

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСЗВУКОВОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В РАБОЧЕМ КОЛЕСЕ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА

Данная работа посвящена численному моделированию трансзвукового турбулентного течения в рабочем колесе осевого компрессора Rotor 67 с применением открытого программного кода OpenFOAM. Рассмотрен вопрос выбора модели турбулентности при численном моделировании трансзвуковых течений. Выполнено сравнительное тестирование моделей турбулентности Спаларта–Аллмараса, стандартной  $k-\epsilon$  модели и SST модели Ментера на задаче о моделировании течения в трансзвуковом диффузоре. По результатам исследований предпочтение отдано модели турбулентности Спаларта–Аллмараса. Выполнено численное моделирование течения в плоской диффузорной решетке профилей. Использована многоблочная расчетная сетка O-типа. Полученные в результате зависимости аэродинамических характеристик от скорости потока на входе в решетку удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Показано, что точность аппроксимации передней и задней кромок профиля не влияет на точность расчета аэродинамических характеристик решетки. Выполнено численное моделирование трехмерного трансзвукового турбулентного течения в рабочем колесе Rotor 67. Геометрическая модель реализована без зазора между лопатками и поверхностью периферии. Для аппроксимации расчетной области использована многоблочная расчетная сетка H-типа. Полученная в результате зависимость степени повышения полного давления от массового расхода газа в рабочем колесе согласуется с экспериментальными данными, а также расчетами других авторов. Полученные результаты подтверждают возможность применения открытого кода OpenFOAM к решению задач, связанных с численным моделированием течений в лопаточных венцах осевых компрессоров.

Дана робота присвячена числовому моделюванню трансзвукової турбулентної течії в робочому колесі осевого компресора Rotor 67 з використанням відкритого програмного коду OpenFOAM. Розглянуто питання вибору моделі турбулентності при числовому моделюванні трансзвукових течій. Виконано порівняльне тестування моделей турбулентності Спаларта–Аллмараса, стандартної  $k-\epsilon$  моделі і SST моделі Ментера на задачі про моделювання течії в трансзвуковому дифузорі. За результатами досліджень перевагу віддано моделі турбулентності Спаларта–Аллмараса. Виконано числове моделювання течії у плоскій дифузійній решітці профілів. Використано багатоблочну розрахункову сітку O-типу. Отримані в результаті залежності аеродинамічних характеристик від швидкості потоку на вході у решітку задовільно узгоджуються з експериментальними даними. Показано, що точність аппроксимации передньої і задньої кромок профілю не впливає на точність розрахунку аеродинамічних характеристик решітки. Виконано числове моделювання тривимірної трансзвукової турбулентної течії в робочому колесі Rotor 67. Геометрична модель реалізована без зазору між лопатками і поверхнею периферії. Для апроксимации розрахункової області використано багатоблочну розрахункову сітку H-типу. Отримана в результаті залежність ступеня підвищення повного тиску від масової витрати газу в робочому колесі узгоджується з експериментальними даними, а також розрахунками інших авторів. Отримані результати свідчать про можливість застосування відкритого коду OpenFOAM до розв'язання задач, пов'язаних з числовим моделюванням течій у лопаткових вінцях осевих компресорів.

The work discusses the numerical simulation of a transonic turbulent flow through impeller of the Rotor 67 axial compressor with the application of the OpenFOAM open programming code. The selection of the turbulence model for the numerical simulation of transonic flows is considered. The Spalart–Allmaras turbulence models, a standard  $k-\epsilon$  model and SST Menter turbulence models are comparatively tested solving the problem of the simulation of the flow through transonic diffuser. According to the results, preference is given to the Spalart–Allmaras turbulence model. Numerical simulation of the flow through plane diffuser profile in cascade is done. The multiple-block computational grid of the O-type is used. The resulting dependences of the aerodynamic characteristics on the flow velocity through cascade inlet are in satisfactory agreement with the experimental data. It is shown that the accuracy of the approximation of the profile front and rear edges does not affect the accuracy of calculations of the cascade aerodynamic characteristics. The three-dimensional transonic turbulent flow through Rotor 67 impeller is numerically simulated. The geometric model is realized without a gap between the blades and the surface of the periphery. A multiple-block computational grid of the H-type is employed for the approximation of the computational region. The derived dependence of the degree of a total pressure increase on the gas mass flow through impeller is consistent with the experimental data and calculations of other authors. The results confirm the applicability of the OpenFOAM open code for solving problems related to the numerical simulation of the flow through blade wheels of axial compressors.

**Введение.** Осевые компрессоры находят самое широкое применение во всех базовых отраслях промышленности (металлургии, химической и нефтехимической и др.). В основе экономичного использования осевых компрессоров лежит газодинамическое совершенство их проточной части. Этап раз-

© С.В. Мелашич, Ю.А. Кваша, 2014

работки компрессоров имеет большое значение и обычно включает экспериментальную проверку и доводку натуральных образцов или их моделей. Длительность и стоимость экспериментов, вероятность получения высокого к. п. д. и обеспечения других важных качеств определяются совершенством методов расчёта и проектирования [1].

Появление программных пакетов вычислительной гидрогазодинамики поставило вопрос о возможности использовании таких программ для проектирования турбомашин. Численный эксперимент имеет ряд преимуществ. Он дешевле и быстрее натурального, легко повторяем, позволяет изучить отдельные факторы вне взаимосвязи с другими и т. д.

Постановка задачи корректного расчета турбулентного течения в проточной части компрессора не проста. Во-первых, любой численный метод связан с некоторой погрешностью, так как вместо сплошной среды оперирует набором элементов конечного размера. Необходимо так разбить расчетную область расчетной сеткой, чтобы свести к минимуму влияние этого разбиения на результаты расчета. Во-вторых, необходимость вводить те или иные эмпирические законы турбулентности, ни один из которых не может быть универсальным, т. е. соответствовать разным законам течения, существующим в проточной части. Таким образом, требуется выбрать подходящую модель турбулентности. Указанные особенности постановки расчета требуют детального изучения возможностей применяемого программного пакета и настройки его для решения выбранного класса задач.

Следует отметить, что у существующих коммерческих программных пакетов, таких как STAR-CD, Fluent, Ansys CFX и других, позволяющих в единой программной оболочке произвести полный набор инженерных расчетов в интересующей области, есть два недостатка. Это высокая стоимость и строгие ограничения лицензии, а также закрытый исходный код.

В настоящей работе рассматривается процесс численного моделирования трехмерного течения в рабочем колесе осевого компрессора с помощью открытых программных средств – кода OpenFOAM для проведения расчетов и анализа полученных данных и платформы SALOME для построения исходных моделей и расчетных сеток. В основе кода OpenFOAM лежит набор библиотек, предоставляющих инструменты для решения систем дифференциальных уравнений в частных производных, что позволяет использовать его как самостоятельный продукт, так и в качестве компонентов разрабатываемых пакетов.

Несмотря на то, что на сегодняшний день достаточно большое число работ посвящено верификации кода OpenFOAM [2 – 5], публикаций, связанных с его применением в области турбомашин, достаточно мало. Таким образом, целью данной работы является численное моделирование трансзвукового турбулентного течения в рабочем колесе осевого компрессора Rotor 67 с применением открытого программного кода OpenFOAM.

**Течение в трансзвуковом диффузоре.** Ввиду описанных во введении сложностей решения задачи расчета турбулентного течения в проточной части компрессора, рассматривается вопрос о выборе модели турбулентности с целью ее последующего использования при расчетах. Рассмотрены следующие модели турбулентности, наиболее часто используемые при численном моделировании течений в турбомашинах. Это стандартная  $k-\varepsilon$  модель [6], модель Спаларта–Аллмараса [7] и SST  $k-\omega$  модель Ментера [8].

С целью оценки точности результатов, получаемых с использованием каждой из моделей, при решении задач, связанных с трансзвуковыми турбулентными течениями, выполнено численное моделирование течения в трансзвуковом диффузоре Сейбена [9]. Использована расчетная сетка, состоящая из 200x260 ячеек со сгущением к твердым границам.

Полученное в результате численного моделирования распределение чисел Маха в диффузоре для режима «сильного скачка» приведено на рис. 1, а.

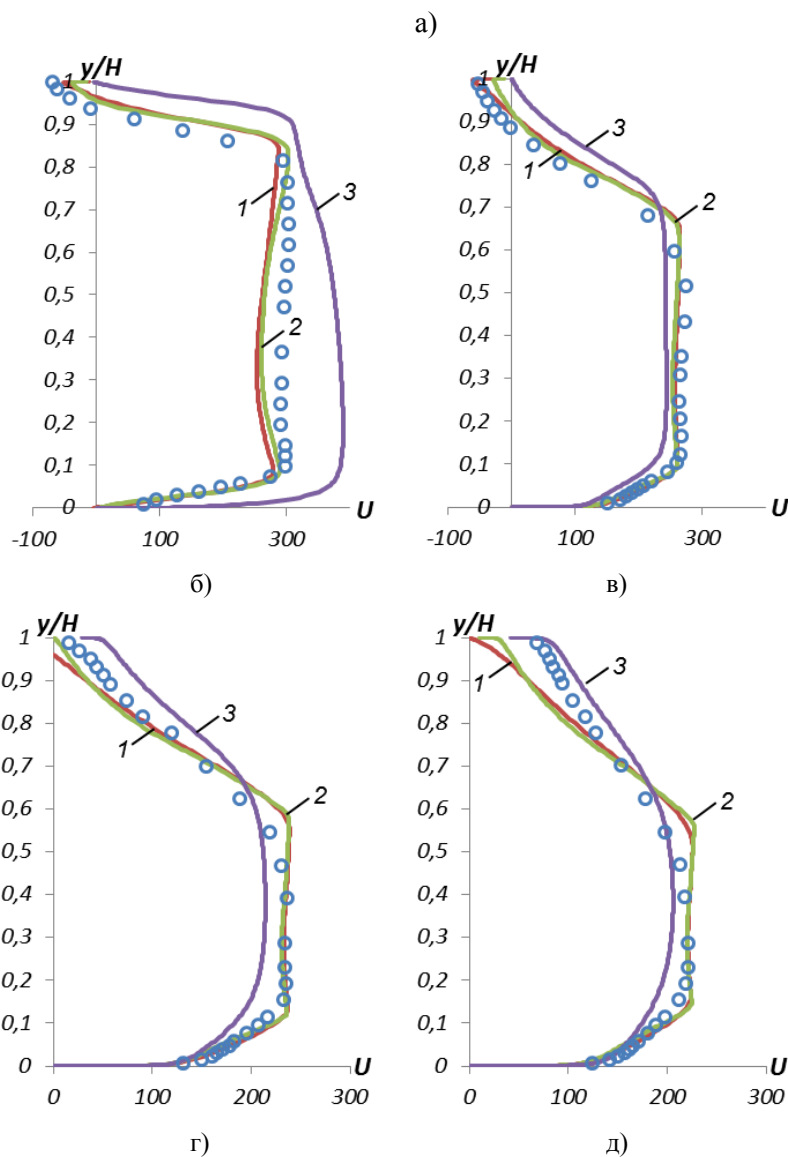
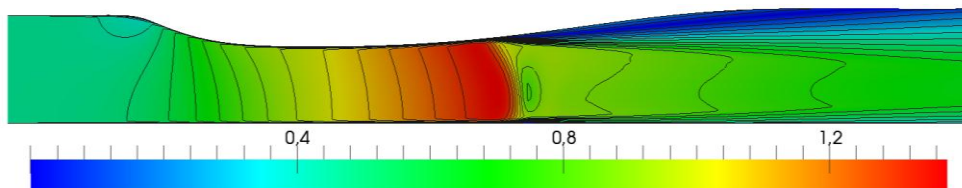


Рис. 1

Также на рис. 1 представлены профили скоростей, полученные в сечениях  $x/h^* = 2,882$  (рис. 1, б),  $x/h^* = 4,611$  (рис. 1, в),  $x/h^* = 6,34$  (рис. 1, г),  $x/h^* = 7,493$  (рис. 1, д) диффузора с использованием различных моделей турбулентности. Используются следующие обозначения:  $h^*$  – высота самой узкой части диффузора;  $x, y$  – продольная и поперечная координаты относительно направления течения в диффузоре;  $H$  – локальная высота сечения;  $U$  – продольная компонента скорости газа.

Результаты, обозначенные на рис. 1 позициями 1, 2, 3, получены с использованием модели Спаларта–Аллмараса, SST  $k-\omega$  модели Ментера и стандартной  $k-\varepsilon$  модели соответственно. Экспериментальные данные показаны маркерами.

Из рис. 1 видно, что результаты, полученные с использованием стандартной  $k-\varepsilon$  модели турбулентности, наиболее сильно отличаются от имеющихся экспериментальных данных. Результаты, полученные с использованием модели Спаларта–Аллмараса и SST модели Ментера, более удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными и незначительно различаются между собой. В дальнейшем будем использовать модель Спаларта–Аллмараса, поскольку в силу своей простоты она требует значительно меньших вычислительных затрат.

**Течение в диффузорной решетке профилей.** Дальнейшее исследование пакета проведено с использованием результатов численного моделирования трансзвукового турбулентного течения в диффузорной решетке профилей А. И. Бунимовича № 1 [10] для угла атаки  $0^\circ$ . Для аппроксимации расчетной области использована многоблочная расчетная сетка, близкая к O-типу, что позволило качественно аппроксимировать переднюю и заднюю кромки профиля решетки (рис. 2). Сгущение сетки в окрестности профиля позволяло в достаточной мере разрешить течение в пограничном слое.

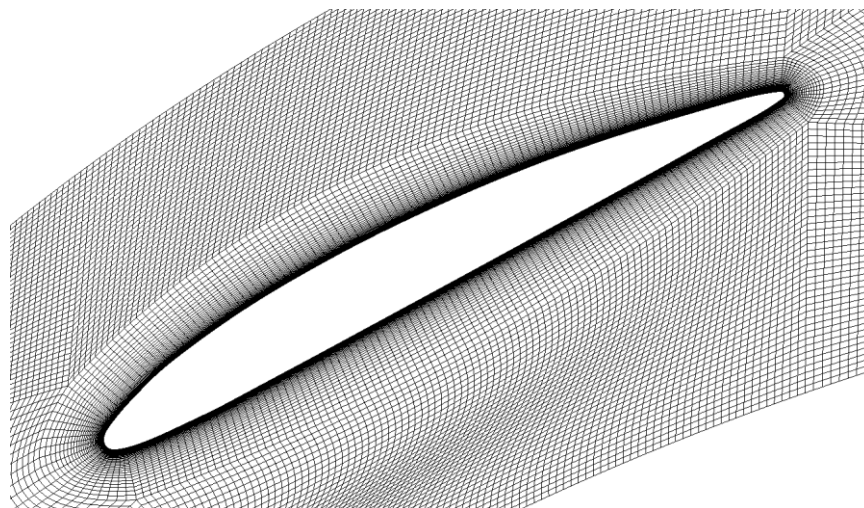


Рис. 2

На рис. 3 представлено распределение чисел Маха в окрестности решетки, полученное для режима записания.

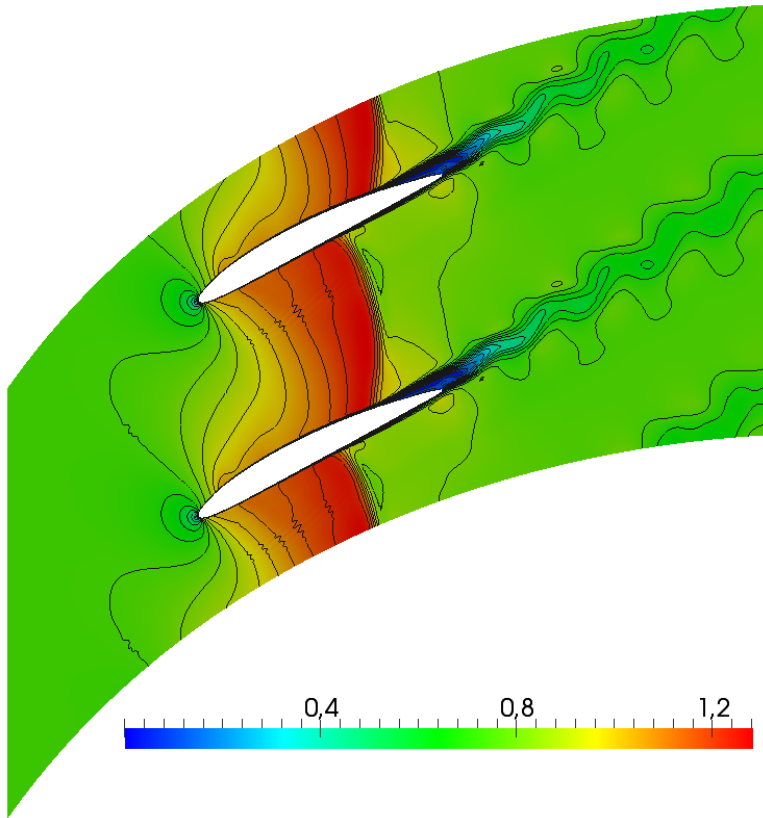


Рис. 3

На рис. 4 приведены полученные в результате численного моделирования зависимости коэффициента потерь полного давления  $\zeta$  и угла поворота потока  $\Delta\beta$  от числа Маха на входе в решетку  $M_1$ . Численные результаты показаны сплошными линиями, а экспериментальные данные [10] – с помощью маркеров.

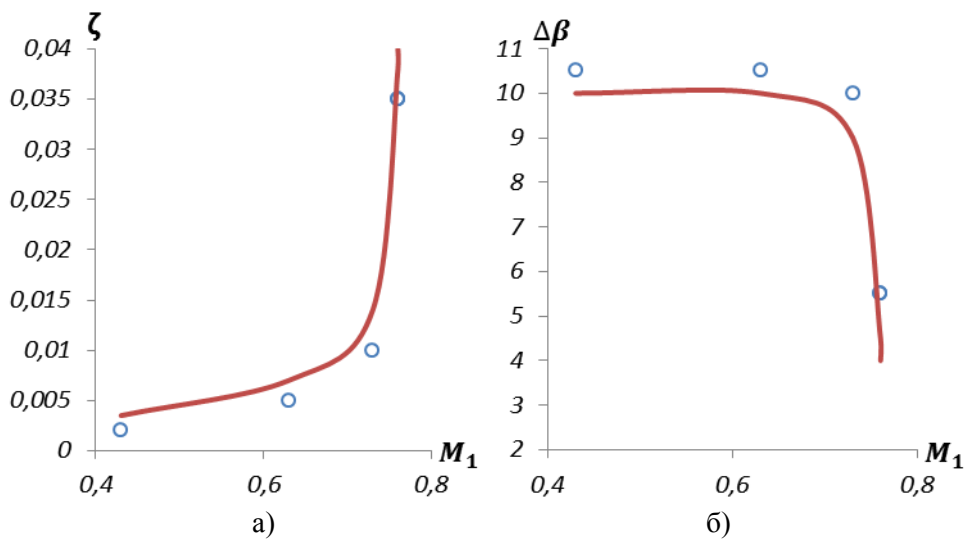


Рис. 4

В работе [11] аналогичные результаты получены с использованием расчетной сетки Н-типа, которая не позволяет с высокой точностью аппроксимировать формы кромок профиля. Сравнивая полученные результаты и результаты работы [11], можно сделать вывод, что нет необходимости в детальной аппроксимации кромок профиля, поскольку это не приводит к повышению точности расчета аэродинамических характеристик решетки.

**Течение в рабочем колесе Rotor 67.** Рабочее колесо Rotor 67 представляет собой ротор трансзвукового вентилятора [12]. Проектировочное значение степени повышения полного давления составляет 1,63 при массовом расходе 33,25 кг/с. Проектировочная скорость вращения составляет 16043 оборотов в минуту, что соответствует скорости движения концов лопаток 429 м/с. Ротор состоит из 22 лопаток.

На рис. 5 представлена геометрическая модель рабочего колеса с расчетной областью. В рамках данной геометрической модели не учитывалось наличие зазора между лопатками и поверхностью периферии. Аппроксимация расчетной области выполнена с помощью многоблочной расчетной сетки Н-типа, которая также приведена на рис. 5.

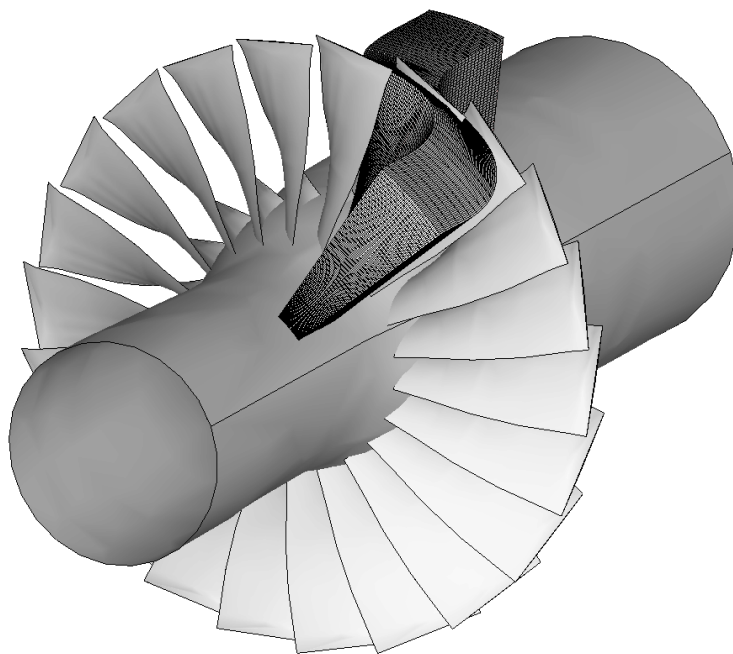


Рис. 5

В качестве граничных условий задавались полное давление на входе в расчетную область, статическое давление на выходе из нее. На границах периодичности области задавались условия периодичности. На всех твердых поверхностях задавались граничные условия прилипания с законом стенки для параметров модели турбулентности [13].

На рис. 6 представлено полученное в результате численного моделирования распределение давления для значения расхода 32,25 кг/с.

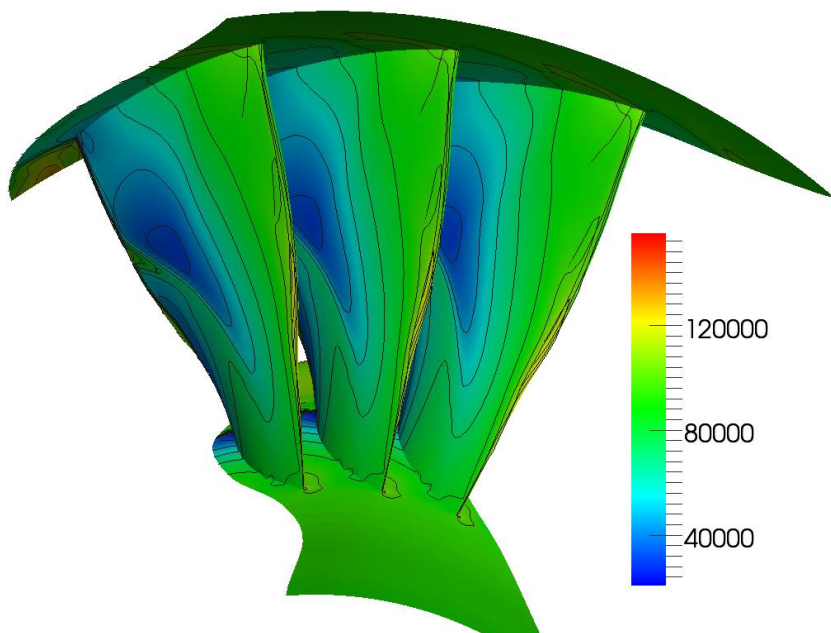


Рис. 6

В результате проведенных расчетов получена зависимость степени повышения полного давления  $\tilde{\pi}^*$  от приведенного расхода  $\tilde{m}$ , который рассчитывается как отношение текущего значения расхода к проектировочному значению (рис. 7).

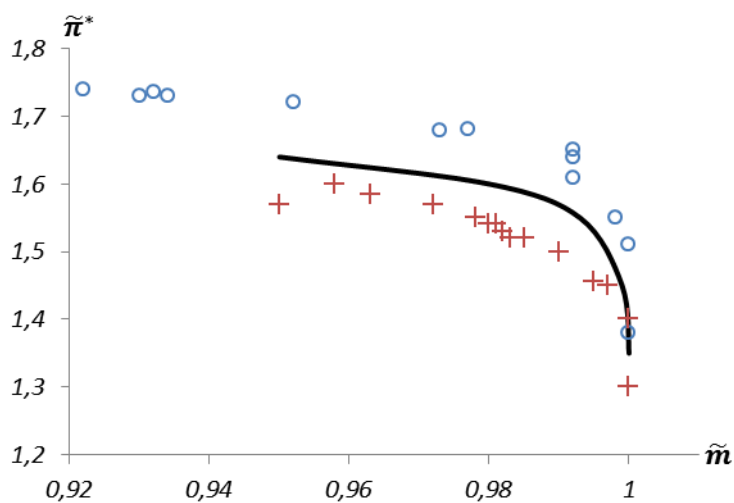


Рис. 7

На рис. 7 сплошной линией показаны полученные результаты. Маркерами «о» показаны экспериментальные данные [12], а «+» – численные результаты работы [14].

**Выводы.** Данная работа посвящена численному моделированию трансзвукового турбулентного течения в рабочем колесе осевого компрессора Rotor 67 с применением открытого программного кода OpenFOAM.

Рассмотрен вопрос выбора модели турбулентности при численном моделировании трансзвуковых течений. Выполнено сравнительное тестирование моделей турбулентности Спаларта–Аллмараса, стандартной  $k-\epsilon$  модели и SST модели Ментера на задаче о моделировании течения в трансзвуковом диффузоре. По результатам исследований предпочтение отдано модели турбулентности Спаларта–Аллмараса.

Выполнено численное моделирование течения в плоской диффузорной решетке профилей. Использована многоблочная расчетная сетка О-типа. Полученные в результате зависимости аэродинамических характеристик удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Показано, что точность аппроксимации передней и задней кромок профиля не влияет на точность расчета аэродинамических характеристик решетки.

Выполнено численное моделирование трехмерного трансзвукового турбулентного течения в рабочем колесе Rotor 67. Геометрическая модель реализована без зазора между лопатками и поверхностью периферии. Использована многоблочная расчетная сетка Н-типа. Полученная в результате зависимость степени повышения полного давления от расхода газа в рабочем колесе согласуется с экспериментальными данными, а также результатами расчетов других авторов.

1. *Иноземцев А. А.* Газотурбинные двигатели / *А. А. Иноземцев, В. Л. Сандрацкий.* – Пермь : ОАО «Авиадвигатель», 2006. – 1202 с.
2. Numerical simulation of natural convection phenomena / *S. F. Corzo, S. M. Damián, D. Ramajo, N. M. Nigro* // *Mecánica Computacional.* – 2011. – Vol. 30. – P. 277 – 296.
3. *Lin Gao.* Numerical Simulation of Turbulent Flow past Airfoils on OpenFOAM / *Lin Gao, Jinglei Xu, Ge Gao* // *Procedia Engineering.* – 2012. – Vol. 31. – P. 756 – 761.
4. Numerical Simulation of the Dynamic Stall of a NACA 0012 Airfoil Using DES and Advanced OES/URANS Modelling / *G. Martinat, Y. Hoarau, M. Braza, J. Vos, G. Harran* // *Adv. in Hybrid RANS-LES Modelling.* – 2008. – NNFM 97. – P. 271 – 278.
5. Numerical Flow Simulation of Centrifugal Pump in ANSYS and OpenFOAM / *M. A. Habib, S. B. Barve, S. P. Shisode, S. U. Shinde* // *International Journal of Current Engineering and Technology.* – 2014. – Special Issue 3. – P. 98 – 102.
6. *Launder B. E.* The Numerical Computation of Turbulent Flows / *B. E. Launder, D. B. Spalding* // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.* – 1974. – Vol. 3. – P. 269 – 289.
7. *Spalart P. R.* A one-equation turbulence model for aerodynamic flow / *P. R. Spalart, S. R. Allmaras* // *AIAA Paper.* – 1992. – Vol. 12, No 1. – P. 439 – 478.
8. *Menter F. R.* Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications / *F. R. Menter* // *AIAA Journal.* – 1994. – Vol. 32, N 8. – P. 1598 – 1605.
9. *Богар Т. Дж.* Экспериментальное исследование параметров течения и характерных частот возмущений в сверхзвуковых диффузорах / *Т. Дж. Богар, М. Сейбен, Дж. К. Кроутил* // *Аэрокосмическая техника.* – 1984. – Т. 2, № 5. – С. 3 – 14.
10. *Бунимович А. И.* Аэродинамические характеристики плоских компрессорных решеток при большой дозвуковой скорости / *А. И. Бунимович, А. А. Святогоров* // *Лопаточ. машины и струйн. аппараты.* – М. : Машиностроение, 1967. – Вып. 2. – 97 с.
11. *Кваша Ю. А.* Численное моделирование плоского турбулентного течения газа в компрессорных решетках / *Ю. А. Кваша, С. В. Мелашин* // *Техническая механика.* – 2007. – №2. – С. 67 – 73.
12. Laser Anemometer Measurements in a Transonic Axial-Flow Fan Rotor / *A. J. Strazisar, J. R. Wood, M. D. Hathaway, K. L. Suder* // *NASA Technical Paper.* – 1989. – N 2879. – 220 p.
13. OpenFoam User Guide [электронный ресурс]. – OpenFOAM Foundation. – Режим доступа: <http://www.openfoam.org/docs/user/>
14. *Reis A. J. F.* Validation of NASA Rotor 67 with OpenFOAM's Transonic Density-Based solver / *A. J. F. Reis* // *Dissertacao para obtencao do Grau de Mestre em Engenharia Mecanica.* – Faculdade de Ciencias e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa : 2013. – 141 p.

Институт технической механики  
Национальной академии наук Украины и  
Государственного космического агентства Украины,  
Днепропетровск

Получено 16.09.14  
в окончательном варианте 29.09.14