

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА
В ОБЛАСТИ СОЧЛЕНЕНИЯ ПЛАСТИНЫ И ЗАКРЕПЛЕННОГО НА НЕЙ
СИММЕТРИЧНОГО ТЕЛА С УТОЛЩЕННОЙ ЛОБОВОЙ ЧАСТЬЮ****АННОТАЦИЯ**

Для условий недавно опубликованных экспериментов (Praisner & Smith, 2005) численно моделируется трехмерное турбулентное течение и теплообмен в области сочленения снабженного обтекателем кругового цилиндра и гладкой пластины. Для замыкания системы уравнений Рейнольдса и осредненного уравнения энергии используется SST-версия модели турбулентности Ментера (MSST). Численные решения получены на подробных сетках (до 5 миллионов ячеек) с использованием двух конечно-объемных гидродинамических кодов второго порядка точности: пакета внутреннего использования SINF и коммерческого пакета ANSYS-CFX. Установлено, что оба использованных программных пакета дают весьма схожие результаты. Показано, что расчетная структура течения и локальная теплоотдача на торцевой стенке весьма чувствительны к измельчению расчетной сетки, как по нормали к торцевой стенке, так и в параллельных этой стенке плоскостях. В целом, удается хорошо воспроизвести сложную вихревую структуру течения вблизи передней кромки препятствия, включая размеры и положение множественных подковообразных вихрей. Локальная теплоотдача на торцевой стенке предсказывается удовлетворительно: в результатах расчетов, так же как и в экспериментах, наблюдается значительный рост числа Стантона вблизи препятствия, однако расчетные значения глобального максимума занижены на 20-30%.

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 подковообразной формы [1].

Топология формирующейся вихревой структуры зависит от числа Рейнольдса и толщины пограничного слоя, и один из принципиальных 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 работах [3, 4] представлены результаты совместных измерений полей течения и характеристик поверхностного теплообмена при турбулентном течении в области сочленения кругового цилиндра, снабженного обтекателем, и гладкой пластины. 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 поочередные приток и отток жидкости от торцевой стенки меняют толщину теплового пограничного слоя и порождают изменение уровня теплоотдачи.

Для практики расчетов особый интерес представляет выяснение возможности ряда популярных в последнее время моделей турбулентности воспроизводить специфику течения и локальной теплоотдачи, характерную для рассматриваемой задачи или схожих

с ней. Результаты расчетов [5], выполненных для условий экспериментов [3, 4], показали при использовании модели $k-\omega$ загроможденную картину течения, а в случае модели MSST - формирование множественных вихрей (а, следовательно, и немонокотности локальной теплоотдачи). Количество содержащихся в решении подковообразных вихрей зависело от размера ячеек расчетной сетки в области перед препятствием.

В настоящей работе представлены результаты следующего этапа численного моделирования для условий экспериментов [3, 4]. Результаты, полученные с использованием двух программных комплексов на все более мелких сетках, сопоставляются как между собой, так и с опытными данными.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В экспериментах [3, 4] исследовалось обтекание цилиндра диаметром $d = 0.15$ м, снабженного обтекателем с прямолинейными образующими (удлинение 5:1), потоком воды со скоростью $V_{in} = 0.15$ м/с, при температуре потока на входе $T_{in} = 25^\circ\text{C}$. Число Рейнольдса $Re = V_{in}d/\nu = 24400$. Число Прандтля $Pr = 6.3$.

Предварительные расчеты показали, что температура воды, текущей над обогреваемым участком пластины, увеличивается у стенки максимум на 15° , что приводит к уменьшению вязкости воды на 20-25%. В результате предварительных расчетов было установлено, что учет зависимости вязкости от температуры не сказывается сколько-нибудь заметно ни на размерах подковообразных вихрей, ни на распределении локальной теплоотдачи. Поэтому все дальнейшие расчеты выполнены в предположении постоянства коэффициента вязкости жидкости и числа Pr .

Расчеты выполнены на основе системы стационарных трехмерных уравнений Рейнольдса и осредненного уравнения энергии. Турбулентная вязкость определялась по модели турбулентности MSST в версии [6], в отличие от предшествующей работы [5], где применялась исходная версия модели (1993 года). Турбулентное число Прандтля принималось равным 0.9.

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 средней продольной плоскости.

Расчетная область имеет форму прямоугольного параллелепипеда, ребра которого параллельны осям системы координат. Входное сечение расчетной области располагается на расстоянии 1.5 м выше по потоку от цилиндра, а выходная граница - на расстоянии 1.5 м от задней кромки обтекателя.

Расстояние от оси цилиндра до боковой границы $Y=\text{const}$ выбрано равным 0.44 м. Оно равно полуширине экспериментального канала за вычетом характерной толщины вытеснения пограничного слоя $\delta^*=6 \cdot 10^{-3}$ м. Это значение соответствует толщине невозмущенного препятствием двумерного турбулентного пограничного слоя, которая достигалась бы к месту установки тела.

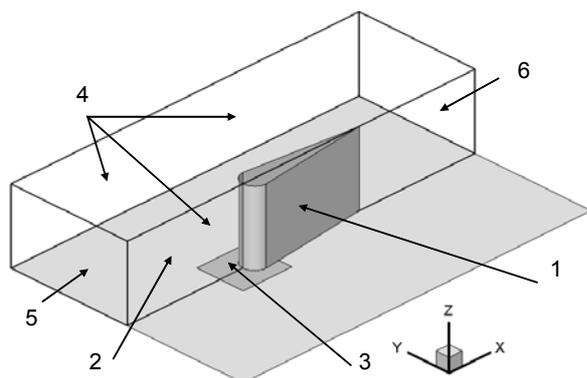


Рис.1. Обтекаемое потоком тело 1, установленное на пластине 2, часть 3 которой обогревается. Показаны также границы расчетной области: плоскости симметрии 4, входная 5 и выходная 6 границы.

В экспериментах [3, 4] тело обтекалось потоком воды со свободной поверхностью, расположенной в среднем на расстоянии 0.4 м от торцевой стенки. В настоящих расчетах на верхней границе расчетной области ставилось условие симметрии в пренебрежении искажениями свободной поверхности.

Расчеты выполнены с наложением условия симметрии и в средней продольной плоскости, проходящей через ось цилиндра ($Y=0$). На параллельной ей внешней границе расчетной области $Y=Y_{max}$ также накладывалось 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. Толщина невозмущенного цилиндром двумерного турбулентного

пограничного слоя, которая достигалась бы к месту установки цилиндра в случае его отсутствия, полагалась равной $5.2 \cdot 10^{-2}$ м. Интенсивность турбулентности на входной границе при расчете пограничного слоя задавалась равной 0.5%, а отношение турбулентной вязкости к молекулярной $\nu_t/\nu = 6.7$.

На выходной границе накладывалось условие постоянного статического давления.

Тепловые граничные условия задавались в соответствии с условиями экспериментов [3, 4]. Полный участок обогрева торцевой стенки с тепловым потоком $Q = 10\,500$ Вт/м² представлял собой квадрат со стороной 0.3 м в окрестности передней половины цилиндра. Остальная часть торцевой стенки и поверхность цилиндра с обтекателем считались адиабатическими.

3. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ

Для проведения расчетов использовались коммерческий пакет CFX [7] и пакет внутреннего использования SINF [8], разработанный сотрудниками кафедры гидроаэродинамики СПбГПУ. Пакет SINF 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 с общим числом ячеек от 0.6 до 5 миллионов состояли из блоков H- и O-типа, параметры сеток приведены в таблице 1:

Таблица 1. Параметры расчетных сеток

Обозначение сетки	1	2	3	4	5	6
d/Δ^*	100	200	400	100	200	400
$\langle Y^+ \rangle$ (CFX)	1	1	1	0.13	0.13	0.13
Число ячеек по Z	45	55	78	58	67	89

Значительное внимание уделено измельчению сетки в плоскости XY . Величина Δ^* в таблице 1 определяет средний размер ячейки вблизи пересечения оси основного подковообразного вихря и линии $Y=0$. Измельчение XY -сетки выполнялось главным образом вблизи передней кромки препятствия.

Каждая трехмерная сетка была получена трансляцией двумерной многоблочной сетки, покрывающей плоскость XY , вдоль оси Z . Число ячеек по нормали к торцевой стенке выбиралось так, чтобы обеспечить требуемое значение Y^+ , а также размер ячейки вблизи оси основного подковообразного вихря, близкий к Δ^* . Отметим, что в пакете CFX значения величин определяются в узлах сетки, а в SINF – в центрах ячеек, поэтому на одной и той же сетке величина Y^+ во втором случае в 2 раза меньше.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис.2 приведены картины линий тока в плоскости $Y=0$, полученные на разных сетках с использованием пакета CFX. Топология вихревой структуры перед препятствием близка к наблюдаемой в экспериментах: имеются четко выраженные угловой (а), основной (б) и третичный (г) вихри, между которыми расположен вторичный (в) с противоположным направлением вращения жидкости. Вторичный вихрь отсутствует на осредненной картине результатов экспериментов [4], однако при рассмотрении мгновенных картин течения, приведенных в работе [3], для отдельных моментов времени этот вихрь отчетливо виден.

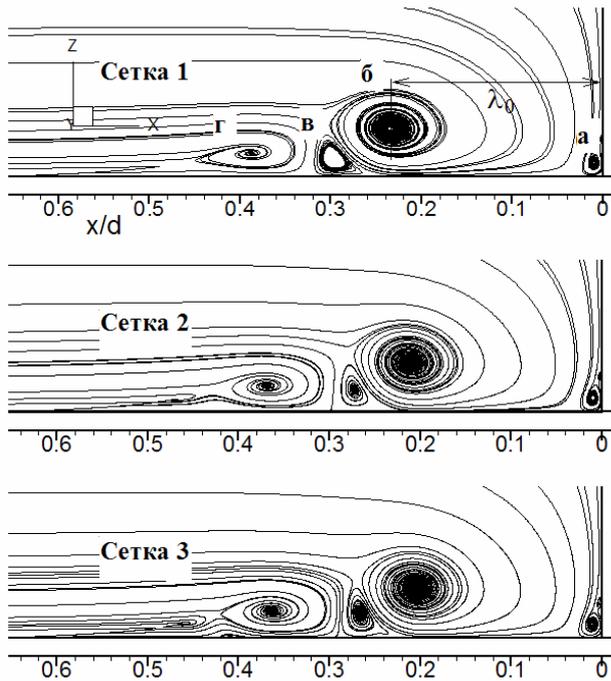


Рис.2. Картина линий тока в плоскости $Y=0$: результаты расчетов с помощью пакета CFX.

При измельчении сетки вихревая структура в рассчитанном течении все более усложняется: сначала выше по потоку от третичного вихря в области разворота потока зарождается следующая пара вихрей с разными направлениями вращения (сетка 2), затем становится четко выраженной (сетка 3). Эти новые структурные элементы не наблюдаются в экспериментальной картине либо по причине недостаточной разрешающей способности экспериментов, либо, что скорее всего, из-за нестационарности реального течения в натекающем турбулентном пограничном слое.

На рис.3 сопоставлены полученные в расчетах значения характерной при описании размеров подковообразных вихрей величины λ_0 (см.рис.1, сетка 1) для разных пакетов и использованных сеток. Отметим, что в экспериментах [4] получено значение $\lambda_0=0.175d$.

Сравнение результатов для трех сеток (линия «а») показывает, что при уменьшении характерного размера ячеек Δ^* основной подковообразный вихрь приближается к препятствию. Линии «а» и «в» на рис.3 позволяют непосредственно сопоставить результаты расчетов по пакетам CFX и SINF, поскольку здесь попарно использованы одни и те же сетки. Близкие к результатам пакета SINF значения могут быть получе-

ны на пакете CFX только при значительном уменьшении величины Y^+ . Отметим также, что в результатах работы [5] (где применялась базовая версия модели MSST) получены значения λ_0 , превышающие экспериментальное на 50-70%.

Возвращаясь к вопросу выбора ширины расчетной области, следует отметить: дополнительные методические расчеты показали, что уменьшение ширины канала на величину δ^* уменьшает величину λ_0 на 0.3%.

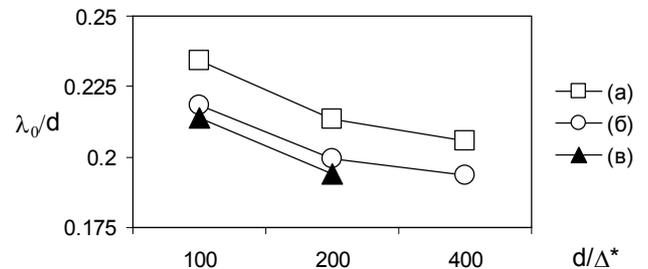


Рис.3. Расстояние от оси основного подковообразного вихря до препятствия для разных расчетных случаев: (а) – CFX, сетки 1-3, (б) – CFX, сетки 4-6, (в) – SINF, сетки 1-3.

На рис.4 приведены распределения числа Стантона St на торцевой стенке вдоль линии $Y=0$. Используется следующее определение:

$$St = \frac{Q}{\rho V_{in} C(T_w - T_{in})} \quad (1)$$

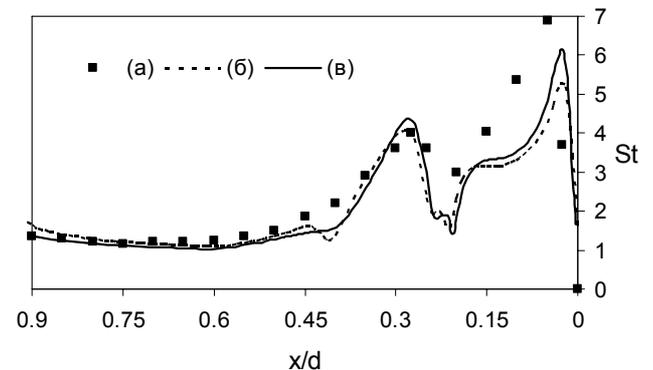


Рис.4. Распределение числа Стантона на торцевой стенке вдоль линии $Y=0$: (а) - данные экспериментов [4]; (б) - расчеты на пакете CFX, сетка 5; (в) - расчеты на пакете SINF, сетка 2.

Значение числа St в начале области обогрева находится в хорошем соответствии с экспериментами. При приближении к препятствию полученные с использованием обоих пакетов зависимости содержат особенности, отмеченные в экспериментах: имеются два максимума теплоотдачи в местах подтекания потока к стенке за счет углового и третичного вихрей. Глобальный максимум в результатах расчетов расположен ближе к препятствию, чем в экспериментах, и сама величина St занижена (пакет SINF показывает несколько лучший результат).

На рис.5 представлено сравнение значений St_{max} , полученных в разных вариантах расчетов. Наблюдается тенденция улучшения расчетных результатов при измельчении сетки в плоскости XY , однако эффект

этого измельчения сказывается слабее, чем уменьшения величины Y^+ .

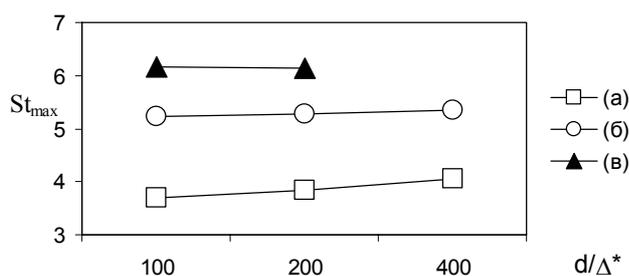


Рис. 5. Максимальное значение числа Стантона для разных расчетов: (а) – CFX, сетки 1-3, (б) – CFX, сетки 4-6, (в) – SINF, сетки 1-3.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены обширные тестовые расчеты трехмерного турбулентного течения и теплообмена в области сочленения снабженного обтекателем кругового цилиндра и гладкой пластины. Такая конфигурация, для которой в литературе имеются подробные экспериментальные данные, может, в частности, рассматриваться как модель сочленения крыла и фюзеляжа.

В расчетах использованы два программных пакета: ANSYS-CFX и SINF. В обоих пакетах применялась SST модель турбулентности Ментера в версии [6]. Расчеты на достаточно подробных сетках по модели MSST позволяют хорошо воспроизвести сложную структуру течения. Показано, что использование сеток с характерным размером ячеек перед препятствием в области образования основного подковообразного вихря, на 2-3 порядка меньшем радиуса передней кромки, позволяет добиться хорошего соответствия в положении вихрей между расчетами и экспериментами.

Значение Y^+ на торцевой стенке менее 1 обеспечивает приемлемое воспроизведение распределения числа Стантона, однако при использовании пакета CFX изменение Y^+ в диапазоне 0.1÷1 значительно влияет на его величину.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 08-08-00400 и гранта для ведущих научных школ НШ-5917.2008.8.

Автор благодарит В.В.Руса и Е.М.Смирнова за содействие в подготовке и выполнении данной работы.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

C — теплоемкость, Дж/(кг·°C);
 d — диаметр цилиндра, м;

SUMMARY

A.M. Levchenya (St.Petersburg State Polytechnic University, Polytechnicheskaya 29, 195251 St. Petersburg, Russia), **NUMERICAL SIMULATION OF TURBULENT FLOW AND HEAT TRANSFER IN THE JUNCTURE OF A PLATE AND A SYMMETRIC THICKENED-NOSE BODY**

This contribution is aimed at analysis of capabilities of popular two-equation turbulence model to predict peculiarities of 3D flow fields and heat transfer in the leading-edge endwall region of bluff bodies. The analysis is performed under conditions that correspond to the extensive experimental study reported recently by Praisner & Smith. One should emphasize, in particular, that the PIV measurements performed in this study for a symmetric streamlined cylinder point clearly to formation of a leading-edge system where a secondary vortex and a tertiary one develop additionally to the primary horseshoe vortex. The present computations were performed using the 3D CFD-codes ANSYS-CFX and SINF. The second one is in-house well-validated block-structured Navier-Stokes solver based on the second-order finite-volume technique using the cell-centered variable arrangement. For turbulence modeling, the low-Re Menter SST model was applied. A special attention was paid to grid sensitivity of the results. The Menter SST model produces qualitatively correct results but there is a considerable difference in the measured and predicted effects of the horseshoe vortex structure on the endwall heat transfer.

Pr — число Прандтля;
 Re — число Рейнольдса;
 Q — тепловой поток, Вт/м²;
 St — число Стантона;
 T — температура, С;
 V — скорость потока, м/с;
 Y^+ — нормированная координата первой пристенной расчетной точки;
 X, Y, Z — оси декартовой системы координат;
 δ^* — толщина вытеснения пограничного слоя, м;
 Δ^* — характерный размер ячейки расчетной сетки, м;
 λ_0 — расстояние от оси основного подковообразного вихря до цилиндра, м;
 ρ — плотность воды, кг/м³;

Индексы:

in — значение на входе;
 max — максимальное значение;
 t — турбулентная величина;
 w — значение на стенке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- W.A.Eckerle, L.S. Langston. Horseshoe vortex formation around a cylinder // Journal of Turbomachinery, April 1987, pp.278-285.
- 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.
- Praisner, T.J., Smith, C.R., 2006. The Dynamics of the Horseshoe Vortex and Associate Endwall Heat Transfer – Part I: Temporal Behavior. ASME J. Turbomach., Vol. 128 pp. pp. 747-754.
- Praisner, T.J., Smith, C.R., 2006. The Dynamics of the Horseshoe Vortex and Associate Endwall Heat Transfer – Part II: Time-Mean Results. ASME J. Turbomach., Vol. 128 pp. 755-762.
- А.М. Левченко. Численное моделирование подковообразных структур, формирующихся при натекании турбулентного пограничного слоя на цилиндрическое препятствие. Тезисы доклада на научно-технической конференции "Перспективные направления научных исследований в аэродинамике. Передача знаний молодежи", - г. Жуковский, 27 ноября 2008 г.
- F.R. Menter, R. Langtry, M.Kuntz. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model // Turbulence, Heat and Mass Transfer 4 (CD-ROM Proceedings). Begell House, Inc. 2003.
- ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Release 11.0. ANSYS, Inc. 2006.
- Е.М.Смирнов, Д.К.Зайцев. Метод конечных объемов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии // Научно - технические ведомости СПбГПУ. - 2004. - № 3. - с. 70-81.