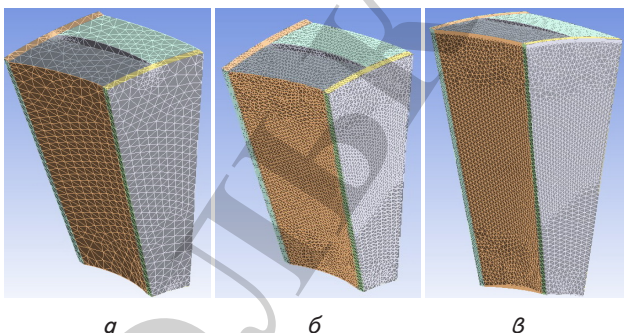


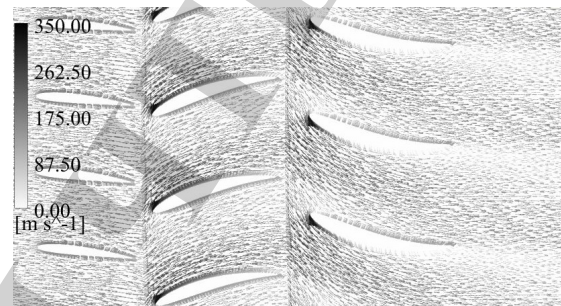
Рис. 3. Варіанти розрахункової сітки для робочого колеса ступеня осевого компресора: а – груба розрахункова сітка; б – дрібна розрахункова сітка; в – дрібна адаптивна розрахункова сітка

Розрахункова область для грубої сітки складалась з 162 тис. комірок, для дрібної сітки – 1.7 млн. комірок, дрібної адаптивної – 2.013 млн. комірок.

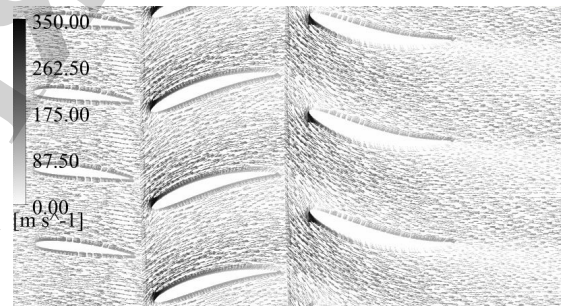
Для моделювання течії була обрана розрахункова схема другого порядку з локальним використанням розрахункової схеми першого порядку (High resolution). Це найбільш точна розрахункова схема для даного класу задач, яка закладена в програмному модулі [16].

Для кожного варіанта розрахункової сітки були проведені розрахунки з кожної з двох моделей турбулентної в'язкості при осевій швидкості на вході від 110 до 150 м/с.

На рис. 4 представлено миттєве векторне поле швидкостей на середньому радіусі ступеня осевого компресора для грубої сітки (варіант № 1) для двох моделей турбулентної в'язкості при осевій швидкості на вході 130 м/с.



а



б

Рис. 4. Миттєве векторне поле швидкостей на середньому радіусі ступеня осевого компресора для грубої сітки: а – модель турбулентної в'язкості k-ε; б – модель турбулентної в'язкості SST

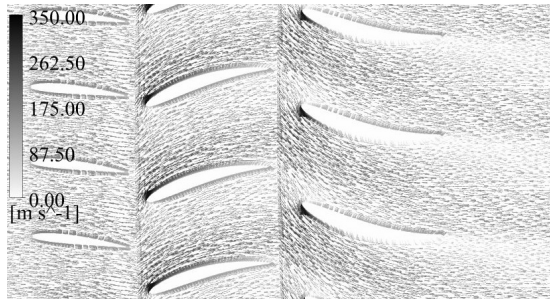
На рис. 4 якісна картина обтікання при різних моделях турбулентної в'язкості практично не відрізняється.

На рис. 5, 6 представлено миттєве векторне поле швидкостей на середньому радіусі ступеня осевого компресора для дрібної сітки і дрібної адаптивної сітки для двох моделей турбулентної в'язкості. Осьова швидкість на вході складала 130 м/с.

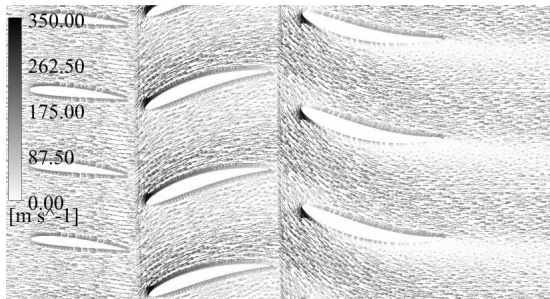
На рис. 5, 6 видно, що картина обтікання має різний характер при моделюванні течії з різними моделями турбулентності для дрібної і дрібної адаптивної розрахункових сіток.

З метою проведення оцінки точності розрахункового дослідження в роботі проведено порівняльний аналіз результатів фізичного [15] та чисельного експериментів.

На рис. 7, 8 показані залежність ступеня підвищення тиску в ступені осевого компресора від коефіцієнта швидкості.



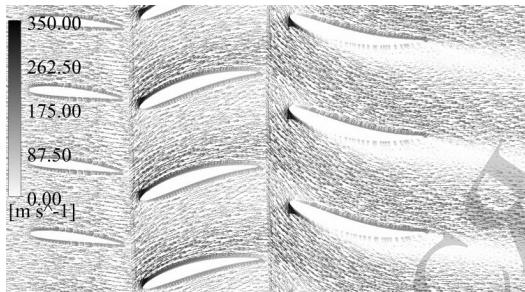
а



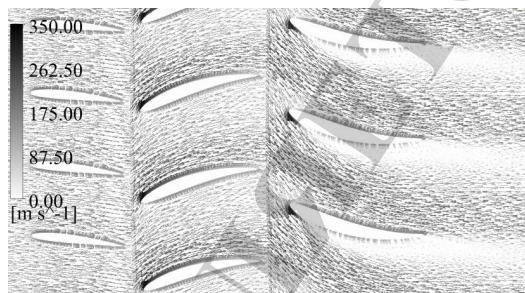
б

Рис. 5. Миттєве векторне поле швидкостей на середньому радіусі ступеня осьового компресора для дрібної сітки:

а – модель турбулентної в'язкості k-ε;  
 б – модель турбулентної в'язкості SST



а



б

Рис. 6. Миттєве векторне поле швидкостей на середньому радіусі ступеня осьового компресора для дрібної адаптивної сітки: а – модель турбулентної в'язкості k-ε; б – модель турбулентної в'язкості SST

Ступінь підвищення тиску визначається за формулою:

$$\pi = \frac{p_2}{p_1}, \tag{1}$$

де  $p_1$  – повний тиск на вході в ступінь,  $p_2$  – повний тиск на виході із ступеня.

Коефіцієнт швидкості визначається зі співвідношення:

$$\lambda = \frac{c}{a}, \tag{2}$$

де  $c$  – осьова швидкість потоку на вході,  $a$  – швидкість звуку.

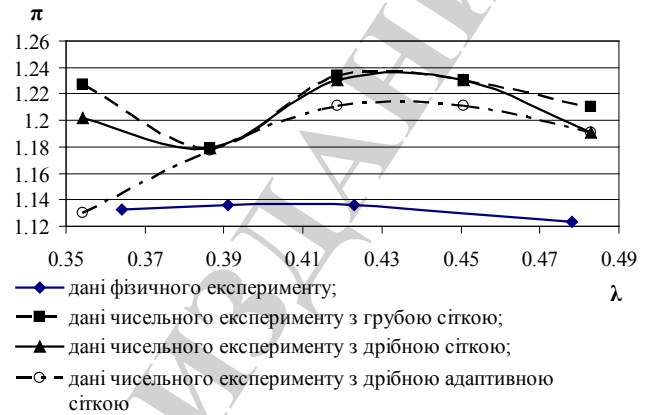


Рис. 7. Залежність ступеня підвищення тиску в ступені осьового компресора  $\pi$  від коефіцієнта швидкості  $\lambda$  при розрахунку з моделлю турбулентної в'язкості SST

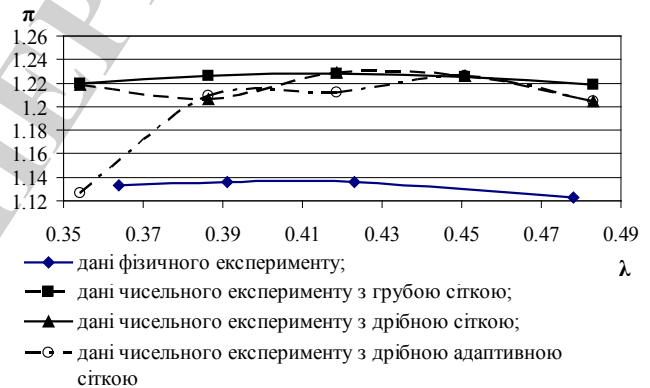


Рис. 8. Залежність ступеня підвищення тиску в ступені осьового компресора  $\pi$  від коефіцієнта швидкості  $\lambda$  при розрахунку з моделлю турбулентної в'язкості k-ε

Також для більш детального порівняння на рис.9 представлені результати чисельного розрахунку для двох моделей турбулентної в'язкості для дрібної адаптивної розрахункової сітки.

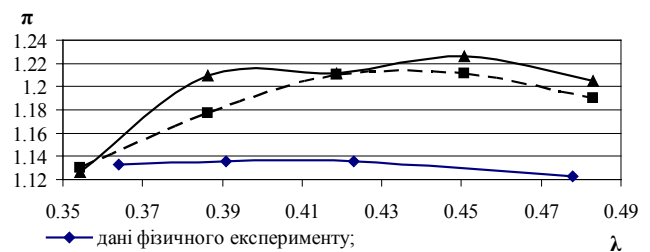


Рис. 9. Залежність ступеня підвищення тиску в ступені осьового компресора  $\pi$  від коефіцієнта швидкості  $\lambda$  для двох моделей турбулентної в'язкості

Графічні залежності на рис. 9 показують, що модель турбулентної в'язкості SST забезпечує меншу похибку при розрахунках параметрів потоку в ступені осьового компресора.

## 6. Обговорення результатів дослідження моделювання течії в ступені осьового компресора

Моделювання течії здійснювалось для ступеня осьового компресора з параметрами, аналогічними параметрам ступеня Д-1 [15]. Результати проведеного чисельного моделювання течії для двох моделей турбулентної в'язкості і трьох варіантів розрахункових сіток дозволяють порівняти точність при розрахунках. Достовірність результатів розрахункових досліджень моделювання течії в ступені осьового компресора оцінювалась похибкою із застосуванням залежності:

$$\delta = \left| \frac{\pi_e - \pi}{\pi_e} \right| \cdot 100 \%, \quad (3)$$

де  $\pi_e$  – ступінь підвищення тиску за результатами фізичного експерименту [15],  $\pi$  – ступінь підвищення тиску, отримана за результатами розрахункового дослідження.

Моделювання течії з використанням моделі турбулентної в'язкості  $k-\epsilon$  має наступну похибку:

- для грубої сітки 7.7–8.5 %;
- для дрібної сітки 7.6–8.5 %;
- для дрібної адаптивної сітки 0.6–8.4 %.

Похибка розрахунків для моделювання течії в ступені компресора з моделлю турбулентної в'язкості SST складає:

- для грубої сітки 3.8–8.6 %;
- для дрібної сітки 3.8–8.5 %;
- для дрібної адаптивної розрахункової сітки 0.3–6.5 %.

Згідно з розрахунками моделі турбулентної в'язкості SST і  $k-\epsilon$  показують похибки одного порядку.

Проте для вирішення задач внутрішньої аеродинаміки компресорів необхідно досить точно моделювати течію в примежевому шарі. Результати чисельних досліджень свідчать про те, що модель турбулентної в'язкості SST більш точно описує течію в примежевому шарі, ніж модель турбулентності  $k-\epsilon$ .

Векторне поле швидкостей для дрібної адаптивної сітки для двох моделей турбулентності (рис. 6) ілюструє відмінність у характері обтікання. Точка відриву примежевого шару на лопатках напрямного апарату при розрахунку з моделлю SST розташована вище, також можна помітити відмінність в характері обтікання в сліді за лопатками напрямного апарату. Однак на розрахунки, які проводилися з моделлю турбулентної в'язкості SST, треба було більше машинного часу. Таким чином, на першому етапі проектування для економії машинного часу можна рекомендувати використання моделі турбулентної в'язкості  $k-\epsilon$  і грубу сітку. Надалі, при більш детальному вивченні втрат і характеру течії в примежевому шарі і аеродинамічних слідах необхідне використання моделі турбулентної в'язкості SST і дрібної адаптивної сітки.

Результати, отримані в даній роботі, планується використовувати при вирішенні задач відривної течії в ступенях осьових компресорів та вентиляторів.

## 7. Висновки

1. Застосована 3D модель ступеня осьового компресора з різними варіантами топології розрахункової сітки дозволяє визначати параметри течії при застосуванні різних моделей турбулентної в'язкості. Модель ступеня осьового компресора з дрібною адаптивною сіткою дає можливість детально досліджувати параметри примежевого шару.

2. Отримано результати розрахункового дослідження течії із застосуванням моделей турбулентної в'язкості SST і  $k-\epsilon$ . Порівняння результатів чисельного та фізичного експериментів показало, що застосування моделей турбулентної в'язкості SST і  $k-\epsilon$  забезпечує визначення параметрів потоку з похибками 0.3–8.6 %.

3. Результати дослідження показали, що на першому етапі розрахунку ступеня осьового компресора можна рекомендувати використання моделі турбулентної в'язкості  $k-\epsilon$  і грубу розрахункову сітку. Для вирішення задач внутрішньої аеродинаміки компресорів з урахуванням течії в примежевому шарі і аеродинамічних слідах є доцільне використання моделі турбулентної в'язкості SST і дрібної адаптивної сітки.

## Література

1. Терещенко, Ю. М. Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров [Текст] / Ю. М. Терещенко. – М.: Машиностроение, 1987. – 168 с.
2. Брусиловский, И. В. Аэродинамика осевых вентиляторов [Текст] / И. В. Брусиловский. – М.: Машиностроение, 1984. – 240 с.
3. Pinto, R.N. Computational Fluid Dynamics in Turbomachinery: A Review of State of the Art [Text] / R. N. Pinto, A. Afzal, L. V. D'Souza, Z. Ansari, A. D. M. Samee // Archives of Computational Methods in Engineering. – 2016. doi: 10.1007/s11831-016-9175-2
4. Naseri, A. Numerical investigation of effect of inlet swirl and total-pressure distortion on performance and stability of an axial transonic compressor [Text] / A. Naseri, M. Boroomand, S. Sammak // Journal of Thermal Science. – 2016. – Vol. 25, Issue 6. – P. 501–510. doi: 10.1007/s11630-016-0891-6
5. Терещенко, Ю. М. Моделирование течения в компрессорных решетках при больших углах атаки [Текст] / Ю. М. Терещенко, Е. В. Дорошенко, Дж. Аболхассан заде // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 4, № 8 (76). – С. 26–30. doi: 10.15587/1729-4061.2015.47206
6. Терещенко, Ю. М. Исследование влияния соотношения хорд профилей на аэродинамические характеристики двухрядной компрессорной решетки [Текст] / Ю. М. Терещенко, Е. В. Дорошенко, Дж. Аболхассан заде // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 5, № 8 (77). – С. 9–13. doi: 10.15587/1729-4061.2015.50535

7. Song, P. Blade shape optimization for transonic axial flow fan [Text] / P. Song, J. Sun // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2015. – Vol. 29, Issue 3. – P. 931–938. doi: 10.1007/s12206-015-0207-x
8. Janke, C. Compressor map computation based on 3D CFD analysis [Text] / C. Janke, D. Bestle, B. Becker // CEAS Aeronautical Journal. – 2015. – Vol. 6, Issue 4. – P. 515–527. doi: 10.1007/s13272-015-0159-y
9. Yin, S. Application and comparison of SST model in numerical simulation of the axial compressors [Text] / S. Yin, D. Jin, X. Gui, F. Zhu // Journal of Thermal Science. – 2010. – Vol. 19, Issue 4. – P. 300–309. doi: 10.1007/s11630-010-0387-8
10. Liu, Y. Modified  $k-\omega$  model using kinematic vorticity for corner separation in compressor cascades [Text] / Y. Liu, H. Yan, L. Fang, L. Lu, Q. Li, L. Shao // Science China Technological Sciences. – 2016. – Vol. 59, Issue 5. – P. 795–806. doi: 10.1007/s11431-015-6005-y
11. Кривошеев, И. А. Выбор модели турбулентности при расчете потерь давления в проточной части ГТД с использованием программного комплекса Ansys CFX [Текст] / И. А. Кривошеев, А. Ю. Чечулин, Ю. А. Хохлова // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т. 15, № 2 (42). – С. 68–73.
12. Быков, Л. В. Вычислительная механика сплошных сред в задачах авиационной и космической техники [Текст] / Л. В. Быков, А. М. Молчанов, М. А. Щербаков, Д. С. Янышев. – М.: ЛЕНАНД, 2015. – 668 с.
13. Menter, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [Text] / F. R. Menter // AIAA Journal. – 1994. – Vol. 32, Issue 8. – P. 1598–1605. doi: 10.2514/3.12149
14. Юн, А. А. Теория и практика моделирования турбулентных течений [Текст] / А. А. Юн. – М.: Либроком, 2009. – 274 с.
15. Свечников, В. С. Аэродинамические характеристики ступени осевого компрессора [Текст] / В. С. Свечников, А. Б. Кириллов. – М.: ЦАГИ, 1958. – 94 с.
16. Бойко, А. В. Применение вычислительной аэродинамики к оптимизации лопаток турбомашин [Текст] / А. В. Бойко, Ю. Н. Говорущенко, М. В. Бурлака. – Х.: НТУ «ХПИ», 2012. – 192 с.

