УДК 621.431.75

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЕТОЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДОЗВУКОВЫХ И СВЕРХЗВУКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ В КОНФУЗОРНЫХ КАНАЛАХ

© 2013 А.В. Кривцов, В.М. Зубанов, О.В. Батурин, Д.А. Колмакова

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 02.12.2013

Представлены результаты газодинамического моделирования плоских турбинных решеток. Исследовалась сеточная сходимость решения при различных моделях турбулентности. Также для одной из расчетных сеток проводилось исследование влияния сеточной густоты в различных зонах на получаемые результаты.

Ключевые слова: плоские турбинные решетки, модель турбулентности, сеточная дискретизация, моделирование.

Современные CFD-методы ускоряют процесс разработки новых изделий, позволяют указать на слабые стороны уже существующих, но возникает вопрос о достоверности получаемых результатов. Точность результатов, получаемых с помощью данных расчётов, зависит от выбора моделей турбулентности, а также от количества элементов расчетной сетки [1, 2, 3]. Целью данной работы является исследование влияния различных моделей турбулентности на результаты расчетов и их согласование с экспериментальными данными, определение степени влияния различных параметров сетки на получаемую структуру потока.

В ходе данной работы исследование проводилось на плоской турбинной решетке № 34. Геометрические и верификационные данные были получены из атласа экспериментальных характеристик плоских решеток газовых турбин [4]. СFD – расчеты проводились в программном комплексе *NUMECA Fine Turbo*. Использованная сеточная модель содержала один межлопаточный канал, с наложением граничных условий периодичности. На входе модели задавалось полное давление и температура, на выходе статическое давление. Работа проводилась в несколько этапов:

1) Исследование моделей турбулентности на «грубой» сетке.

Кривцов Александр Васильевич, аспирант кафедры теории двигателей летательных аппаратов. E-mail: a2000009@rambler.ru Зубанов Василий Михайлович, студент. E-mail: waskes91@gmail.com Батурин Олег Витальевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов. E-mail: udet@mail.ru Колмакова Дарья Алексеевна, аспирант кафедры теории двигателей летательных аппаратов. 2) Исследование моделей турбулентности на «точной» сетке.

 Исследование влияния качества локальной сеточной дискретизации на получаемые результаты.

На первом этапе работы была построена грубая сетка: общее число элементов 300 тысяч, размер ближайшего к стенке элемента 0,5 мм, безразмерный коэффициент сетки $y^+ \approx 140$. Топология сеточной модели межлопаточного канала показана на рис. 1.

Проведены расчеты характеристик решетки 34 на различных режимах работы ($\lambda = 0.7$; $\lambda = 0.8$; $\lambda = 0.89$; $\lambda = 1.0$; $\lambda = 1.09$; $\lambda = 1.2$; $\lambda = 1.3$; $\lambda = 1.4$) с использованием различных моделей турбулентности: Spalart – Allmaras (SA), Spalart – Allmaras Extended Wall Function (SA EWF), k – epsilon Extended Wall Function (k-e EWF), k – epsilon Low Re Yang – Shih (k-e LRYSh), SST, SST Extended Wall Function (SST EWF), v 2f, Baldwin-Lomax (BL).

Из-за большого размера ближайшего к стенке элемента наименьше расхождение дала модель SA (рис. 2) (в области «горла» менее 1% по оси $\lambda_{a,a}$ и менее 14,5% по оси \bar{s} , в области «за горлом» менее 11% по оси $\lambda_{a,a}$, по оси \bar{s} – менее 18,5% на режиме $\lambda_{a,a}=1,2$), а также модели турбулентности с расширенной функцией пристеночного мо-



Рис. 1. Топология базовой сетки

E-mail: kolmakova.daria@gmail.com

делирования (рис. 3), поскольку для описания процессов в пограничном слое они не требуют большого числа ячеек.

Как видно из рис. 2, наилучшее повторение эксперимента наблюдается на дозвуковых и сверхзвуковых режимах, но ни одна из моделей турбулентности не дает приемлемого результата на трансзвуковых течениях, в области косого среза лопатки. Возможно, погрешность лежит в сложности моделирования процессов в прямом скачке уплотнения в межлопаточном канале, но также велика вероятность и большой погрешности замеров на данных режимах в эксперименте [4]. Далее была построена новая сеточная модель, отличающаяся от первой только размером ближайшего к стенке элемента равным 1 мкм, что обеспечило значение параметра $y^+ \approx 1,5$. Выбраны режимы: $\lambda = 0,7$; $\lambda = 1,0$; $\lambda = 1,2$; $\lambda = 1,3$. Построены графики приведенной скорости потока λ_{aa} по профилю лопатки на срединном сечении и зависимость потерь по высоте проточной части на режимах $\lambda = 0,9$; $\lambda = 1,25$ для моделей турбулентности SA, SA EWF, k-e EWF, SST EWF.

Из приведенных выше графиков видно, что вторая сетка предсказывает результаты немного лучше на режимах $\lambda_{an} = 0.7$, 1.0. Сопоставляя гра-









– экспериментальные данные;
– результаты на модели турбулентности SST EWF;
– результаты на модели турбулентности k-e EWF



Рис. 4. Распределение приведенной скорости по профилю лопатки на срединном сечении для модели турбулентности *SA:* • – эксперимантальные данные;

— – результаты на «грубой» сетке;

--- результаты на «точной» сетке

фики приведенной скорости потока $\lambda_{a,a}$ между собой при различных моделях турбулентности для второй сетки, также видно что они дают результат в пределах 1% погрешности по $\lambda_{a,a}$.

При исследовании характеристик турбинных решеток измерения параметров потока обычно проводят вдоль фронта за решеткой на расстоянии по ее оси Z от выходных кромок (рис. 5), т.е. в сечении, где примерно располагаются входные кромки следующего лопаточного аппарата (примерно на расстоянии горла). Далее приводятся распределения потерь по высоте канала при использовании различных моделей турбулентности, снятые в плоскости, аналогичной плоскости y-y (рис. 5).

Из рис. 6, 7 видно, что модели турбулентности дают погрешности в определении коэффициента потерь энергии по высоте проточной части на трансзвуковых течениях, от 2% для BL до 1,5% для k-e EWF на режиме $\lambda = 1,25$, от 3% для BL до 2% для v2f на режиме $\lambda = 0,9$. Модели турбулентности повторяют характер зависимости потерь по высоте проточной части в ядре потока на трансзвуковых режимах, но дают завышенные значения.

Для дальнейших расчётов была выбрана модель турбулентности SST, которая комбинирует в себе преимущества моделей k-е и k-w.

При исследовании структуры потока в лопаточном венце возникает необходимость более точного прогнозирования потока внутри кана-



Рис. 5. Схема структуры потока за трансзвуковой решеткой: 1 – след за выходной кромкой; 2, 3 – внешний и внутренний кромочные скачки уплотнения; 4 – отраженный скачок уплотнения; 5 – насадок; 6 – отборы статического давления; *y*-*y* – плоскость измерений



Рис. 6. Потери по высоте, для режима $\lambda = 0.9$: $\xi = 1 - \varphi^2$ – коэффициент потерь энергии;

- *Ф* коэффициент скорости;
- **h** относительная высота лопатки



Рис. 7. Потери по высоте, для режима $\lambda = 1,25$



Рис. 8. Топология "точной" сетки

ла, так как точность совпадения сеточной модели и реальной геометрии зависит от сеточной дискретизации вблизи пера лопатки [5]. Точность может быть достигнута увеличением числа элементов по высоте канала.

На третьем этапе работы были выделены варьируемые параметры сетки и пределы их изменения, которые приведены в табл. 1. Выбор максимальных и минимальных значений параметров осуществлялся на основании сохранения рекомедованных значений по параметрам качества сетки (скошенность, фактор роста, соотношение сторон в ячейке и др.). Для пояснения некоторых параметров на рис. 8 показана схема «точной» сетки.

N₂	Название	На что влияет	Базовое значение	Мин. значение	Макс. значение
1	Количество элементов вдоль корытца	1. Количество элементов вдоль корытца	53	33	101
		2. Количество элементов вдоль спинки			
2	Количество элементов в пограничном слое лопатки	Количество элементов в пограничном слое	17	9	37
3	Количество элементов в Н-блоке со стороны корытца	Количество элементов в межлопаточном канале	17	9	45
4	Количество элементов в Н-блоке со стороны спинки	личество элементов в личество элементов в 4-блоке со стороны спинки 2. Количество элементов влоль спинки		9	45
5	Количество элементов в Н-блоке	Количество элементов на спинке	41	13	85
6	Количество элементов по высоте канала	Количество элементов по высоте	57	57	129

Таблица 1. Варьируемые параметры сетки и пределы их изменния

	Режимы работы, λ						
Параметр	0,7	0,9	1,0	1,2	1,4		
1	-	min	min	min	min		
2	max	max	max	max	max		
3	Базовая сетка	min	min	max	max		
5	max min	min	базовая сетка	min	max		

Таблица 2. Результаты исследования варьируемых параметров

Результаты исследования приведены в табл. 2, в которой отмечены параметры дающие результаты ближе к экспериментальным данным. Следует отметить, что для выбранных диапазонов изменения параметров сетки улучшение совпадения с экспериментом составило максимум 2 % для критериев № 1- 5. Результаты исследования критерия №6 представлены на рис. 9.

Расхождения с экспериментом по уровню потерь в канале для базовой сетки составляло 12%, для улучшенной составило 7%. Также следует отметить, что увеличение количества элементов по высоте проточной части не только лучше позволяет прогнозировать уровень потерь, но также позволяет прогнозировать характер распределения потерь по высоте проточной части.

По проделанной работе можно сделать следующие выводы:

1. Расчетные характеристики, зависящие от перепадов давлений (решетка 34) хорошо прогнозируют результаты, сходятся в пределах погрешности на дозвуковых и глубоких сверхзвуковых течениях. Слабое место расчетных моделей – область косого среза на трансзвуковых течениях;

2. При выполнении условия у+ =1 результаты расчетов с разными моделями турбулентности сходятся между собой в пределах погрешности 1-1,5%;

3. Уменьшение количества элементов вдоль корытца (параметр 1), также как и увеличение количества элементов в пограничном слое лопатки (параметр 2) однозначно приближают расчетные значения к экспериментальным данным;

4. Увеличение элементов сетки по высоте канала, особенно насыщение пограничного слоя, значительно улучшает прогнозирование параметров потока.

Следует учитывать изменение количества элементов в межлопаточном канале (параметр 3) и количество элементов на спинке (параметр 5) в зависимости от моделируемого режима течения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления Правительства РФ № 218.



Рис. 9. Потери по высоте, для режима $\lambda = 0.9$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Шаблий Л.С. Проблемы оптимизации многоступенчатых компрессоров при создании перспективных ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университет имени акад. С. П. Королева (национального исследовательского университета). 2012. №3 (34), Часть 2. С.192-196.
- Попов Г.М., Батурин О.В. Расчетное изучение структуры потока вблизи втулочного сечения в лопаточном венце осевой турбины // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). 2009. № 3-2. С. 365-368.
- Моделирование аэродинамической структуры течения в камере сгорания малоразмерного ГТД с помощью САЕ-систем / М.Ю. Орлов, В.Ю. Абрашкин, И.А. Зубрилин, С.С. Матвеев // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). 2011. № 5. С. 179-187.
- Венедиктов, В.Д., Грановский А.В. Атлас экспериментальных характеристик плоских решеток охлаждаемых газовых турбин. М.: Изд-во ЦИАМ, 1990. 393с.
- 5. Автоматизация построения моделей лопаточных

венцов для САЕ расчётов в программе Profiler / Л.С. Шаблий, И.Б. Дмитриева, Г.М. Попов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университет имени акад. С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2012. №5 (36). Часть 2. С. 208-214.

GRID MODEL SPECIFYING FOR A SUBSONIC AND SUPERSONIC FLOWS IN CONFUSED CHANNELS CFD SIMULATION

© 2013 A.V. Krivcov, V.M/ Zubanov, O.V. Baturin, D.A. Kolmakova

Samara State Aerospace University named after Academician S. P. Korolyov (National Research University)

The results of the CFD calculations flat turbine arrays. The calculations were performed on several grids and different turbulence models. Also, for one of the computational grids investigated the influences of the grid density in different zones on the results obtained. Key words: mesh, boundary conditions, turbulence models.

Alexander Krivtsov, Graduate Student. E-mail: krivcov63@mail.ru Vasiliy Zubanov, Student. E-mail: waskes91@gmail.com Oleg Baturin, Candidate of Technics, Associate Professor at the Theory of Aircraft Engines Department. E-mail: udet@mail.ru Daria Kolmakova, Graduate Student. E-mail: kolmakova.daria@gmail.com