

ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАСЧЕТАМ ТРЕХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ И ТОРЦЕВОГО ТЕПЛООБМЕНА В РЕШЕТКАХ УТОЛЩЕННЫХ СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК

АННОТАЦИЯ

Проведено тестирование моделей турбулентности Спаларта—Аллмараса, Уилкокса и Ментера (SST) применительно к расчетам трехмерного турбулентного течения и теплоотдачи в межлопаточных каналах сопловых решеток, составленных из утолщенных лопаток. Расчеты с помощью программного комплекса SINF выполнены для условий известных из литературы экспериментов по изучению особенностей локальной теплоотдачи на торцевой стенке прямой решетки. Рассмотрено влияние модели на качество предсказания сложной структуры существовавшего трехмерного отрыва торцевого пограничного слоя в окрестности передней кромки лопатки. Для теплоотдачи наилучшее и весьма удовлетворительное согласие с опытом получено по модели Спаларта—Аллмараса; модель Уилкокса заметно (до 20%) завышает значение осредненного по шагу решетки числа Стантона.

1. ВВЕДЕНИЕ

Численное моделирование течения и теплообмена в сопловых и рабочих решетках газовых турбин – важный элемент проектной работы на этапе поверочных расчетов. Вопрос об адекватности моделирования решается при сопоставлении результатов расчетов с детальными экспериментальными данными, полученными на крупномасштабных моделях в хорошо контролируемых лабораторных условиях.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования трехмерного турбулентного течения и теплообмена в дозвуковой плоской решетке, составленной из существенно утолщенных сопловых лопаток. Для такого рода лопаток, применяемых в первых ступенях высокотемпературных газовых турбин, особое значение имеет учет сильной неравномерности локальной теплоотдачи на торцевых стенках. В определяющей мере эта неравномерность обусловлена сложной вихревой структурой приторцевого течения, формирующейся при натекании пограничного слоя на переднюю кромку лопатки.

В данных обстоятельствах значительный интерес представляет оценка возможностей ряда особенно популярных в последнее время моделей турбулентности предсказывать поля течения и локальной теплоотдачи в условиях, типичных для обозначенного класса прикладных проблем.

Представляемые ниже расчеты вы-

полнены для условий, принятых при проведении детальными экспериментами [1]. Результаты, полученные с использованием трех моделей турбулентности, сопоставляются как между собой, так и с опытными данными.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Общие данные по решетке, смоделированной в экспериментах [1], приведены в табл. 1. Форма профиля лопатки восстановлена по высококачественным рисункам, приведенным в работе [2]. Правильность восстановленной формы профиля подтверждена хорошим согласием расчетных распределений давления по обводу профиля с опытными данными [1].

Таблица 1. Параметры решетки

Длина осевой хорды, C_x , м	0,291
Шаг, м	0,457
Высота, м	0,552
Хорда, C , м	0,594
Угол входного потока	0°
Угол потока на выходе	78°

На рис. 1 показан межлопаточный канал рассматриваемой плоской решетки, на нижней торцевой стенке и в вертикальном сечении канала изображена расчетная сетка, верхняя половина канала не показана. Входная граница расчетной области располагалась на расстоянии около $2C_x$ (591 мм)

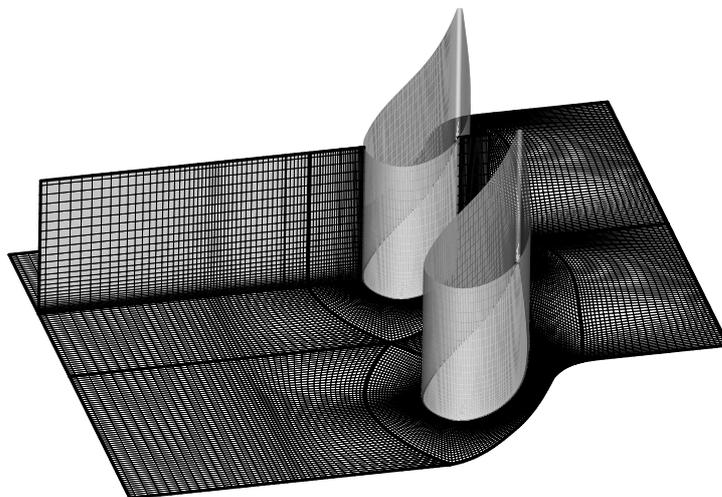


Рис. 1. Межлопаточный канал и расчетная сетка на торцевой стенке и в вертикальном сечении

вверх по потоку от передней кромки лопатки. Выходное сечение располагалось на расстоянии C_x от задней кромки.

В табл. 2 для двух различающихся по числу Рейнольдса режимов приведены параметры входного потока, соответствующие двум рассматриваемым в эксперименте режимам течения. Там же даны значения теплового потока на обогреваемом участке торцевой стенки.

Таблица 2. Режимные параметры

Число Рейнольдса, Re	6×10^5	$1,2 \times 10^6$
Скорость потока на входе, U_{in} , м/с	3,7	7,45
Толщина пограничного слоя на входе, δ_{99} , м	0,058	0,048
Толщина вытеснения, δ^* , м	0,0121	0,0092
Толщина потери импульса, δ^{**} , м	0,0079	0,0062
Форм-параметр, $H = \delta^* / \delta^{**}$	1,52	1,48
$Re^{**} = U_{in} \delta^{**} / \nu$	1900	2960
Тепловой поток на торцевой стенке, q_w , Вт/м ²	400	800

Число Рейнольдса рассчитывалось по хорде профиля и выходной скорости потока, $Re = CV_{out}/\nu$. В соответствии с условиями эксперимента моделировалось течение воздуха, теплофизические свойства которого брались при атмосферном давлении и температуре $T_{in} = 294,15$ К.

Расчеты выполнены в рамках модели несжимаемой жидкости на основе системы стационарных трехмерных уравнений Навье—Стокса и энергии, осредненных по Рейнольдсу. Турбулентная вязкость определялась по нескольким моделям турбулентности: Спаларта—Аллмараса (S-A) [3], Уилкокса ($k-\omega$) [4] и Ментера с модификацией SST (MSST) [5].

Принимались следующие граничные условия. Для адекватного описания вихревых структур, которые развиваются в отрывающемся пограничном слое на торцевой стенке, во входном сечении задавались величина, направление вектора скорости и параметры турбулентности, полученные в результате предварительного расчета двумерного пограничного слоя в плоскопараллельном канале. Интенсивность турбулентности внешнего потока принималась равной 0,6%, а отношение турбулентной вязкости к молекулярной задавалось в нем равным 30 при $Re = 6 \times 10^5$ и 60 при $Re = 1,2 \times 10^6$. В полученном решении находилось сечение пограничного слоя, для которого толщина вытеснения и толщина потери импульса соответствовали измеренным в эксперименте, и выбранные

распределения использовались в качестве граничных условий на входе в основную расчетную область.

На выходной границе накладывалось условие постоянного статического давления. Предполагалась зеркальная симметрия течения относительно срединной плоскости. На твердых стенках ставилось условие прилипания.

Расчеты выполнены в предположении периодичности течения по шагу решетки. Здесь следует отметить, однако, что лабораторный стенд [1] содержал только одну лопатку, а две ограничивающие область течения специально профилированные стенки, имитирующие присутствие соседних лопаток, продолжались вплоть до выходного сечения.

Тепловые граничные условия задавались в соответствии с условиями экспериментов [1]. Участок обогрева торцевой стенки начинался на расстоянии $0,97 C_x$ (282 мм) вверх по потоку от передней кромки лопатки и продолжался до выходной границы расчетной области. Величина теплового потока на обогреваемом участке торцевой стенки задавалась в соответствии с табл. 2. Остальная часть торцевой стенки и поверхность лопатки считались адиабатическими. Турбулентное число Прандтля принималось равным 0,9.

3. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ЗАДАЧИ

Для проведения расчетов использовался программный комплекс SINF [6], разработанный сотрудниками кафедры гидроаэродинамики СПбГПУ. Этот программный комплекс основан на методе конечных объемов и позволяет рассчитывать стационарные и нестационарные течения несжимаемой жидкости или газа, развивающиеся в областях сложной геометрии. Для получения стационарных решений в случае течений несжимаемой жидкости итерации осуществляются по методу искусственной сжимаемости. Используются многоблочные структурированные сетки. Дискретизация пространственных операторов уравнений сохранения выполнена со вторым порядком точности. Для расчета

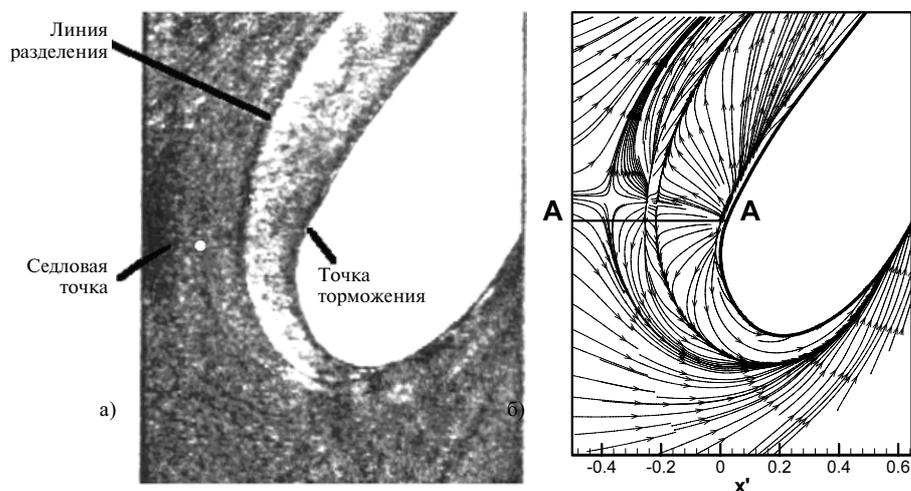


Рис. 2. Картина «донного» течения у торцевой стенки при $Re = 1,2 \times 10^6$: (а) результат визуализации в эксперименте [1], (б) донные линии тока, полученные в расчете по модели S-A

конвективных слагаемых используется противоположная разностная схема QUICK. Для дискретизации операторов, отражающих действие вязкости, применяется центральная разностная схема второго порядка.

Использованные в настоящих расчетах сетки Н-О-Н-типа имели размерность примерно 740 тысяч ячеек. Привлечение низкорейнольдсовых моделей турбулентности потребовало существенного сгущения сетки у стенок; в результате были обеспечены значения нормированной координаты Y^+ менее единицы на поверхности лопатки, а на торцевой стенке среднее значение Y^+ составляло около 0,6.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис. 2 сопоставляются картины «донного» течения у торцевой стенки, полученные в результате экспериментов [1] и настоящих расчетов по модели S-A при числе Рейнольдса $Re = 1,2 \times 10^6$. Здесь x' – это расстояние от передней кромки лопатки, отнесенное к осевой хорде C_x . На расчетной картине, кроме основного подковообразного вихря, отчетливо видно наличие еще трех образований: углового вихря около самой поверхности лопатки и двух вихрей, формирующихся вверх по потоку от подковообразного (вычисления при $Re = 6 \times 10^5$ приводят к аналогичной структуре течения). На экспериментальной картине с некоторым трудом, но также можно увидеть следы этих менее значимых по интенсивности дополнительных образований. В целом же результаты расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментально наблюдаемой структурой течения.

Картинки донного течения, полученные при расчетах с использованием модели турбулентности MSST, качественно схожи с показанными на рис. 2. Расчет по модели $k-\omega$ дает иную, менее сложную картину: образования, предшествующие подковообразному вихрю, отсутствуют, а последний – существенно шире.

Рис. 3 иллюстрирует результаты, полученные для локальной теплоотдачи на торцевой стенке при числе Рейнольдса $Re = 6 \times 10^5$. Здесь число Стантона определено как

$$St = q_w / \rho U_{in} C_p (T_w - T_{in}),$$

где q_w – тепловой поток, ρ – плотность жидкости, C_p – теплоемкость, T_w – температура стенки. Видно, что все модели турбулентности дают меньшие, чем в эксперименте значения числа Стантона на участке входа в межлопаточный канал. Помимо этого, наблюдаемый в окрестности передней кромки локальный макси-

мум теплоотдачи в расчетах смещен к стороне разрезания лопатки, тогда как в измерениях он располагается непосредственно у фронта решетки.

При сравнении картин, полученных по разным моделям турбулентности, можно видеть существенные различия. В частности, результаты для модели MSST показывают наличие зоны с примерно постоянным значением $St \approx 0,008$ у стороны давления, тогда как две другие модели предсказывают здесь градиентный характер изменения числа Стантона. В области задней кромки ни одна модель не показывает согласованности с экспериментом по форме и ориентации изолиний числа Стантона. Наиболее вероятно, что это обусловлено отклонениями от периодичности течения и теплообмена в экспериментальной установке, где след от лопатки соседствовал с ограничивающими вертикальными стенками, а не со следами от других лопаток, как это имело бы место в строго периодических условиях.

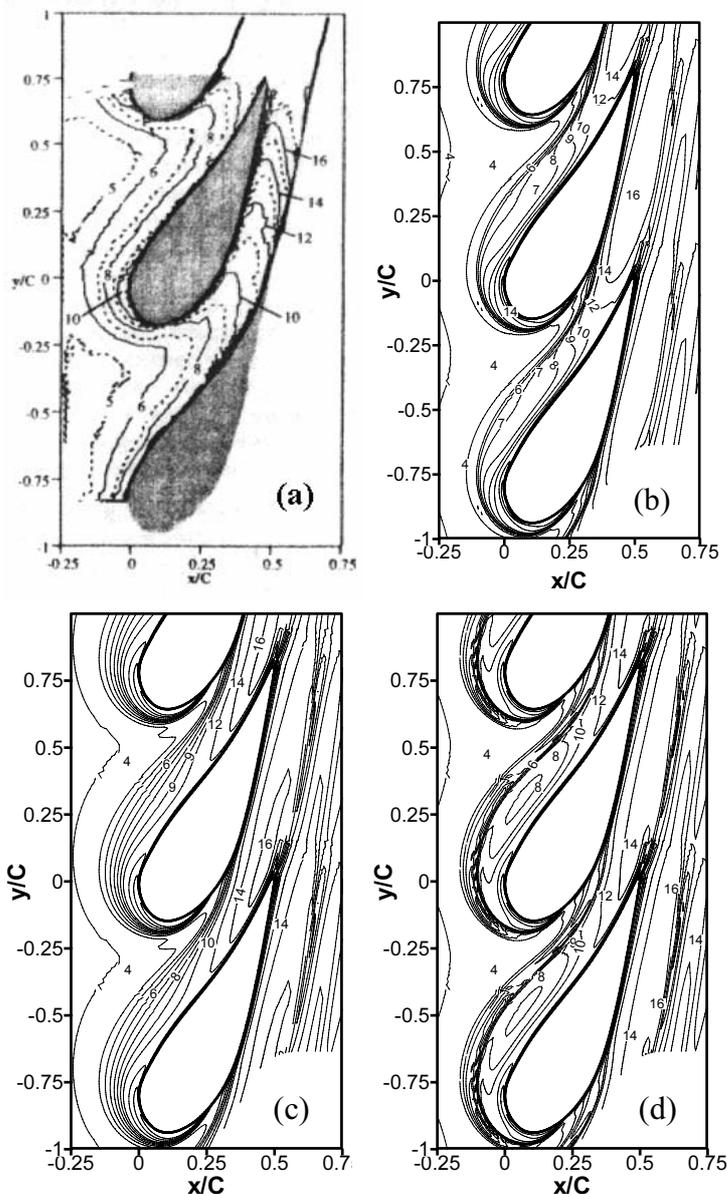


Рис. 3. Распределения числа Стантона ($\times 10^3$) на торцевой стенке при $Re = 6 \times 10^5$: (a) – эксперимент [1]; (b) – (d) – расчет по моделям S-A, $k-\omega$ и MSST соответственно

На рис. 4 представлены распределения числа Стантона в области, расположенной вверх по потоку от передней кромки. Здесь расстояние Δx от передней кромки лопатки отнесено к ее радиусу R , составляющему 72,5 мм. Можно видеть, что все модели дают удовлетворительное согласие с экспериментом при приближении к кромке лопатки с некоторым превосходством модели S-A при меньших значениях Δx .

В области выше по потоку модели S-A и MSST предсказывают осциллирующее поведение числа Стантона, обусловленное влиянием упомянутых выше вихревых структур на интенсивность теплоотдачи. В экспериментальном распределении таких осцилляций не наблюдается (по невыясненным пока причинам). Монотонность изменения числа Стантона, полученного по модели $k-\omega$, проистекает из отсутствия в полученном решении вихревых структур, предшествующих подковообразному вихрю.

Расчетные данные для осредненного по шагу числа Стантона (рис. 5) наиболее близки к экспериментальным в случае модели S-A, в то время как модель $k-\omega$ завышает интегральную теплоотдачу (на 5–20%). Данные, полученные по модели MSST, хорошо согласуются с экспериментом в области задней кромки, однако ближе к передней кромке

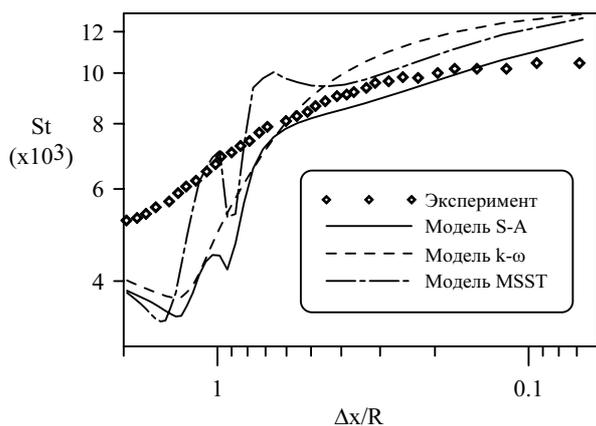


Рис. 4. Изменение числа Стантона на торцевой стенке в области вверх по потоку от передней кромки лопатки (вдоль линии А-А, показанной на рис. 2), $Re = 6 \times 10^5$

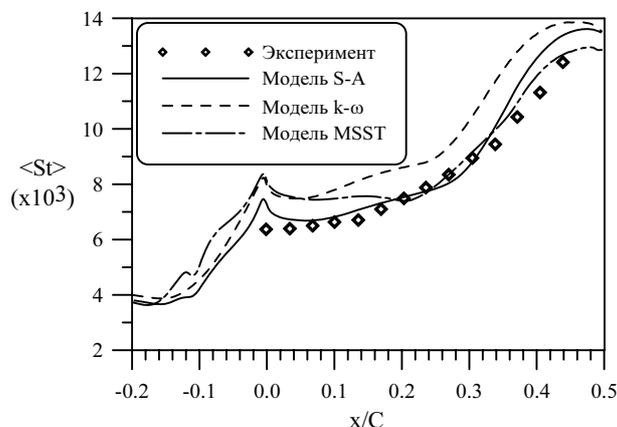


Рис. 5. Распределения осредненного по шагу числа Стантона на торцевой стенке, $Re = 6 \times 10^5$

расчет, как и в случае модели $k-\omega$, дает завышенный уровень теплоотдачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено тестирование трех моделей турбулентности при расчетах трехмерного турбулентного течения и теплоотдачи на торцевой стенке межлопаточного канала прямой сопловой решетки, составленной из утолщенных лопаток. Использованы модели Спаларта—Аллараса (S-A), Уилкокса ($k-\omega$) и Менгера (MSST). Расчеты выполнены с помощью программного комплекса SINF.

По моделям S-A и MSST получены качественно схожие между собой и с экспериментом картины приторцевого течения вблизи передней кромки лопатки: воспроизводятся не только подковообразный вихрь, но и несколько соседствующих с ним вихрей. В случае $k-\omega$ модели картина иная: образования, предшествующие подковообразному вихрю, отсутствуют, а последний существенно уширяется.

Осредненные по шагу решетки характеристики теплоотдачи лучше всего предсказываются моделью S-A. Близкие результаты, с некоторым завышением интенсивности теплоотдачи, дает и модель MSST, а сильнее всех значения числа Стантона по сравнению с экспериментальными завышает модель $k-\omega$.

Авторы благодарят К.С. Макарову за помощь в проведении расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kang M.B., Kohli A., Thole K.A. Heat transfer and flow-field measurements in the leading edge region of a stator vane endwall // Journal of Turbomachinery. 1999. Vol. 121. P. 558–567.
2. Knost, D. G., Thole, K. A. Computational predictions of endwall film-cooling for a first stage vane // ASME Pap. GT-2003-38252.
3. Spalart, P.R., Allmaras, S.R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows // La Rech. Aéropatiale. 1994. Vol. 1. P. 5–21.
4. Wilcox, D.C. A two-equation turbulence model for wall-bounded and free-shear flows // AIAA Paper, AIAA-93-2905.
5. Menter, F.R. Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. Vol. 32. P. 1598–1605.
6. Смирнов Е.М., Зайцев Д.К. Метод конечных объемов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2004. № 3. С. 70–81.