

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДКОВООБРАЗНЫХ СТРУКТУР, ФОРМИРУЮЩИХСЯ ПРИ НАТЕКАНИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЕ ПРЕПЯТСТВИЕ

А.М. Левченя

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ)

Санкт-Петербург, Россия

E-mail: aero@phmf.spbstu.ru

1. Введение

Известно, что при натекании на трехмерное препятствие движущегося вдоль стенки потока происходит локальный отрыв пограничного слоя, в результате чего образуется система обтекающих тело трехмерных вихрей [1].

Топология формирующейся вихревой структуры зависит от числа Рейнольдса и толщины пограничного слоя, и один из ключевых вопросов состоит в количестве вихрей, составляющих эту структуру. Результаты экспериментального исследования обтекания модели крылового профиля, закрепленного на гладкой пластине [2], позволяют предположить наличие множественных подковообразных вихрей. В экспериментальной работе [3] при обтекании кругового цилиндра получена структура из трех подковообразных вихрей.

В работе [4] представлены результаты совместных измерений полей течения и характеристик поверхностного теплообмена при турбулентном течении в области сочленения кругового цилиндра, снабженного обтекателем, и гладкой пластины. Осредненные по времени картины течения показывают образование структуры из нескольких подковообразных вихрей.

Подковообразные вихри вызывают дополнительные неравномерности локальной теплоотдачи, устанавливающейся при наличии перепада температуры между торцевой стенкой и внешним потоком. В случае структуры с множественными подковообразными вихрями поочередное прижатие и отток жидкости от торцевой стенки изменяет толщину теплового пограничного слоя и порождает изменение уровня теплоотдачи.

Имеющиеся экспериментальные данные позволяют исследовать возможности ряда популярных в последнее время моделей турбулентности предсказывать поля течения. Автору не удалось обнаружить работ, где при расчете течений с при-

менением дифференциальных моделей турбулентности уделялось бы внимание проблеме воспроизведения множественных вихрей перед цилиндром.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования для условий экспериментов [4]. Результаты, полученные с использованием двух моделей турбулентности, сопоставляются как между собой, так и с опытными данными.

2. Постановка задачи

На основе модели несжимаемой вязкой жидкости с постоянными физическими свойствами рассматривается течение в окрестности цилиндра диаметром d , снабженного обтекателем с прямолинейными образующими (относительное удлинение 5:1). Схема течения и общий вид расчетной области показаны на рис.1. Выделена обогреваемая часть торцевой поверхности. Ось X декартовой системы координат направлена вдоль натекающего на цилиндр потока, ось Y - поперек потока, а ось Z параллельна оси цилиндра.

Расчетная область имеет форму прямоугольного параллелепипеда, ребра которого параллельны осям системы координат. Входное сечение расчетной области располагается на расстоянии $10d$ выше по потоку от цилиндра, а выходная граница - на расстоянии $10d$ от задней кромки обтекателя. Расстояние от оси цилиндра до боковой границы $Y=\text{const}$ выбрано равным $8d$. Расстояние от торцевой стенки до верхней границы расчетной области составляет $3d$.

Расчеты выполнены с наложением условия симметрии в средней продольной плоскости, проходящей через ось цилиндра ($Y=0$).

На внешней границе расчетной области, параллельной оси цилиндра, также накладывалось условие симметрии, что, фактически, трансформировало исходную задачу в ее аналог для течения через сильно разреженную решетку цилиндров.

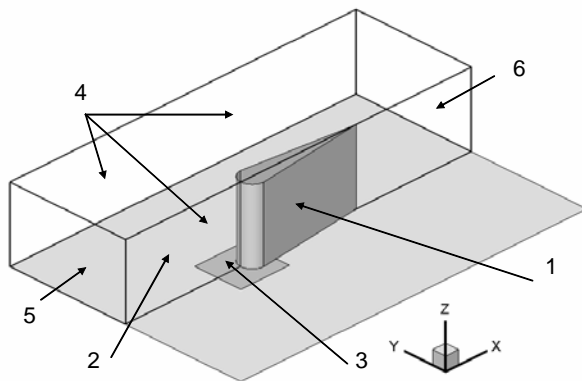


Рис.1. Обтекаемое потоком тело (1), установленное на пластине (2), часть (3) которой обогревается. Показаны также границы расчетной области: плоскости симметрии (4), входная (5) и выходная (6) границы.

В экспериментах [4] тело обтекалось потоком воды. В пренебрежении образованием волн на свободной поверхности жидкости на верхней границе расчетной области ставилось условие симметрии.

На торцевой стенке и на поверхности тела ставилось условие прилипания. Во входном сечении расчетной области задавались распределения скорости и параметров турбулентности, предварительно полученные в результате численного решения задачи о развитии двумерного пограничного слоя. На выходной границе накладывалось условие постоянного статического давления.

Число Рейнольдса, рассчитанное по скорости потока на входе и диаметру цилиндра, составляло $Re = V_{in}d/\nu = 24400$. Относительная толщина невозмущенного цилиндрического пограничного слоя, которая достигалась бы к месту установки цилиндра в случае его отсутствия, полагалась равной $0,345d$. Интенсивность турбулентности на входе $0,5\%$. Число Прандтля $Pr = 6,31$.

Принятые параметры соответствуют условиям экспериментов [4], в которых исследовалось обтекание цилиндра диаметром $d = 15,1$ см потоком воды со скоростью $V_{in} = 14,7$ см/с, при температуре 25°C .

Расчеты выполнены на основе системы стационарных трехмерных уравнений Рейнольдса и осредненного уравнения энергии. Турбулентная вязкость определялась по двум моделям турбулентности: Уилкокса ($k-\omega$) [5] и Ментера с модификацией SST (MSST) [6]. Отношение турбулентной вязкости к молекулярной ν_t/ν на входной границе при расчете пограничного слоя задавалось равным $6,7$.

Тепловые граничные условия задавались в соответствии с условиями экспериментов [4]. Полный участок обогрева торцевой стенки представлял собой прямоугольник размером $2 \times 2d$ в окрестности

передней половины цилиндра. Остальная часть торцевой стенки и поверхность цилиндра с обтекаемым считались адиабатическими. Турбулентное число Прандтля принималось равным $0,9$.

3. Вычислительные аспекты задачи

Для проведения расчетов использовался программный комплекс SINF [7], 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 конвективных слагаемых используется противопоточная разностная схема QUICK.

Использованные в настоящих расчетах сетки состояли из блоков Н- и О-типа. Значительное внимание уделено измельчению сетки в плоскости XY. Средний размер ячейки вблизи пересечения оси подковообразного вихря и линии $Y=0$ на базовой сетке $\Delta^* \approx 0,023d$. Огрубленная и измельченная сетки отличаются от нее соответственно увеличением или уменьшением величины Δ^* в 2 раза.

Каждая трехмерная сетка была получена трансляцией двумерной многоблочной сетки, покрывающей плоскость XY, вдоль оси Z. Все сетки содержали 48 ячеек по этому направлению. Привлечение низкорейнольдсовых моделей турбулентности потребовало существенного сгущения сетки у стенок; в результате были обеспечены значения нормированной координаты Y^+ менее единицы на твердых поверхностях.

4. Результаты расчетов

На рис.2 приведены картины линий тока и распределения величины, являющейся отношением турбулентной вязкости к молекулярной, в плоскости $Y=0$. Расчет по модели $k-\omega$ дает упрощенную вихревую структуру: на двумерной картине отсутствуют области с замкнутыми линиями тока, есть только разворот потока. Модель MSST показывает близкую к экспериментальной картину: виден подковообразный вихрь и предшествующий ему вторичный с противоположным направлением вращения.

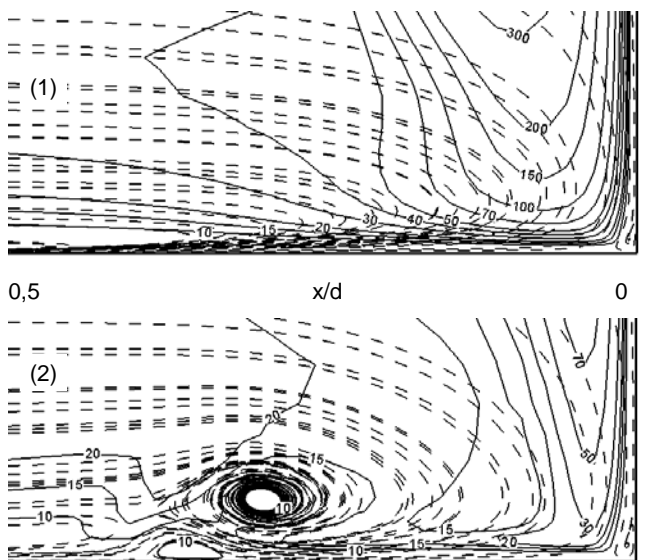


Рис.2. Линии тока (пунктир), наложенные на распределения отношения турбулентной вязкости к молекулярной (сплошные изолинии), в плоскости симметрии $Y=0$: расчеты по модели $k-\omega$ (1) и MSST (2) на базовой сетке.

Анализ расчетных распределений турбулентной вязкости позволяет объяснить эти различия. При расчете по модели $k-\omega$ уровень турбулентной вязкости значительно выше, и высокий уровень эффективной вязкости препятствует образованию усложняющей течение вихревой структуры.

Выполнено измельчение сетки и детально проанализирована топология вихревых структур, получаемая по модели MSST. Построенные по результатам расчетов картины линий тока сопоставлены на рис.3. Видно, как с повышением качества сетки вблизи препятствия проявляются новые вихри, а размер и положение вихрей, полученных в расчетах на более грубых сетках, изменяются.

Влияние моделей турбулентности на картину локальной теплоотдачи иллюстрируется на рис.4, где приведены распределения числа Стантона:

$$St = q_w / \rho U_{in} C (T_w - T_{in}). \quad (1)$$

Здесь q_w – тепловой поток, ρ – плотность жидкости, C – теплоемкость, T_w – температура стенки. На этом и следующем рисунках представлены результаты, полученные на базовой сетке. На рис.5 отдельно показаны распределения St вдоль линии $Y = 0$.

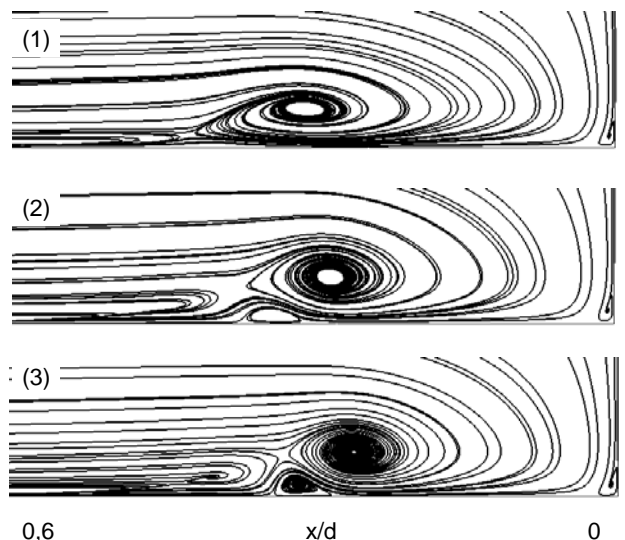


Рис.3. Линии тока в плоскости в плоскости $Y=0$: влияние измельчения сетки: (1) – грубая, (2) - базовая, (3) – измельченная сетки.

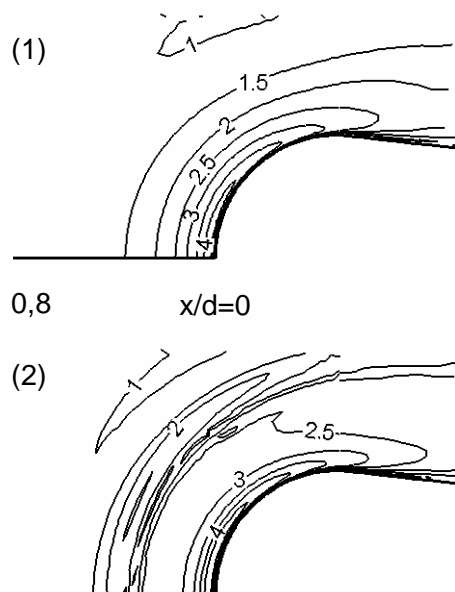


Рис.4. Расчетные распределения числа Стантона на торцевой стенке: (1) – модель $k-\omega$, (2) - модель MSST.

Принципиальное различие расчетных распределений St (по форме кривых) находится в соответствии с отмеченными выше различиями в вихревой структуре (рис.2). Модель $k-\omega$ показывает монотонный рост St при приближении к препятствию, единственный максимум достигается в непосредственной близости цилиндра. В случае модели MSST формирование дополнительных вихрей влечет за собой образование второго максимума.

Укажем, что картина теплоотдачи, рассчитанная по модели MSST на измельченной сетке, также содержит два пятна интенсивной теплоотдачи, и каких-либо новых особенностей на ней не проявляется.

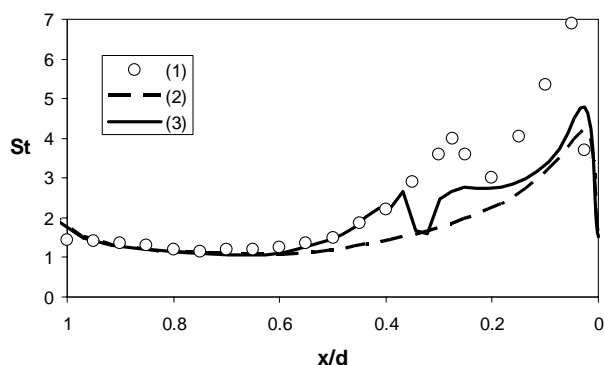


Рис.5. Распределение числа Стантона на торцевой стенке вдоль линии $Y=0$: (1) – данные экспериментов [4], (2) – расчеты по модели $k-\omega$, (3) - расчеты по модели MSST.

В заключение заметим, что схожие проблемы, связанные с воспроизведением в расчетах сложной вихревой структуры, возникают и при численном моделировании течения вблизи передней кромки турбинных лопаток. Например, результаты расчетов течения в решетке сопловых лопаток при характерных для реальных приложений, весьма высоких числах Рейнольдса [8] показали, что топология приторцевого потока перед лопаткой сильно зависит от выбранной модели турбулентности, фактически же - от изменяющегося при смене модели уровня эффективной вязкости во внешней части турбулентного пограничного слоя, развивающегося на торцевой стенке.

- [1] W.A.Eckerle, L.S. Langston. Horseshoe vortex formation around a cylinder // Journal of Turbomachinery, April 1987, pp.278-285.
- [2] W. Devenport, R. Simpson. The Flow Past a Wing-Body Junction - An Experimental Evaluation of Turbulence Models. 17th Symposium on Naval Hydrodynamics, The Hague, The Netherlands.
- [3] Besir Sahin, N. Adil Ozturk, Huseyin Akilli. Horseshoe vortex system in the vicinity of the vertical cylinder mounted on a flat plate // Flow Measurement and Instrumentation №18 (2007), pp. 57–68.
- [4] Praisner, T.J., Smith, C.R. The Dynamics Of The Horseshoe Vortex And Associated Endwall Heat Transfer, Part 2 – Time-Mean Results. Proceedings of ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea and Air, June 6-9, 2005, Reno-Tahoe, Nevada, USA. Paper No. GT2005-69091, 9 pages.
- [5] Wilcox, D.C. A two-equation turbulence model for wall-bounded and free-shear flows // AIAA Paper, AIAA-93-2905.
- [6] Menter, F.R. Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal, 1994. -Vol. 32. - P. 1598-1605.
- [7] 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.
- [8] А.М. Левченя, В.В. Рис, Е.М. Смирнов. Тестирование моделей турбулентности применительно к расчетам трехмерного течения и торцевого теплообмена в решетках утолщенных сопловых лопаток. В кн.: Четвертая Российская Национальная Конференция по Теплообмену. Труды конференции. Том II (Вынужденная конвекция однофазной жидкости). - М.: Изд-во МЭИ, 2006. Стр. 167-170.