

На правах рукописи

Адамьян Дмитрий Юрьевич

**Метод генерации синтетической
турбулентности на входных границах для
расчета турбулентных течений в рамках
вихреразрешающих подходов**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Стрелец Михаил Хаимович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Емельянов Владислав Николаевич
кандидат физико-математических наук
Денисихина Дарья Михайловна

Ведущая организация: Институт прикладной математики им.
М.В. Келдыша РАН

Защита состоится «6» декабря 2011 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.07 в ФГБОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет” (195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, корпус 1, кафедра гидроаэродинамики).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”.

Автореферат разослан «____» _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук, доцент

Зайцев Д.К.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

В настоящее время для расчета турбулентных течений на практике используются преимущественно осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS), замкнутые с помощью той или иной полуэмпирической модели турбулентности. Этот подход обладает высокой экономичностью и во многих случаях обеспечивает вполне приемлемую точность расчета. Однако, по самой своей природе, он является не универсальным, и для широкого круга турбулентных течений, в частности, для отрывных пристеночных течений результаты, полученные с его помощью, оказываются неудовлетворительными, независимо от уровня сложности используемых полуэмпирических моделей.

Альтернативой RANS являются базирующиеся на первых принципах аэродинамики “вихреразрешающие” подходы к описанию турбулентности, в частности, метод прямого численного моделирования (Direct Numerical Simulation, DNS), метод моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES) и гибридные RANS-LES методы. Эти подходы свободны (DNS) или почти свободны (LES) от эмпиризма и, в принципе, позволяют с высокой точностью рассчитать любое турбулентное течение. Кроме того, они обладают несопоставимо большей, чем RANS, информативностью, так как с их помощью удастся определить не только параметры осредненного течения, но и получить детальные данные о нестационарных полях флуктуаций скорости и давления, что является принципиально важным при решении задач аэроакустики и аэроупругости. Однако на пути практического использования вихреразрешающих подходов существует ряд нерешенных пока проблем, к числу которых относится и рассматриваемая в настоящей работе проблема задания граничных условий на входных проницаемых границах расчетной области. Она состоит в том, что для успешного функционирования вихреразрешающих подходов эти условия должны включать как характеристики осредненного течения на входных границах, которые обычно известны или могут быть достаточно легко определены расчетным путем, так и параметры турбулентности (нестационарные пульсации скорости), которые, как правило, неизвестны. При этом следует подчеркнуть, что несоответствие параметров пульсационного движения на входных границах реальному течению приводит к значительным ошибкам не только при расчете пульсационных, но осредненных характеристик течения внутри расчетной области.

В связи с этим разработке эффективных (экономичных и точных) способов задания реалистичных параметров турбулентности для постановки нестационарных граничных условий на входных границах в рамках вихреразрешающих подходов к моделированию турбулентности посвящено большое число

исследований. Тем не менее, существующие методы обладают существенными недостатками и не обеспечивают удовлетворительного решения рассматриваемой задачи.

Так, метод “рециклинга” турбулентности является недостаточно универсальным, и его применение для расчета течений в областях сложной геометрии не обеспечивает приемлемой точности расчета или оказывается просто невозможным.

Эти же замечания в значительной степени относятся к весьма трудоемким методам, использующим для формирования нестационарных граничных условий результаты “вспомогательного” вихреразрешающего расчета более простых течений.

Последняя группа методов, используемых для этой цели базируется на создании “синтетической турбулентности”. Эти методы являются более гибкими и универсальными и пригодны для расчета самых разнообразных, в том числе, геометрически сложных турбулентных течений, представляющих непосредственный практический интерес. Однако, существующие в настоящее время конкретные способы генерации синтетической турбулентности, а также алгоритмы их инкорпорации в решение уравнений динамики жидкости в рамках вихреразрешающих подходов являются пока недостаточно точными, что значительно ограничивает их практическое применение.

Приведенные краткие сведения о состоянии рассматриваемой проблемы свидетельствуют об актуальности и практической важности темы диссертации и определяют сформулированные ниже цели и конкретные задачи исследования.

Цели работы

Основная цель диссертации состоит в построении пригодного для широкого класса течений, обеспечивающего высокую точность, простого в реализации и не требующего больших вычислительных затрат метода задания нестационарных граничных условий на входных границах LES (или LES-подобласти) при расчете сложных турбулентных течений с помощью LES или комбинированных RANS-LES подходов. Конкретные задачи работы состоят в следующем:

1. Разработка и программная реализация метода генерации “синтетической турбулентности”
2. Калибровка и верификация разработанного метода путем его применения к расчету “канонических” сдвиговых турбулентных течений: развитого течения в плоском канале, течения в пограничном слое на плоской пластине и течения в плоском слое смешения.

3. Разработка эффективной методики RANS-LES расчета сложных турбулентных течений с использованием разработанного метода генерации “синтетической турбулентности” при постановке граничных условий на границе между RANS и LES подобластями.
4. Тестирование предложенных методов на примере расчета сложных течений с отрывом и присоединением: LES расчет течения в несимметричном диффузоре прямоугольного сечения и RANS-LES расчет обтекания выпуклости на плоской пластине.

Научная новизна работы

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработан экономичный, достаточно точный и универсальный (пригодный для расчета течений в областях сложной геометрии) метод генерации “синтетической турбулентности” для постановки нестационарных граничных условий на входных границах расчетной области при моделировании турбулентности в рамках современных вихреразрешающих подходов. Основным новым элементом этого метода является учет анизотропии вихревых структур в пристеночных турбулентных потоках.
2. Разработана новая одностадийная методика проведения расчетов в рамках комбинированных RANS-LES подходов, базирующаяся на предложенном методе генерации “синтетической турбулентности” в сочетании с многоблочными перекрывающимися сетками.

Достоверность полученных результатов

Все расчеты, представленные в работе, выполнены с использованием CFD кода лаборатории “Вычислительная гидроаэроакустика и турбулентность” СПбГПУ, прошедшего широкое тестирование в многочисленных расчетных исследованиях по моделированию турбулентных течений.

Кроме того, достоверность результатов диссертационной работы гарантируется тщательной верификацией разработанных методов путем сравнения полученных с их помощью результатов с известными из литературы результатами расчетов других авторов и с экспериментальными данными.

Практическая ценность работы

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Предложенный метод генерации “синтетической турбулентности” на входных границах LES обеспечивает возможность практического применения этого высокоточного подхода к расчету турбулентных течений при приемлемых уже сегодня вычислительных затратах.
2. Разработанная одноэтапная методика проведения комбинированного RANS-LES расчета сложных турбулентных течений в сочетании с предложенным методом генерации “синтетической турбулентности” позволяет значительно снизить вычислительные затраты по сравнению с методом LES без заметного снижения точности решения.

Финансовая поддержка работы

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №09-08-00126-а) и Правительства Санкт-Петербурга.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на российских и международных конференциях и семинарах: XXXVIII Неделе науки СПбГПУ (Санкт-Петербург, 2009), Всероссийской молодежной конференции “Устойчивость и турбулентность течений гомогенных и гетерогенных жидкостей” (Новосибирск, 2010), Политехническом симпозиуме “Молодые ученые — промышленности Северо-Западного региона” (Санкт-Петербург, 2010), Международной конференции по вычислительной гидродинамике ICCFD-6 (Санкт-Петербург, 2010), XVIII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева “Проблемы газодинамики и теплообмена в новых энергетических технологиях” (Звенигород, 2011), Европейской конференции по аэрокосмическим наукам EUCASS-4 (Санкт-Петербург, 2011).

Публикации по теме диссертации

Основные результаты работы изложены в восьми публикациях.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 115 наименований. Работа изложена на 142 страницах машинописного текста, включая 8 таблиц и 54 рисунка.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, ее научная и практическая значимость, сформулированы цель и основные задачи исследования.

В **первой главе** представлен обзор существующих методов задания условий на входных проницаемых границах расчетной области при использовании вихреразрешающих подходов к расчету турбулентных течений.

В частности, в **разделе 1.1** рассмотрены методы “рециклинга” турбулентности и описан наиболее популярный метод этого класса [Lund и др. – J. Comp. Phys. 1998, vol. 140, no. 2, pp. 233–258], который в дальнейшем используется для оценки точности предлагаемого метода. В **разделе 1.2** представлено описание методов задания входных граничных условий, базирующихся на использовании вспомогательного вихреразрешающего расчета простых течений. В **разделе 1.3** представлены основные известные методы, использующие “синтетическую турбулентность”, и приведено описание одного из лучших известных в настоящее время методов этой группы — метода синтетических вихрей (Synthetic Eddy Method, SEM) [Jarrin и др. – Int. J. Heat Fluid Flow. 2006, vol. 27, no. 4, pp. 585–593]. Наконец, в **разделе 1.4** проведен сравнительный анализ методов разных групп, на основе которого сделан вывод о том, что наиболее перспективными являются методы, базирующиеся на использовании “синтетической турбулентности”.

Во **второй главе** подробно изложен разработанный метод генерации “синтетической турбулентности” (**раздел 2.1**), представлено описание комбинированного RANS-LES подхода к моделированию турбулентных течений (**раздел 2.2**) и описаны способы использования разработанного метода для постановки граничных условий на входных границах LES и LES подобласти при проведении комбинированного RANS-LES расчета сложных турбулентных течений (**раздел 2.3**).

В основе предлагаемого генератора “синтетической турбулентности” лежит идея спектрального представления поля флуктуаций скорости [Kraichnan – Phys. Fluids. 1970, vol. 13, no. 1, pp. 22–31], а также некоторые элементы генератора синтетической однородной изотропной турбулентности, разработанного для решения задач аэроакустики [Betcha и др. – AIAA J. 1994, vol. 32, no. 3, pp. 455–463]. Наиболее важное отличие разработанного метода от его предшественников состоит в том, что он учитывает анизотропию турбулентности в окрестности твердых стенок. Вкратце суть метода состоит в следующем.

Скорость на входной границе LES области задается как сумма средней и флуктуационной составляющей скорости

$$\mathbf{u}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{U}(\mathbf{r}) + \mathbf{u}'(\mathbf{r}, t). \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{U}(\mathbf{r})$ — поле средней скорости на входной границе, предполагаемое известным, например, из RANS решения, а $\mathbf{u}'(\mathbf{r}, t)$ — поле флуктуаций скорости.

Как и во многих других методах генерации “синтетической турбулентности”, поле пульсаций скорости $\mathbf{u}'(\mathbf{r}, t)$ строится таким образом, чтобы соответствующий тензор вторых моментов $\langle u'_i u'_j \rangle$ был равен заданному тензору напряжений Рейнольдса \mathbf{R} . Выполнение этого требования достигается с помощью разложения тензора \mathbf{R} по Холецкому $\mathbf{R} = \mathbf{A}^T \mathbf{A}$, где

$$\mathbf{A} = \{a_{ij}\} = \begin{pmatrix} \sqrt{R_{11}} & 0 & 0 \\ \frac{R_{21}}{\sqrt{R_{11}}} & \sqrt{R_{22} - a_{21}^2} & 0 \\ \frac{a_{11} R_{31}}{\sqrt{R_{11}}} & \frac{R_{32} - a_{21} a_{31}}{a_{22}} & \sqrt{R_{33} - a_{31}^2 - a_{32}^2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

В результате искомое поле синтетических флуктуаций скорости $\mathbf{u}'(\mathbf{r}, t)$ может быть представлено в виде $u'_i(\mathbf{r}, t) = a_{ij}(\mathbf{r}) v'_j(\mathbf{r}, t)$, где $\mathbf{v}'(\mathbf{r}, t)$ — вспомогательное поле пульсаций скорости, удовлетворяющее условию $\langle v'_i \rangle = 0$, и $\langle v'_i v'_j \rangle = \delta_{ij}$, а задача генерации поля $\mathbf{u}'(\mathbf{r}, t)$ сводится к генерации поля $\mathbf{v}'(\mathbf{r}, t)$. Это поле ищется в виде следующей суперпозиции амплитудно-модулированных мод Фурье

$$\mathbf{v}'(\mathbf{r}, t) = 2\sqrt{\frac{3}{2}} \sum_{n=1}^N \sqrt{q^n} \left[\sigma^n \cos \left(k^n \mathbf{d}^n \cdot \mathbf{r} + \varphi^n + s^n \frac{t}{\tau} \right) \right]. \quad (3)$$

Здесь N — число мод, которое заранее неизвестно и определяется в процессе расчета; q^n — нормированная амплитуда моды, определяемая локальным энергетическим спектром турбулентности (см. далее); k^n — модуль волнового вектора n -ой моды, который имеет направление, определяемое случайным ортом \mathbf{d}^n , равномерно распределенным по единичной сфере; σ^n — орт, определяющий направление скорости n -ой моды, лежащий в плоскости, нормальной к вектору \mathbf{d}^n ($\sigma^n \cdot \mathbf{d}^n = 0$), а направление σ^n в этой плоскости задается углом, являющимся случайным числом, равномерно распределенным в интервале $[0; 2\pi)$; φ^n — фаза n -ой моды, являющаяся случайным числом, равномерно распределенным в интервале $[0; 2\pi)$; s^n — безразмерная круговая частота n -ой моды, являющаяся случайной величиной с нормальным распределением и имеющая среднее значение и стандартное отклонение, равные 2π ; τ — глобальный временной масштаб “синтетической турбулентности” на входной границе.

Входящие в (3) нормированные амплитуды мод

$$q^n = \frac{E(k^n) \Delta k^n}{\sum_{n=1}^N E(k^n) \Delta k^n}, \quad \sum_{n=1}^N q^n = 1 \quad (4)$$

вычисляются с использованием модифицированного безразмерного энергетического спектра фон Кармана:

$$E(k) = \frac{(k/k_e)^4}{\left[1 + 2.4(k/k_e)^2\right]^{17/6}} f_\eta f_{cut}. \quad (5)$$

Введенные в (5) эмпирические функции f_η и f_{cut} предназначены соответственно для учета изменения формы спектра при приближении к колмогоровскому волновому числу k_η и для обеспечения его быстрого падения в окрестности максимального разрешаемого на используемой сетке волнового числа k_{cut} .

Наконец, входящее в (5) волновое число k_e , при котором достигается максимум энергетического спектра (5), соответствует длине волны наиболее энергонесущих мод синтезированного поля флуктуаций скорости или, иными словами, размеру наиболее энергонесущих вихрей “синтетической турбулентности” l_e , то есть $k_e = \frac{2\pi}{l_e}$.

Следует подчеркнуть, что правильное определение величины l_e является крайне важным для обеспечения быстрой адаптации синтетического поля пульсаций скорости, задаваемого на входе в расчетную область, к “реальной” турбулентности, соответствующей LES решению внутри расчетной области. В предложенном методе величина l_e определяется соотношением

$$l_e = \min(2d_w, C_l l_t) \quad (6)$$

где $C_l = 3$ — эмпирическая константа, а l_t — линейный масштаб модели турбулентности, используемой при расчете осредненного профиля скорости в (1) или в RANS подобласти при использовании комбинированного RANS-LES подхода. Например, в случае использования $k - \omega$ модели турбулентности $l_t = \frac{k_t^{1/2}}{C_\mu \omega_t}$.

Как видно из (6), в пристеночной области течения величина l_e определяется расстоянием до стенки, а при удалении от нее — линейным масштабом RANS модели.

Набор векторов волновых чисел, используемых в генераторе турбулентности (3), является общим для всего входного сечения LES. Их модули задаются по закону геометрической прогрессии

$$k^n = k^{\min} \cdot (1 + \alpha)^{n-1}, \quad n = 1 \div N, \quad \alpha = 0.01 \div 0.05. \quad (7)$$

Здесь k^{\min} — минимальное волновое число, которое определяется через волновое число k_e^{\min} , соответствующее максимальному по всему рассматриваемому сечению значению величины l_e с помощью эмпирического соотношения

$$k^{\min} = \beta k_e^{\min}, \quad \beta < 1, \quad k_e^{\min} = \frac{2\pi}{l_e^{\max}}, \quad l_e^{\max} = \max_{\mathbf{r}} \{l_e(\mathbf{r})\}, \quad (8)$$

где $\beta = 0.5$ — эмпирическая константа, а число мод N определяется как максимальное целое число, для которого k^N , рассчитанное по (7), не превышает величины $k_{\max} = 1.5 \max_{\mathbf{r}} \{k_{cut}(\mathbf{r})\}$.

Для окончательной формулировки алгоритма генерации турбулентности необходимо определить входящий в (3) временной масштаб τ . Этот масштаб рассчитывается по величине l_e^{\max} и характерному значению скорости во входном сечении U (например, по максимальной или среднерасходной скорости):

$$\tau = C_\tau l_e^{\max} / U, \quad (9)$$

где $C_\tau = 2$ — эмпирическая константа.

В сочетании с локальным определением масштаба энергонесущих вихрей l_e (6) такой (единый для всего рассматриваемого сечения потока) выбор масштаба времени позволяет генерировать близкие по форме к реальным (вытянутые вдоль по потку в пристеночной части и практически изотропные во внешней области пограничного слоя) вихревые структуры.

Значения эмпирических констант, входящих в (6)–(9) были получены на основе расчетов развитого течения в плоском канале и в пограничном слое на плоской пластине, результаты которых представлены в главе 4. Отметим, что предварительные расчеты, выполненные с использованием различных значений констант C_l и C_τ , лежащих в достаточно широкой окрестности их “оптимальных” значений, показали, что чувствительность полученных решений к этим константам невелика.

В качестве примера “синтетической турбулентности”, создаваемой разработанным генератором, на рис. 1 представлено мгновенное поле скорости, построенное с его помощью по профилям скорости и характеристик турбулентности, полученным из RANS расчета установившегося течения в плоском канале с использованием $k - \omega$ SST модели Ментера. Как видно из сравнения этого поля с соответствующим “эталонным” полем, полученным из LES расчета данного течения, как форма, так и характерные размеры синтетических турбулентных структур, построенных с помощью предлагаемого метода, весьма близки к соответствующим “реальным” (разрешенным с помощью LES) характеристикам турбулентности.

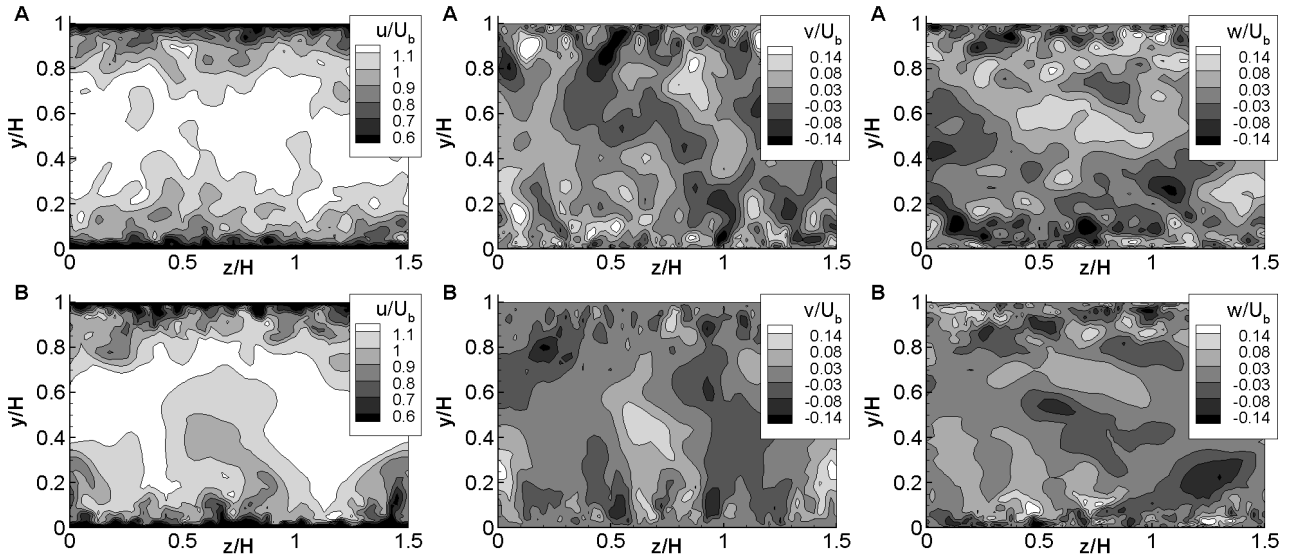


Рис. 1. Синтетическое (верхний ряд) и “эталонное” (нижний ряд) поля компонент скорости в поперечном сечении плоского канала при $Re_{tau} = 400$.

В разделе 2.2 представлено описание комбинированного RANS-LES подхода к моделированию турбулентных течений и приведен краткий обзор научных работ, посвященных этому подходу.

В разделе 2.3 описаны два способа применения представленного выше генератора “синтетической турбулентности” для постановки граничных условий на входных границах при проведении расчетов турбулентных течений в рамках вихреразрешающих подходов к моделированию турбулентности.

Первый (традиционный) способ состоит в следующем.

При проведении LES расчетов параметры осредненного течения на входной границе, знание которых необходимо для задания средней скорости и для генерации “синтетической турбулентности”, определяются точно также как это делается в рамках RANS подходов. При использовании комбинированных RANS-LES методов расчет проводится в два этапа. Сначала производится RANS расчет всего течения или его части, заведомо включающей входную границу предполагаемой LES подобласти, и лишь после этого производится LES расчет, в котором поле скорости на этой границе определяется как сумма вектора скорости из RANS решения и синтетических флуктуаций скорости (см. соотношение (1)).

Второй способ, предложенный в настоящей работе для расчетов в рамках комбинированных RANS-LES подходов, реализуется в один этап и в этом смысле является более удобным и экономичным, но его применение возможно лишь в том случае, когда вычислительный код, с помощью которого производится расчет, допускает использование перекрывающихся многоблочных сеток. В этом случае расчетная область разбивается на перекрывающиеся

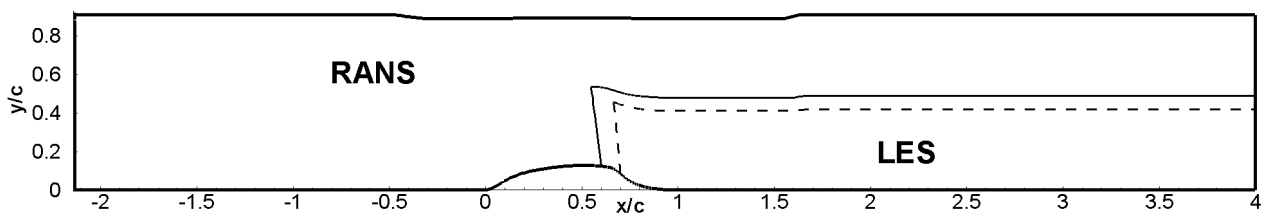


Рис. 2. Схема границ RANS и LES областей при использовании комбинированного RANS-LES подхода.

сеточные блоки (см. схему на рис. 2), соответствующие RANS и LES под-областям (рекомендуемая глубина перекрытия подобластей составляет 10-20 ячеек сетки). При этом, наряду с граничными условиями на входной границе LES подобласти, расположенной вверх по потоку от выходной границы RANS подобласти (эти условия задаются точно также, как в описанном выше двух-этапном подходе), необходимо поставить граничные условия на выходной гра-нице RANS подобласти. Для этой цели используется LES решение в точках этой границы на предыдущем временном шаге.

В **третьей главе** диссертации описаны модели турбулентности и чис-ленный метод, используемый в работе в сочетании с предлагаемым методом генерации “синтетической турбулентности” при проведении его тестирования. Она состоит из двух разделов.

В **разделе 3.1** приведены осредненные по Рейнольдсу и пространствен-но отфильтрованные уравнения Навье-Стокса для несжимаемой жидкости (RANS и LES уравнения соответственно) и описаны модели турбулентно-сти, используемые в работе для их замыкания: $k - \omega$ SST модель Менте-ра и явная алгебраическая модель рейнольдсовых напряжений для RANS и две модели для LES с пристенным моделированием (гибридная алгебраиче-ская подсеточная модель и метод Improved Delayed Detached Eddy Simulation (IDDES) [Shur и др. – Int. J. Heat Fluid Flow. 2008, vol. 29, no. 6, pp. 1638–1649]).

В **разделе 3.2** изложен численный метод, используемый для расчета турбулентных течений в вычислительном коде NTS, в рамках которого был реализован описанный в главе 2 метод генерации “синтетической турбулент-ности” и который применялся при решении всех рассматриваемых в главах 4 и 5 конкретных задач.

В частности, **глава 4** посвящена калибровке и верификации разработан-ного метода на примере LES “канонических” сдвиговых турбулентных тече-ний: развитого течения в плоском канале, течения в пограничном слое на плоской пластине и течения в плоском слое смешения.

В **разделе 4.1** описана постановка задачи о развитом турбулентном те-чении в плоском канале и приведены результаты следующих расчетов этого течения:

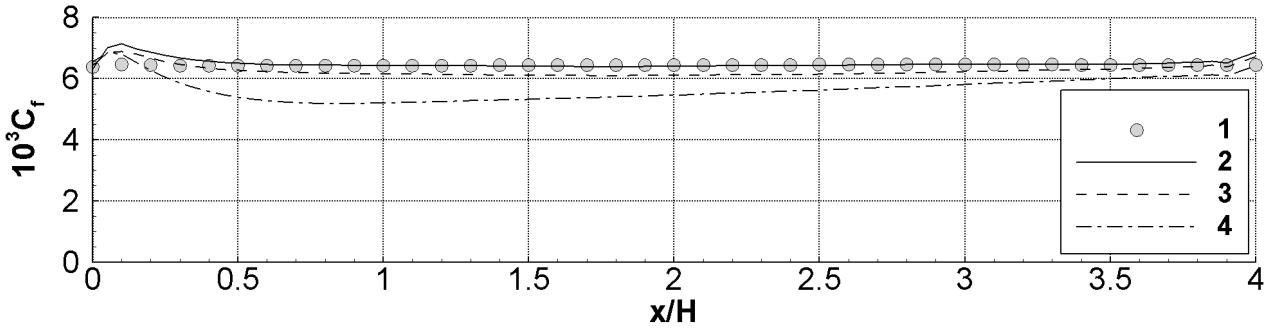


Рис. 3. Распределение коэффициента трения по длине канала. 1 — “эталонный” расчет, 2 — входные граничные условия заданы с применением разработанного метода, используется осредненное LES решение, 3 — то же, используются профили параметров осредненного течения, полученные по $k - \omega$ SST модели, 4 — входные ГУ заданы с применением метода синтетических вихрей.

- “эталонный” расчет с применением периодических граничных условий в продольном направлении,
- расчеты с использованием для задания входных граничных условий “синтетической турбулентности”, созданной с помощью предлагаемого метода и метода синтетических вихрей.

Показано, что результаты “эталонных” расчетов с хорошо согласуются с известными из литературы результатами прямого численного моделирования [Moser и др. – Phys. Fluids. 1999, vol. 11, no. 4, pp. 943–945], что подтверждает надежность используемого численного метода и гарантирует обоснованность выводов относительно точности различных методов создания турбулентного контента во входном сечении канала, сделанных на основе проведенных расчетов. Основной из этих выводов состоит в том, что при использовании разработанного метода отклонение трения на стенке и профиля средней скорости от “эталонных” независимо от числа Рейнольдса оказывается незначительным, тогда как при использовании метода синтетических вихрей наблюдается существенное искажение этих характеристик и профилей Рейнольдсовых напряжений вблизи входного сечения и их более медленное приближение к “эталонным” вниз по потоку (см. рис. 3 и 4). Кроме того, результаты расчетов с использованием предлагаемого метода слабо зависят от того, каким образом получены профили параметров осредненного течения во входном сечении: из RANS решения с использованием $k - \omega$ SST модели или путем осреднения по времени “эталонного” (с периодическими по x условиями) LES решения.

В разделе 4.2 описана постановка задачи и приведены результаты верификации разработанного метода на примере расчета еще одного канонического пристеночного течения, а именно, течения в пограничном слое на плоской

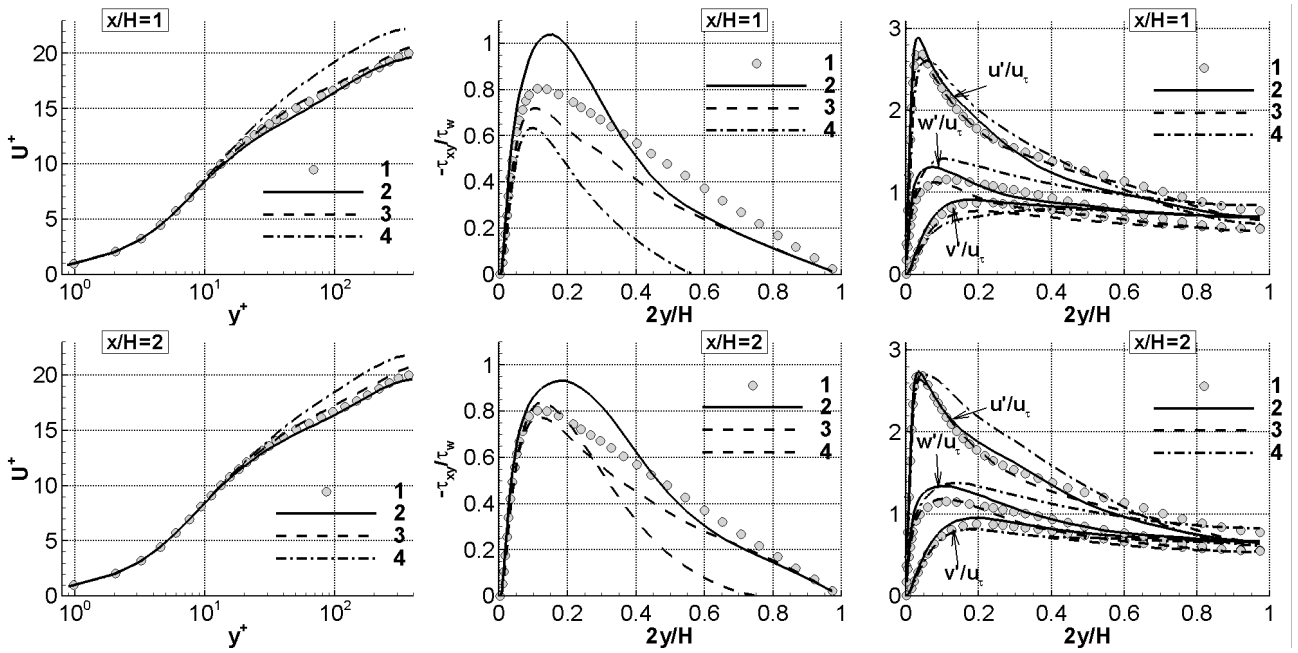


Рис. 4. Профили средней скорости, касательных и нормальных напряжений Рейнольдса для течения в плоском канале. Обозначения кривых аналогичны рис. 3.

пластине.

В качестве “эталоны” в этом случае использовалось решение, в котором для задания входных граничных условий применялся метод “рециклинга” турбулентности, описанный в разделе 1.1. При этом показано, что результаты “эталонного” расчета, полученные в настоящей работе, хорошо согласуются с результатами прямого численного моделирования того же течения [Spalart – J. Fluid Mech. 1988, vol. 187, pp. 61-98]. Таким образом, как и в случае развитого течения в канале, подтверждена надежность “эталонного” решения. Это гарантирует объективность выводов о возможностях разработанного в диссертации метода задания входных граничных условий, базирующихся на сравнении полученных с его помощью результатов с “эталонным” решением. Результаты такого сравнения показаны на рис. 5 и 6.

Как видно из рис. 5, отличие продольного распределения коэффициента трения на стенке, рассчитанного с использованием предлагаемого метода, от “эталонного” распределения составляет не более 10 – 15%. Более того, это распределение заметно лучше, чем “эталонное”, согласуется с эмпирической зависимостью коэффициента трения от числа Рейнольдса, построенного по толщине потери импульса [Schoenherr – SNAME Transactions. 1932, vol. 40, pp. 279–313] и с RANS решением с моделью $k - \omega$ SST, которое, как известно, является для данного течения весьма точным.

На рис. 6 показано сравнение профилей средней скорости и напряжений Рейнольдса, рассчитанных с использованием предлагаемого метода, с анало-

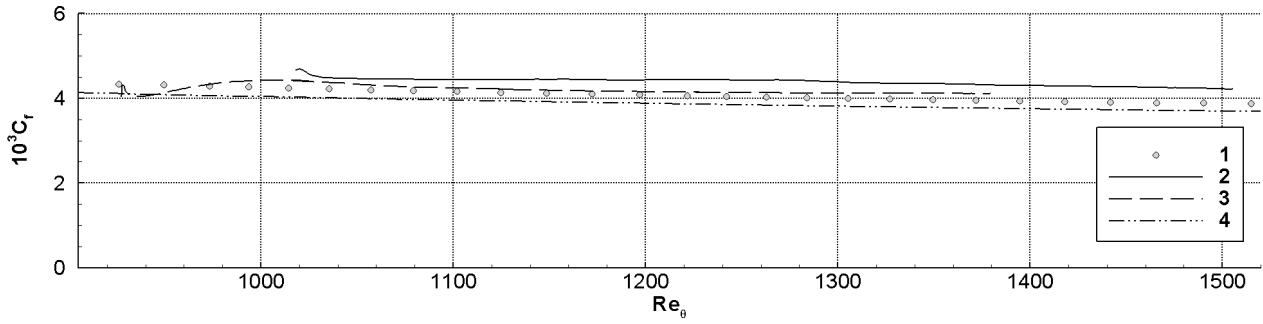


Рис. 5. Сравнение зависимостей коэффициента трения от числа Рейнольдса, построенного по толщине потери импульса пограничного слоя. 1 — эмпирическая зависимость, 2 — “эталонный” расчет с использованием “рециклинга” турбулентности, 3 — расчет с применением разработанного метода, 4 — RANS расчет с моделью $k - \omega$ SST Менгера.

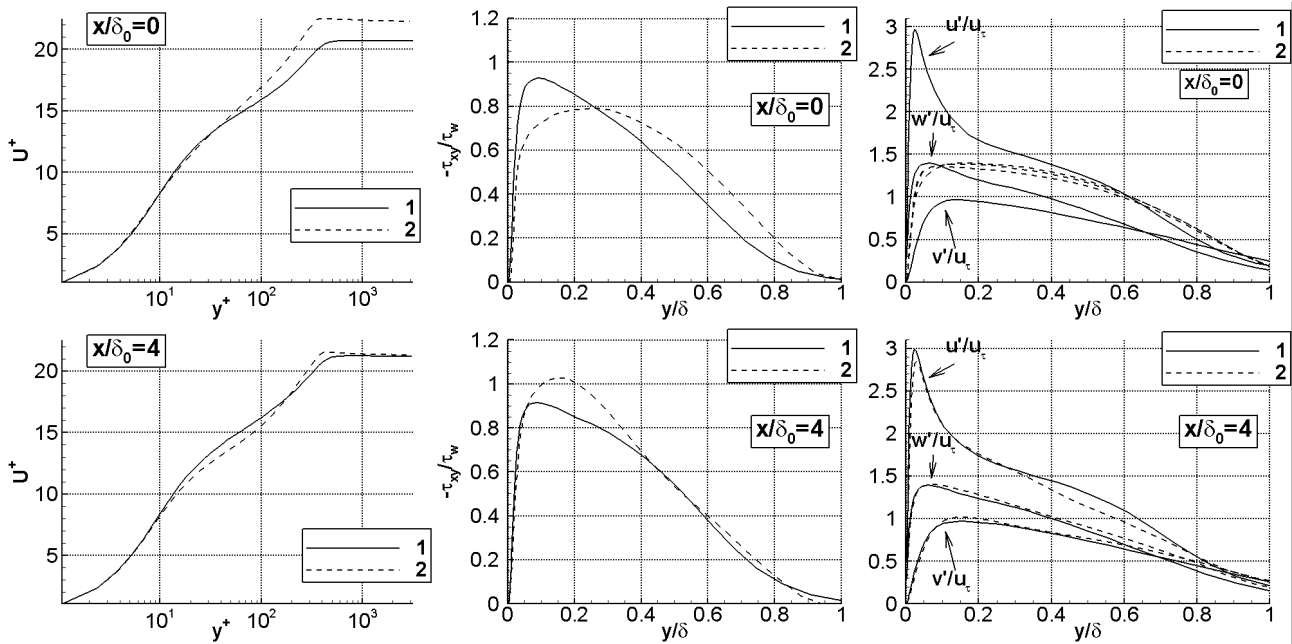


Рис. 6. Профили средней скорости, касательных и нормальных напряжений Рейнольдса для течения в пограничном слое. 1 — “рециклинг” турбулентности, 2 — разработанный метод генерации “синтетической турбулентности”.

гичными результатами “эталонного” расчета в различных сечениях потока. Из него видно, что несмотря на существенное различие этих профилей во входном сечении ($x/\delta_0 = 0$), при движении вниз по потоку профили, рассчитанные с использованием “синтетической турбулентности”, быстро приближаются к “эталонным” и уже при $x/\delta_0 = 4$ различие между двумя решениями становится незначительным. Это свидетельствует о том, что при расчете пограничного слоя на пластине поле турбулентных флуктуаций скорости, создаваемое во входном сечении с помощью разработанного генератора “синтетической турбулентности”, быстро эволюционирует к физически “реалистичному” (соответствующему “эталонному” LES решению) полю турбулентных пульсаций скорости.

Раздел 4.3 посвящен решению последней из рассматриваемых в работе задач о расчете “канонических” сдвиговых течений — задачи об эволюции свободного плоского сдвигового слоя. Как и в двух предыдущих разделах, в нем представлена постановка этой задачи и проведено сравнение LES решений, полученных с использованием разработанного метода задания входных граничных условий, с “эталонным” решением, в качестве которого в данном случае использовалось RANS решение с $k - \omega$ SST моделью Ментера. При этом LES расчеты выполнены для трех расчетных областей с различными положениями входной границы.

На рис. 7 представлено сравнение рассчитанных с использованием предлагаемого метода продольных (вдоль оси x) распределений толщины потери импульса слоя смешения с аналогичным распределением из RANS расчета. Видно, что на входных границах LES отсутствуют какие-либо негладкости и все три LES решения практически совпадают друг с другом и с RANS решением.

На рис. 8 показано сравнение полученных из LES профилей скорости и касательных напряжений Рейнольдса с экспериментальными данными [Bell, Mehta – AIAA J. 1990, vol. 28, no. 12, pp. 2034–2042]. Из него видно, что во всей расчетной области наблюдается хорошее согласование результатов расчета с экспериментом.

Таким образом, результаты верификационных расчетов, приведенные в главе 4, убедительно свидетельствуют о высокой точности сформулированного в главе 2 метода генерации “синтетической турбулентности” на входных границах при расчете канонических пристеночных и свободных сдвиговых течений в рамках вихреразрешающих подходов к моделированию турбулентности. Возможности этого метода применительно к расчету сложных турбулентных течений продемонстрированы в **пятой главе**.

В **разделе 5.1** этой главы приведена постановка задачи и результаты расчетов трехмерного отрывного течения в диффузоре прямоугольного сечения, исследовавшегося в экспериментах [Cherry и др. — Int. J. Heat Fluid Flow.

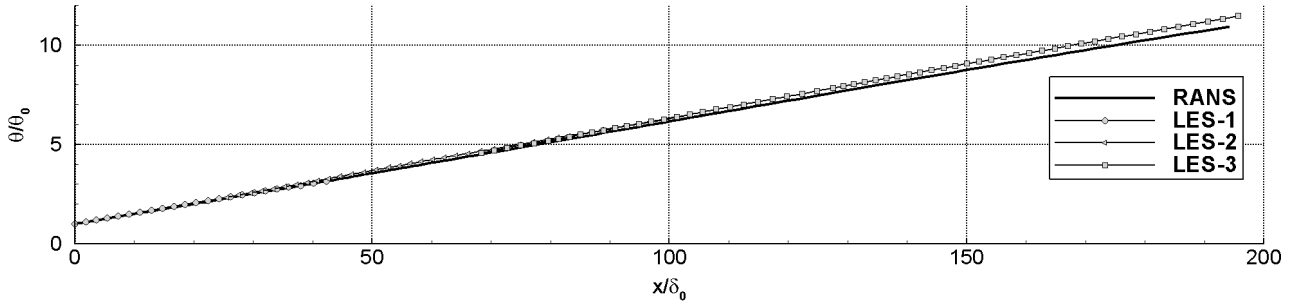


Рис. 7. Распределение толщины потери импульса слоя смешения по направлению течения

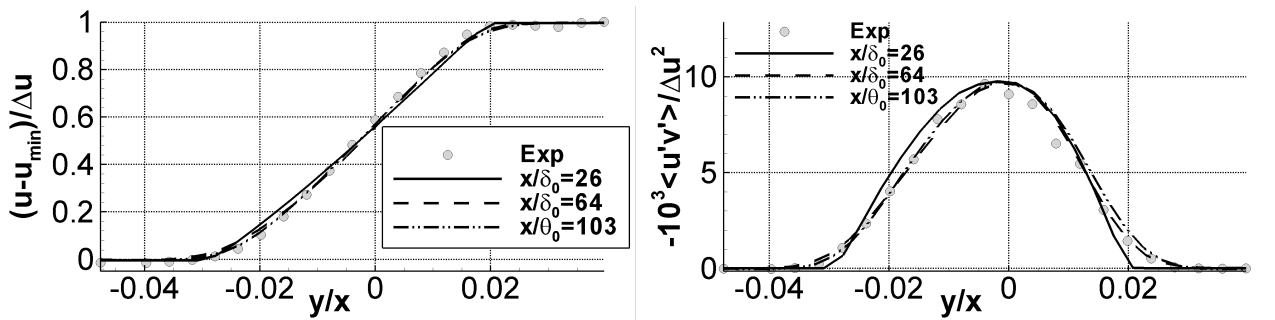


Рис. 8. Сравнение профилей средней скорости и касательных напряжений Рейнольдса, полученных в LES расчете течения в плоском слое смешения, с экспериментальными данными.

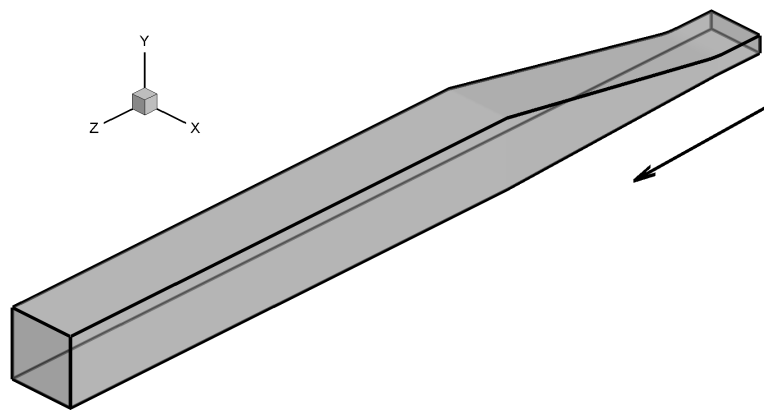


Рис. 9. Схема течения в диффузоре.

2008, vol. 29, no. 3, pp. 803–811]. Это течение (см. схему на рис. 9) характеризуется наличием анизотропии Рейнольдсовых напряжений и отрывом потока от верхней стенки диффузора, что делает возможность его достаточно точного расчета в рамках RANS, особенно в сочетании с линейными моделями турбулентной вязкости, весьма проблематичной.

В работе были проведены следующие расчеты данного течения:

- RANS расчеты с $k-\omega$ SST моделью и нелинейной EARSM моделью [Menter и др. – 3rd EUCASS. 2009];
- LES с пристеночным моделированием и входными граничными условиями, базирующихся на методе “рециклинга” турбулентности (“эталонный” расчет);
- LES с пристеночным моделированием и входными граничными условиями, базирующихся на разработанном методе генерации “синтетической турбулентности”. При этом, в соответствии с условиями проведения экспериментов, предполагалось, что во входном сечении диффузора имеет место развитое течений в прямоугольном канале, которое рассчитывалось с использованием RANS с $k-\omega$ SST и EARSM моделями турбулентности.

Сравнение полученных распределений давления на нижней стенке диффузора и полей продольной компоненты скорости с результатами эксперимента, представленное на рис. 10 и 11, позволяет сделать следующие выводы.

Результаты EARSM RANS намного лучше согласуются с экспериментом, чем результаты $k-\omega$ SST RANS (это подтверждает важную роль анизотропии Рейнольдсовых напряжений в рассматриваемом течении). Тем не менее, даже при использовании EARSM, RANS не обеспечивает приемлемой для практики точности расчета.

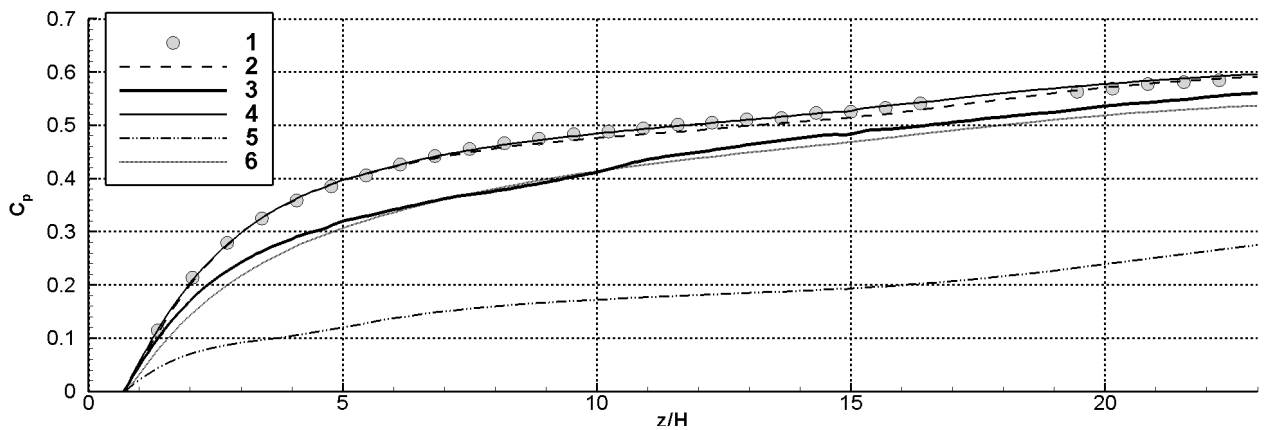


Рис. 10. Распределение коэффициента давления на нижней стенке диффузора. 1 — эксперимент, 2 — LES с “рециклингом” турбулентности, 3 — LES с использованием разработанного метода задания входных граничных условий (поля средней скорости и напряжений Рейнольдса получены из RANS с $k - \omega$ SST моделью), 4 — то же, поля средней скорости и напряжений Рейнольдса получены из RANS с EARSM моделью, 5 — RANS с $k - \omega$ SST моделью, 6 — RANS с EARSM моделью.

В случае использования для определения параметров “синтетической турбулентности” во входном сечении диффузора полей средней скорости и напряжений Рейнольдса, рассчитанных с помощью EARSM RANS, результаты LES практически совпадают с результатами эталонного расчета (LES с “рециклингом” турбулентности) и очень хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Наконец, при использовании для определения параметров “синтетической турбулентности” линейной $k - \omega$ SST RANS модели, результаты LES заметно отклоняются от результатов эталонного расчета и эксперимента, но, тем не менее, заметно превосходят по точности результаты расчета течения в диффузоре с использованием $k - \omega$ SST RANS.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что для течений, в которых существенно проявляется анизотропия Рейнольдсовых напряжений, предпочтительным является использование разработанного метода генерации “синтетической турбулентности” в сочетании нелинейными RANS моделями, учитывающими эту анизотропию. В противном случае (при использовании для этой цели линейных RANS моделей), данный метод также существенно превосходит по точности соответствующую RANS модель, но потенциальные преимущества разработанного метода реализуются не в полной мере.

В разделе 5.2 рассмотрена задача о расчете обтекания выпуклости на пластине, исследовавшегося в экспериментах [Greenblatt и др. – AIAA Paper 2005-0485] (см. схему на рис. 12). Также как и течение в прямоугольном диффузоре, рассмотренное в разделе 5.1, это течение является общепринятым

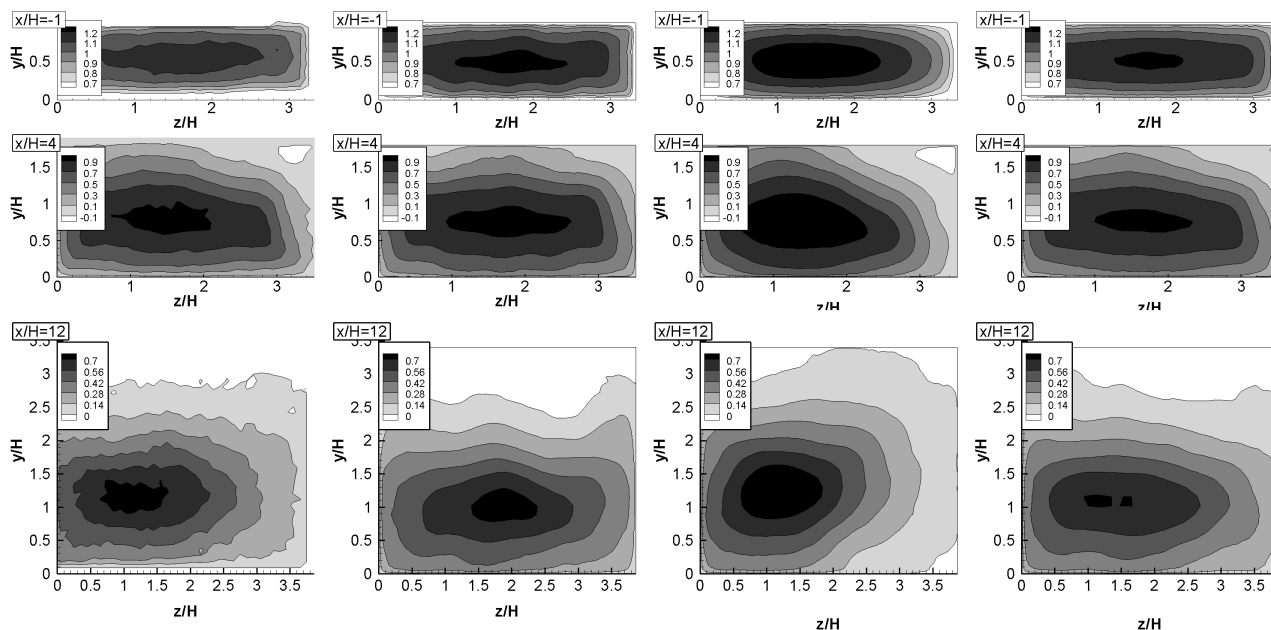


Рис. 11. Осредненные поля продольной компоненты скорости для течения в трехмерном диффузоре. Слева направо — эксперимент; LES с “рециклингом” турбулентности; LES с использованием разработанного метода задания входных граничных условий (поля средней скорости и напряжений Рейнольдса получены из RANS с $k - \omega$ SST моделью); то же, поля средней скорости и напряжений Рейнольдса получены из RANS с EARSIM моделью.

международным тестом для оценки возможностей различных подходов к моделированию турбулентности в сильно неравновесных потоках с отрывом и последующим присоединением пограничного слоя.

Для этого течения были выполнены следующие расчеты:

- двумерный RANS расчет;
- IDDES в полной расчетной области;
- комбинированный RANS-IDDES с использованием для постановки граничных условий на интерфейсе одноэтапной методики, описанной в раз-

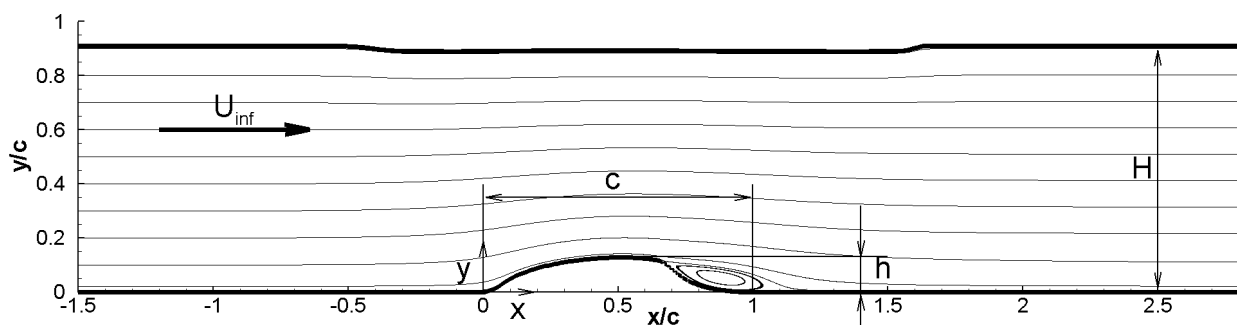


Рис. 12. Схема обтекания выпуклости на пластине.

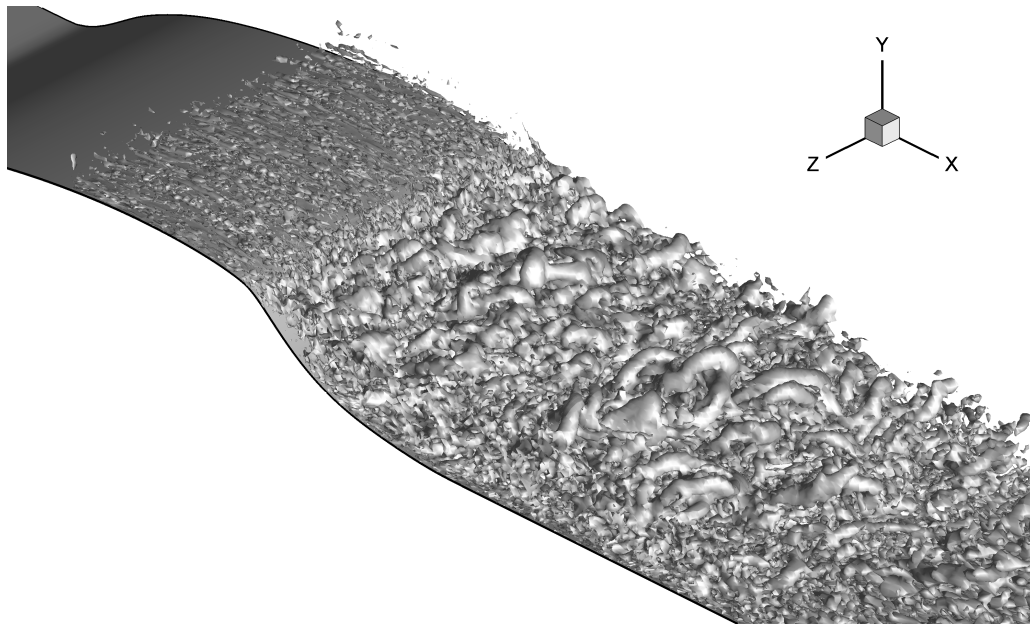


Рис. 13. Изоповерхности λ_2 -критерия, полученные в комбинированном RANS-IDDES расчете обтекания выпуклости на пластине.

деле 2.2. (визуализация разрешенных вихревых структур для этого варианта расчета приведена на рис. 13).

Во всех перечисленных расчетах в качестве базовой RANS модели использовалась $k - \omega$ SST модель.

На рис. 14 в качестве примера представлено сравнение распределений коэффициента трения вдоль стенки, рассчитанных с использованием трех перечисленных подходов. Из рисунка видно, что наилучшее согласование с экспериментом достигается при использовании RANS-IDDES подхода с заданием граничных условий на интерфейсе между RANS и LES подобластями (в приведенном на рисунке примере он расположен при $x/c = 0.4$) по методике, предложенной в настоящей работе, причем небольшое отклонение трения вблизи входной границы IDDES от результатов RANS и IDDES наблюдается лишь на коротком участке длиной около 0.1. Отметим также, что аналогичные результаты были получены при расположении входной границы IDDES при $x/c = 0.6$, то есть в сильно неравновесной части присоединенного пограничного слоя непосредственно вверх по потоку от точки отрыва.

Использование во всей расчетной области метода IDDES, специально разработанного для расчета течений рассматриваемого типа, также приводит к удовлетворительным результатам, но все же несколько уступает по точности комбинированному методу, а результаты $k - \omega$ SST RANS значительно отличаются от результатов измерений и, в частности, сильно завышают длину зоны рециркуляции, формирующейся за выпуклостью.

Полученные результаты позволяют заключить, что предложенный одно-

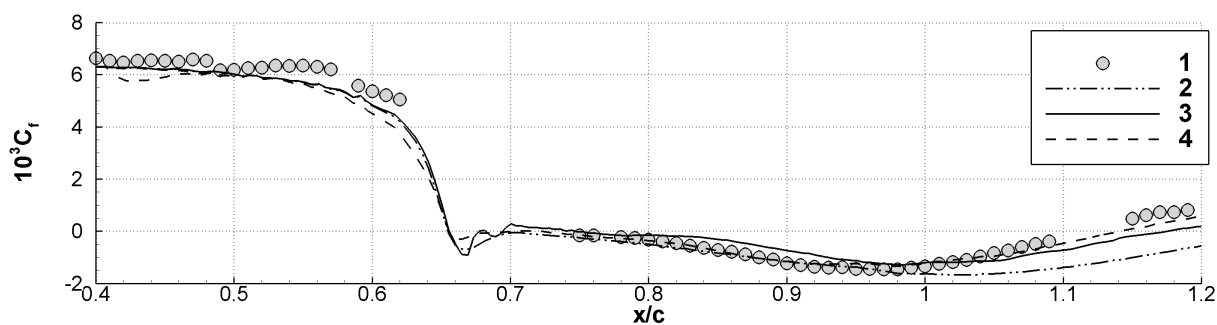


Рис. 14. Распределение коэффициента трения на стенке. 1 — эксперимент, 2 — $k - \omega$ SST RANS, 3 — IDDES во всей расчетной области, 4 — комбинированный RANS-IDDES расчет.

стадийный метод постановки граничных условий на границе между RANS и LES подобластями с использованием генератора “синтетической турбулентности”, описанного в главе 2 диссертации, является не только экономичным и простым в реализации, но и позволяет заметно повысить точность расчета течений с отрывом и присоединением потока по сравнению с IDDES методом.

В Заключение кратко сформулированы основные результаты настоящей работы, которые состоят в следующем:

1. Разработан простой в реализации и экономичный метод задания входных граничных условий при расчете турбулентных течений несжимаемой жидкости в рамках вихререзающих подходов к моделированию турбулентности, относящийся к классу методов генерации “синтетической турбулентности”.
2. Построен одноэтапный алгоритм реализации этого метода при расчете сложных течений в рамках комбинированных RANS-LES подходов к моделированию турбулентности.
3. Эти методы реализованы в рамках CFD программы общего назначения, что позволило провести их тщательную верификацию как на примере расчета трех “канонических” сдвиговых турбулентных течений
 - установившееся течение в плоском канале,
 - течение в пограничном слое на плоской пластине,
 - свободный плоский слой смешения,

так и двух сложных турбулентных течений, характеризующихся существенной неравновесностью, анизотропией Рейнольдсовых напряжений и наличием отрыва и присоединения потока

- течение в несимметричном диффузоре прямоугольного сечения,

- обтекание выпуклости на плоской пластине.

В результате показано, что разработанные методы по крайней мере не уступают, а в ряде случаев превосходят по точности лучшие из известных аналогов и, в тоже время, значительно превосходят их по простоте реализации и универсальности.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Адамьян Д.Ю. Разработка и тестирование алгоритмов сращивания RANS и LES областей при моделировании турбулентных течений / Д.Ю. Адамьян, А.К. Травин // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Часть V. – Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2009. – с. 19–20.
2. Адамьян Д.Ю. Эффективный метод генерации синтетической турбулентности на границе RANS и LES областей для расчетов турбулентных течений при помощи гибридных RANS-LES методов / Д.Ю. Адамьян, А.К. Травин // Доклады Всероссийской молодёжной конференции “Устойчивость и турбулентность течений гомогенных и гетерогенных жидкостей”. – Новосибирск: Параллель, 2010. – с. 53–56.
3. Адамьян Д.Ю. Эффективный метод генерации синтетической турбулентности для постановки входных граничных условий при расчетах турбулентных течений вихреразрешающими методами / Д.Ю. Адамьян, А.К. Травин // Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона: материалы конференций политехнического симпозиума. – Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2010. – с. 25–28.
4. Адамьян Д.Ю. Сравнение гибридных подходов к моделированию турбулентности применительно к расчету течений с отрывом пограничного слоя от гладкой поверхности / Д.Ю. Адамьян, А.К. Травин // Проблемы газодинамики и теплообмена в новых энергетических технологиях: Тезисы докладов XVIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева (23-27 мая 2011г., Звенигород). – Москва: Издательский дом МЭИ, 2011. – с. 317–318.
5. Adamian D.Y. An Efficient Generator of Synthetic Turbulence at RANS-LES Interface in Embedded LES of Wall-Bounded and Free Shear Flows / D.Y. Adamian, A.K. Travin // Proceedings of the 6th International Conference on Computational Fluid Dynamics. – Saint-Petersburg, 2010. – pp. 739-744.

6. Adamian D.Y. Assessment of an approach to generating inflow synthetic turbulence for LES of complex turbulent flows / D.Y. Adamian, A.K. Travin // CD-ROM Proceedings of the 4th European Conference on Aerospace Sciences — EUCASS4. — Saint-Petersburg, 2011. 7 P.
7. Адамьян Д.Ю. Эффективный метод генерации синтетической турбулентности на входных границах LES области в рамках комбинированных RANS-LES подходов к расчету турбулентных течений / Д.Ю. Адамьян, М.Х. Стрелец, А.К. Травин // Математическое моделирование, том 23, № 7, с. 3–19. (**перечень ВАК**).
8. Адамьян Д.Ю. Усовершенствованный метод генерации синтетических вихрей для задания нестационарных входных граничных условий при расчете турбулентных течений / Д.Ю. Адамьян, А.К. Травин // Теплофизика высоких температур, том 49, № 5, с. 728–736. (**перечень ВАК**).