

# **Встроенный LES с использованием объемного источника турбулентных пульсаций**

М. С. Грицкевич, А. В. Гарбарук

## **Введение**

В последние годы при расчете сложных турбулентных течений все более широкое применение находят так называемые гибридные RANS/LES подходы к моделированию турбулентности [1], которые сочетают в себе сильные стороны традиционных методов, базирующихся на уравнениях Рейнольдса (Reynolds-Averaged Navier-Stokes или RANS), и метода моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation или LES). Встроенный LES (Embedded LES или ELES) представляет собой пример достаточно широкой группы гибридных моделей, в которых LES используется только в ограниченных априори задаваемых областях потока (например, там, где RANS не обеспечивает приемлемой точности расчета осредненных параметров течения или требуется определить нестационарные характеристики турбулентности), а в остальной части потока применяется RANS. Однако для успешного функционирования ELES в тех случаях, когда LES подобласть расположена вниз по потоку от RANS подобласти, на входе в нее необходимо каким-либо образом искусственно создать турбулентный “контент”, так как в противном случае для формирования реалистичных полей разрешенных турбулентных пульсаций требуется неприемлемо длинный переходный участок.

Большинство предложенных в настоящее время способов решения этой задачи основывается на задании на входных границах LES подобласти тех или иных нестационарных граничных условий (“синтетической турбулентности”), что накладывает достаточно жесткие

ограничения на выбор положения этой границы и, тем самым, значительно сужает область применимости ELES при расчете течений со сложной геометрией. Кроме того, при использовании данного подхода могут возникать разрывы гидродинамических переменных на границе RANS и LES подобластей, для устранения которых требуется применение специальных приемов [2], трудно реализуемых в CFD кодах общего назначения.

Перспективной альтернативой созданию турбулентного контента с использованием нестационарных граничных условий в LES подобласти ELES является введение в уравнение движения специальным образом сконструированного Объемного Источника Турбулентных Пульсаций (ОИТП) [3]. Однако реализация этой идеи в работе [3], опирающаяся на метод вихрей (Vortex Method или VM) [4] обладает рядом недостатков. В частности, метод вихрей плохо распараллеливается, что делает его малоэффективным при решении требующих больших вычислительных ресурсов сложных задач, для которых в первую очередь предназначен ELES. Кроме того, несмотря на то, что опыт практического использования VM пока невелик, он свидетельствует о том, что этот метод требует сравнительно длинной области вниз по течению от RANS-LES интерфейса для установления реалистичного поля турбулентных пульсаций.

В настоящей работе предложен другой, более простой и эффективный метод ОИТП и проведено его тестирование на примере решения нескольких конкретных задач.

## **1. Описание метода**

Предлагаемый в настоящей работе метод является двухэтапным. На первом этапе производится RANS расчет рассматриваемого течения, а на втором – ELES расчет. При этом в уравнение переноса импульса в узком

слое LES подобласти вблизи границы с RANS подобластью вводится объемный источник, определяемый выражением:

$$\mathbf{S}_u = \frac{\partial \mathbf{u}'}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}' \langle \mathbf{u} \rangle + \langle \mathbf{u} \rangle \mathbf{u}' + \mathbf{u}' \mathbf{u}') \quad (1)$$

где  $\mathbf{u}'$  – вектор турбулентных пульсаций скорости, а  $\langle \mathbf{u} \rangle$  – вектор осредненной скорости, полученный на RANS этапе решения. Дискретный аналог выражения (1) в проекции на ось “ $x_i$ ” имеет вид:

$$(S_{u_i})_c = \left( \frac{u_i'^N - u_i'^{N-1}}{\Delta t} \right)_c + \frac{1}{V} \sum_f \left( A_j u_j'^{N-1} \langle u \rangle_i + A_j \langle u \rangle_j u_i'^{N-1} + A_j u_j'^{N-1} u_i'^{N-1} \right)_f \quad (2)$$

Здесь  $V$  – объем рассматриваемой ячейки сетки,  $\Delta t$  – шаг интегрирования по времени,  $\mathbf{A}_f$  – вектор площади грани ячейки, нижние индексы “ $i$ ” и “ $j$ ” относятся к проекциям векторных величин на оси координат, нижние индексы “ $c$ ” и “ $f$ ” означают значения соответствующих величин в центрах и на гранях ячейки, а верхние индексы “ $N$ ” и “ $N-1$ ” – значения на текущем и предыдущем (известном) временных слоях соответственно.

Входящий в (2) вектор турбулентных пульсаций  $\mathbf{u}'$  определяется при помощи Генератора Синтетической Турбулентности (ГСТ), недавно предложенного в работах [5,6]. Входными параметрами этого генератора является тензор рейнольдсовых напряжений или (в случае использования на RANS этапе линейных моделей турбулентности) величины кинетической энергии  $k_t$  и интегрального линейного масштаба турбулентности  $l_t$ . (предполагается, что линейная RANS модель является дифференциальной моделью с двумя уравнениями).

Отметим, что на втором этапе расчета в LES подобласти могут использоваться как алгебраические, так и дифференциальные подсеточные модели. В последнем случае, во избежание “двойного учета” кинетической энергии турбулентности при переходе из RANS в LES подобласть [7], наряду с внесением источника (1) в уравнение переноса импульса,

необходимо внести сток в уравнение переноса подсеточной кинетической энергии турбулентности. Выражение для этого стока имеет вид:

$$(S_{k_{SGS}})_c = \frac{1}{V} \sum_f (A_j \langle u \rangle_j k_S)_f \quad (3)$$

где  $k_S = \max\{0, k_t - \omega_t (C_{smag} \Delta)^2 S\}$ ,  $\Delta = \min\{C_w \max[d_w, h_{max}], h_{max}\}$  [8],  $k_t$  и  $\omega_t$  - кинетическая энергия турбулентности и удельная скорость ее диссипации, определенные на первом (RANS) этапе расчета,  $S$  - модуль тензора скоростей деформаций,  $d_w$  - ближайшее расстояние от рассматриваемой точки до обтекаемой твердой поверхности,  $h_{max}$  - максимальный размер ячейки в направлениях параллельных поверхности,  $C_{smag}=0.2$  - константа Смагоринского, а  $C_w$  - эмпирическая константа равная 0.15 [8].

Описанный способ введения ОИТП в LES подобласти (соотношения (1) - (3)) был реализован с помощью пользовательского интерфейса в CFD коде общего назначения ANSYS Fluent [9]. При этом для проведения расчетов конкретных течений, рассмотренных в следующем разделе статьи, решение уравнений RANS и LES осуществлялось с использованием следующих моделей турбулентности и численных методов.

На первом (RANS) этапе расчета решались стационарные уравнения Рейнольдса, замкнутые с помощью  $k-\omega$  модели переноса сдвиговых напряжений (Shear Stress Transport или SST модель) [10]. Конвективные члены уравнений аппроксимировались с помощью противопоточной схемы второго порядка [9], а градиент давления – с использованием гибридной схемы первого/второго порядка [11]. Градиенты скорости и турбулентных характеристик аппроксимировались с применением теоремы Гаусса-Грина, записанной относительно центров граней со вторым порядком точности [9]. Для подавления четно-нечетных осцилляций давления использовалась поправка Ри-Чоу для конвективных потоков [11]. Полученные в результате аппроксимаций дискретные уравнения решались

совместно [9] с помощью поточечной релаксации Гаусса-Зейделя, при этом для ускорения сходимости итераций использовался алгебраический многосеточный метод [9].

На втором (ELES) этапе расчета в RANS подобласти решались нестационарные уравнения Рейнольдса с той же, что и на первом этапе моделью турбулентности, а в LES подобласти применялись три различные модели, а именно, классическая подсеточная модель Смагоринского [12], алгебраическая гибридная модель и метод IDDES, предложенные в [8]. При этом во всех случаях конвективные члены в LES-подобласти аппроксимировались с использованием центрально-разностной схемы второго порядка [9], а градиенты давления, скорости и турбулентных характеристик – также как и на RANS этапе. Интегрирование по времени осуществлялось при помощи трехслойной схемы Эйлера второго порядка точности в сочетании с методом безытерационного продвижения по времени [9,13,14], а решение полученных в результате дискретизации систем уравнений осуществлялось теми же методами, что и на RANS этапе.

## **2. Результаты расчетов**

Для проверки корректности и оценки эффективности представленного в настоящей работе способа создания начального турбулентного контента в LES подобласти ELES, с его использованием были выполнены расчеты четырех течений. Первые три из них (вырождение однородной изотропной турбулентности вниз по потоку от ее источника, установившееся течение в плоском канале и обтекание плоской пластины) являются “каноническими” тестами для любых моделей турбулентности, а последнее – течение в плоском канале с выпуклостью на нижней стенке, – представляет собой пример сложных течений с отрывом и

присоединением, достаточно точное предсказание которых с помощью RANS невозможно.

## **2.1. Вырождение однородной изотропной турбулентности**

Данное течение рассматривалось в классических экспериментах [15,16], посвященных изучению процесса затухания турбулентности, создаваемой сеткой, установленной в некотором сечении экспериментальной секции аэродинамической трубы.

Расчетная область представляла собой параллелепипед с размерами  $4D \times 2D \times 2D$  ( $D$  – размер ячеек сетки, генерирующей турбулентность) в направлении течения и в двух нормальных к нему направлениях соответственно. На ELES этапе расчета она разбивалась на RANS ( $0 < x/D < 1$ ) и LES ( $1 \leq x/D < 4$ ) подобласти.

В расчетах использовалась равномерная декартова сетка размером  $65 \times 33 \times 33$ , а шаг интегрирования по времени на ELES этапе составлял  $\Delta t = 0.05D/U_k$ , ( $U_k$  – равно квадратному корню из начальной кинетической энергии турбулентности,) что обеспечивает выполнение условия  $CFL < 1$  ( $CFL$  – число Куранта) во всей расчетной области.

На входной границе расчетной области задавались однородные профили скорости  $u_0 = U_k$ , кинетической энергии турбулентности  $k_0 = U_k^2$  и удельной скорости ее диссипации  $\omega_0 = 15U_k/D$ . На выходной границе задавалось постоянное давление, а все остальные переменные линейно экстраполировались на границу из внутренних точек области. Наконец, на боковых границах использовались условия периодичности.

Для создания турбулентного контента в LES подобласти использовался описанный в предыдущем разделе метод ОИТП. При этом область ненулевого источника располагалась на участке  $1 < x/D < 1.0625$  (ее протяженность составляла одну ячейку сетки).

Следует отметить, что выбранное значение скорости за решеткой существенно меньше, чем значение, имевшее место в экспериментах [15,16]. По этой причине оценка точности предлагаемого метода проводилась на основе сопоставления результатов расчетов не с экспериментальными данными, а с результатами RANS расчета с помощью SST модели [10], которая обеспечивает достаточно точное предсказание скорости затухания изотропной турбулентности, наблюдавшееся в экспериментах [17].

Решение RANS для описанной задачи является тривиальным ( $u=U_k$ ,  $v=0$ ,  $w=0$ ,  $p=const$ ). Поэтому первый этап расчета сводится в данном случае к интегрированию уравнений переноса  $k$  и  $\omega$  SST модели при известном поле скорости.

На втором этапе в LES-подобласти использовалась модель Смагоринского и метод IDDES (последний в данной задаче сводится к подсеточному аналогу RANS модели SST [18]).

Статистическая обработка результатов LES проводилась для временного интервала равного 1000 временных шагов, что соответствует приблизительно 12.5 конвективным единицам времени  $4D/u_0$ . Кроме того, производилось осреднение решения по однородным координатам ( $y$  и  $z$ ).

Некоторые результаты расчета описанного течения представлены на Рис. 1. Они свидетельствуют о том, что, независимо от используемой в LES-подобласти подсеточной модели, предлагаемый метод ОИТП обеспечивает быстрое формирование в ней качественно правильных турбулентных структур (Рис. 1 а). В результате в LES-подобласти происходит практически мгновенный перевод кинетической энергии турбулентности, которая в RANS подобласти полностью моделируется (см. Рис. 1 б при  $0 < x/D < 1$ ), в моделируемую (подсеточную) и разрешенную энергию (см. Рис. 1 б и Рис. 1 в при  $1 < x/D < 4$ ). При этом

полная энергия на протяжении всей расчетной области хорошо согласуется со значениями, полученными в эталонном RANS расчете (Рис. 1 г).

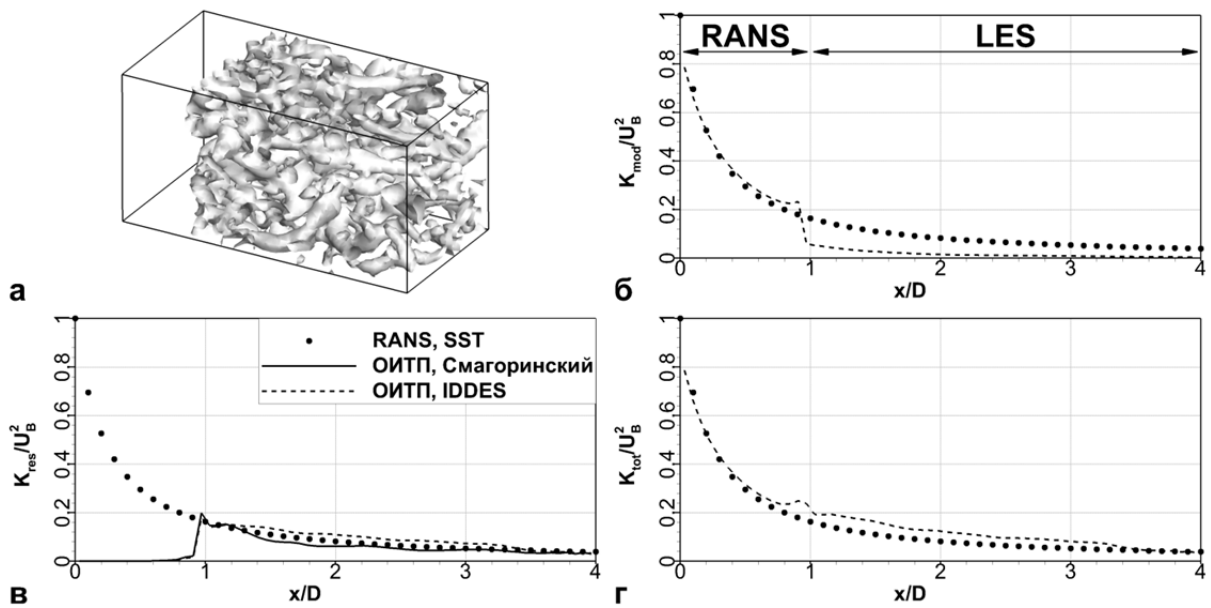


Рис. 1. Результаты расчетов процесса вырождения однородной изотропной турбулентности: мгновенная изоповерхность  $Q$ -критерия, окрашенная по величине модуля скорости (а) и продольные распределения модельной (б), разрешенной (в), и полной (г) кинетической энергии турбулентности

## 2.2. Развитие течения в канале

Данное течение было рассчитано при двух значениях числа Рейнольдса  $Re_\tau$ , построенного по динамической скорости  $u_\tau = (\tau_w/\rho)^{0.5}$  ( $\tau_w$  - напряжение трения на стенке,  $\rho$  - плотность) и высоте канала  $H$ :  $Re_\tau = 395$  и  $18000$ .

Полная длина расчетной области составляла  $4H$ , а ширина -  $1.5H$ . При этом RANS подобласть располагалась при  $0 < x/H < 1.0$ , а LES подобласть – в остальной части расчетной области.

Для обоих чисел Рейнольдса использовалась одна и та же равномерная расчетная сетка по координатам  $x$  и  $z$  с шагами равными  $0.05H$  и  $0.025H$  соответственно. В координатах закона стенки это соответствует значениям  $\Delta x^+ = 40$  и  $\Delta z^+ = 20$  для  $Re_\tau = 395$  и  $\Delta x^+ = 1800$  и  $\Delta z^+ = 900$  для  $Re_\tau = 18000$ . В



направлении нормали к стенкам канала сетка была неравномерной. Ее шаг изменялся по геометрической прогрессии с показателем 1.15 от минимального пристеночного значения, которое выбиралось таким образом, чтобы обеспечить выполнение неравенства  $\Delta y_w^+ < 1$ , до максимального значения равного  $\Delta y = 0.0375H$ , ( $\Delta y^+ = 30$  и 1350 для  $Re_\tau = 395$  и 18000 соответственно). Безразмерный шаг интегрирования по времени на ELES этапе расчета составлял  $\Delta t = 0.02H/U_b$  ( $U_b$  – среднемассовая скорость потока), что обеспечивало значение числа Куранта меньше единицы во всей расчетной области.

Граничные условия для рассматриваемого течения ставились следующим образом.

На стенках канала использовались условия прилипания и непроницаемости для скорости, модельная/подсеточная кинетическая энергия и вязкость полагались равными нулю, а удельная скорость диссипации турбулентности  $\omega_t$  определялась по формуле [10]:

$$\omega_t = 10 \frac{6\nu}{\beta_1 \Delta y_w^2}, \quad (2.4)$$

где  $\nu$  – молекулярная кинематическая вязкость,  $\beta_1 = 0.075$ , а  $\Delta y_w$  – первый пристеночный шаг сетки.

На входной границе задавались профили скорости и турбулентных характеристик, полученные из предварительного SST RANS расчета с использованием периодических граничных условий по координатам  $x$  и  $z$ . На выходной границе задавалась величина давления (в рамках приближения несжимаемой жидкости ее конкретное значение не играет роли), а все остальные переменные линейно экстраполировались изнутри расчетной области. Наконец, на границах области по координате  $z$  использовались условия периодичности.

На втором (ELES) этапе расчета в LES-подобласти использовался метод IDDES и гибридная алгебраическая модель [8]. В последнем случае для создания турбулентного контента, наряду с методом ОИТП (как и в предыдущем случае, область ненулевого источника имела протяженность в одну ячейку и располагалась при  $1.0 \leq x/H < 1.05$ ), использовался метод задания нестационарных граничных условий на границе RANS и LES подобластей [5].

При статистической обработке результатов LES проводилось осреднение мгновенных характеристик потока по временному интервалу равному 5000 временных шагов, что соответствует приблизительно 25 конвективным временным единицам  $4H/U_b$ . Кроме того, производилось осреднение решения по однородной координате  $z$ .

Результаты расчетов представлены на Рис. 2 в форме изоповерхности  $Q$ -критерия, окрашенной по величине модуля скорости (Рис. 2 а), и продольных распределений коэффициента трения вдоль стенок канала, рассчитанных с использованием в LES-подобласти алгебраической гибридной модели и методов IDDES и SAS а (Рис. 2 б, в). На рисунках также показаны аналогичные распределения, рассчитанные с использованием SST RANS, которые использовались в качестве “эталона”.

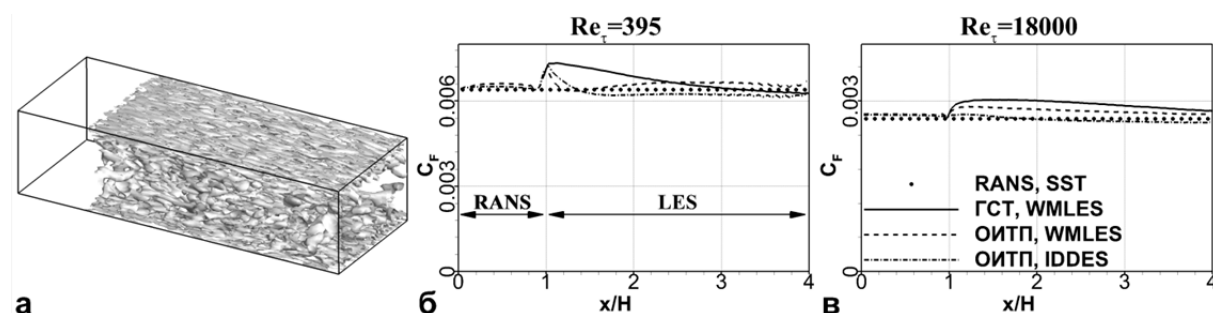


Рис. 2. Результаты расчетов установившегося течения в канале: мгновенная изоповерхность  $Q$ -критерия окрашенная по величине модуля скорости (а) и распределения коэффициента трения для  $Re_\tau = 395$  (б) и  $Re_\tau = 18000$  (в)

Анализ представленных результатов позволяет заключить, что, как и в рассмотренном выше случае затухания изотропной турбулентности, вниз

по потоку от RANS области в канале быстро формируются реалистичные (характеризующиеся существенной анизотропией в пристеночной части потока) турбулентные структуры. Что касается коэффициента трения, то, как следует из Рис. 2 б, в, точность его расчета заметно зависит от конкретной модели турбулентности, используемой в LES-подобласти (наилучшие результаты были получены с помощью метода IDDES). Тем не менее, во всех случаях результаты, полученные при создании турбулентного контента в LES подобласти с помощью ОИТП, существенно превосходят соответствующие результаты, полученные при постановке на границе RANS и LES подобластей нестационарных граничных условий, основанных на том же генераторе синтетической турбулентности, что и ОИТП [5].

### **2.3. Течение в пограничном слое на плоской пластине**

Это течение, также как и рассмотренное в предыдущем разделе развитое течение в плоском канале, является общепринятым тестом любых моделей турбулентности, предназначенных для расчета пристеночных турбулентных потоков. В настоящей работе его расчеты выполнены для двух значений числа Рейнольдса, построенного по толщине потери импульса  $\theta$  и скорости во внешнем потоке,  $Re_\theta=1000$  и  $10000$ .

Расчетная область имела форму прямоугольного параллелепипеда с размерами  $31.25\delta_0 \times 12.5\delta_0 \times 3.875\delta_0$ , где  $\delta_0$  – толщина пограничного слоя во входном сечении расчетной области (при  $x=0$ ). RANS подобласть располагалась на участке  $0 < x/\delta_0 < 3.125$ , а LES подобласть – на участке  $3.25 \leq x/\delta_0 < 31.25$ .

Размер расчетной сетки составлял  $251 \times 71 \times 63$  узлов для  $Re_\theta=1000$  и  $251 \times 87 \times 63$  узлов для  $Re_\theta=10000$ . Шаги сетки в направлениях  $x$  и  $z$  были постоянными и составляли  $0.125\delta_0$  и  $0.0625\delta_0$  соответственно, что соответствует значениям  $\Delta x^+=60$  и  $\Delta z^+=30$  для  $Re_\theta=1000$  и  $\Delta x^+=450$  и

$\Delta z^+ = 225$  для  $Re_\theta = 10000$ . Сетка по направлению нормали к пластине была неравномерной с минимальным значением шага у поверхности пластины и плавным (по геометрической прогрессии с показателем 1.15) увеличением по мере удаления от поверхности. Пристеночный шаг составлял  $\Delta y_w / \delta_0 = 3.125 \cdot 10^{-3}$  при  $Re_\theta = 1000$  и  $\Delta y_w / \delta_0 = 3.125 \cdot 10^{-4}$  при  $Re_\theta = 10000$ , что в обоих случаях обеспечивает выполнение условия  $\Delta y_w^+ < 1$ . Шаг интегрирования по времени, как и в двух предыдущих случаях, выбирался так, чтобы удовлетворить условию  $CFL < 1$  во всей расчетной области. Его значение составляло  $\Delta t = 0.03 \cdot \delta_0 / U_0$ .

На стенках канала использовались те же условия, что и при расчете установившегося течения в плоском канале (см. предыдущий раздел). На входе в расчетную область задавались профили скорости и турбулентных характеристик, полученные из предварительного SST RANS расчета в сечении пластины, где толщина пограничного слоя равна величине  $\delta_0$ . На выходе задавалось значение давления, а остальные гидродинамические переменные линейно экстраполировались изнутри расчетной области. Наконец, на верхней границе области использовались условия свободного скольжения (симметрии), а на границах области по координате  $z$  - условия периодичности.

На ELES этапе расчета в LES подобласти использовалась гибридная алгебраическая модель [8] в сочетании с двумя способами создания турбулентного контента: с помощью ОИТП и путем задания на границе между RANS и LES подобластями внутренних нестационарных граничных условий. Как и в двух предыдущих случаях, область ненулевого ОИТП имела протяженность в одну ячейку и располагалась при  $3.125 < x / \delta_0 < 3.25$ .

При статистической обработке результатов LES осреднение проводилось по интервалу времени равному 5000 временных шагов, что

соответствует приблизительно 100 конвективным единицам времени  $31.25\delta_0/U_0$ , и по однородной координате  $z$ .

Некоторые результаты расчетов представлены на Рис. 3. В частности, на Рис. 3 а показана изоповерхность  $Q$ -критерия, которая свидетельствует о том, что в случае создания турбулентного контента в LES подобласти с помощью ОИТП, в ней быстро формируются реалистичные разрешенные турбулентные структуры. В результате расчетные распределения коэффициента трения, представленные на Рис. 3 б, в, оказываются близкими к соответствующим распределениям, рассчитанным по эмпирическим формулам [19,20], и к результатам расчета с заданием турбулентного контента с использованием ГСТ [5].

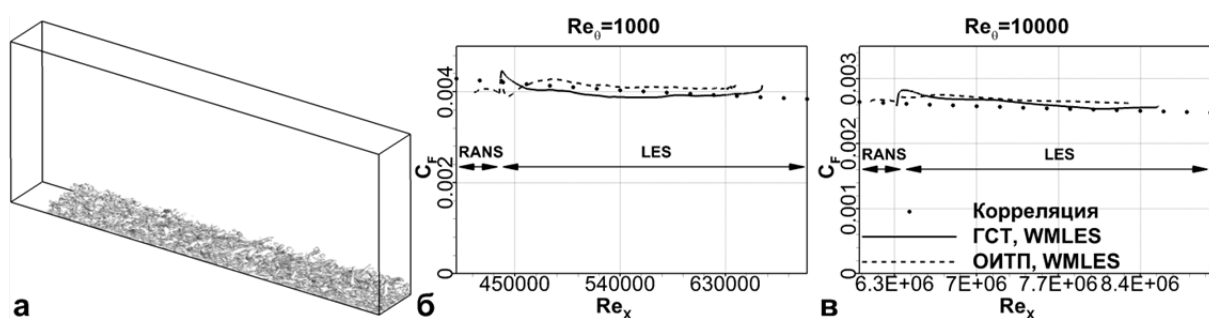


Рис. 3. Результаты расчетов течения в пограничном слое с нулевым градиентом давления: мгновенная изоповерхность  $Q$ -критерия окрашенная по величине модуля скорости (а) и распределения коэффициента трения для  $Re_\theta=1000$  (б) и  $Re_\theta=10000$  (в)

## 2.4. Течение в плоском канале с выпуклостью на нижней стенке

Данное течение, исследовавшееся в эксперименте [21] (см. схему на Рис. 4 а), характеризуется наличием отрыва потока от выпуклости протяженностью  $S$  и последующим его присоединением к нижней стенке канала. В отличие от трех рассмотренных выше течений, его расчет с использованием RANS моделей турбулентности не позволяет с приемлемой для практики точностью определить даже такие важные характеристики как распределение давления и трения вдоль нижней стенки

канала и длину зоны рециркуляции (положение точки присоединения). В связи с этим оно является представительным тестом для оценки вихреразрешающих моделей турбулентности, позволяющим объективно оценить их преимущества над RANS моделями (см., например, [5,22,23]).

Расчетная область, использовавшееся в настоящей работе (Рис. 4 а), имела форму параллелепипеда размером  $6.14C \times 0.909C \times 0.2C$  (отметим, что в соответствии с рекомендациями [23], для того, чтобы учесть влияние боковых стенок, присутствующих в экспериментальной установке, верхняя стенка канала была специальным образом деформирована). Начало координат совпадает с началом выпуклости. Таким образом, координата  $x$  в расчетной области изменялась от  $-2.14C$  до  $4C$ .

Размер сетки составлял  $379 \times 111 \times 51$  узлов (приблизительно 1.9 миллиона ячеек). При этом в отрывной зоне, формирующейся на стенке вниз по потоку от выпуклости, величина шага сетки в направлениях  $x$  и  $z$  составляла  $\Delta x/C = 0.005$  и  $\Delta z/C = 0.004$ . В направлении по нормали к стенке использовалась неравномерная сетка с коэффициентом сгущения 1.15, так чтобы обеспечить выполнение неравенства  $\Delta y_w^+ < 1$ . Безразмерный шаг по времени равнялся  $\Delta t = 0.001C/U_b$ , что соответствовало числу Куранта меньше единицы во всей расчетной области.

Расчетная область разбивалась на RANS ( $-2.14 < x/C < 0.4065$ ) и LES ( $0.4065 < x/C < 4$ ) подобласти, а область ненулевого ОИТП располагалась при  $0.4065 < x/C < 0.4156$  (имела длину в одну ячейку).

Параметры осредненного течения и характеристики турбулентности на входе в расчетную область задавались на основе предварительного SST RANS расчета пограничного слоя на плоской пластине при числе Рейнольдса, построенного по толщине потери импульса, равном 7200. На нижней стенке канала использовались условия прилипания и непроницаемости, а на верхней стенке - условия свободного скольжения

[24]. На выходе из расчетной области задавалось давление, а все остальные переменные линейно экстраполировались из внутренних точек расчетной области. Наконец, как и во всех предыдущих случаях, по координате  $z$  использовались условия периодичности.

Как и при проведении расчетов течения в пограничном слое на плоской пластине, представленных в предыдущем разделе, на ELES этапе расчета в LES подобласти использовалась гибридная алгебраическая модель [8], а турбулентный контент в LES подобласти создавался двумя способами: с помощью ОИТП и путем задания на границе между RANS и LES подобластями нестационарных граничных условий [5].

При статистической обработке результатов LES проводилось осреднение решения по временному интервалу равному 5000 шагам по времени, что соответствует приблизительно 0.8 конвективным единицам времени  $6.14C/U_b$ , и по координате  $z$ .

На Рис. 4 б представлена изоповерхность Q-критерия, а на Рис. 4 в, г, д показаны расчетные продольные распределения коэффициентов трения  $C_f$  и давления  $C_p$  вдоль нижней стенки канала, а также профили продольной составляющей вектора скорости  $u$  в различных сечениях в сравнении с экспериментальными данными. Из этих рисунков видно, что, как и в случае рассмотренных ранее простых течений, создание турбулентного контента в LES подобласти ELES с помощью метода ОИТП обеспечивает быстрое формирование разрешенных турбулентных структур вверх по потоку от точки отрыва. Более того, в данном случае это позволяет правильно описать дальнейшую эволюцию турбулентности в оторвавшемся слое смещения и в зоне рециркуляции и с высокой точностью предсказать характеристики осредненного течения, как в отрывной области, так и в области вниз по потоку от точки присоединения потока к нижней стенке канала. Отметим также, что результаты расчетов, в

которых для создания турбулентного контента используется метод ОИТП, не только не уступают, но даже несколько превосходят по точности аналогичные результаты, полученные с использованием для этой цели метода ГСТ [5].

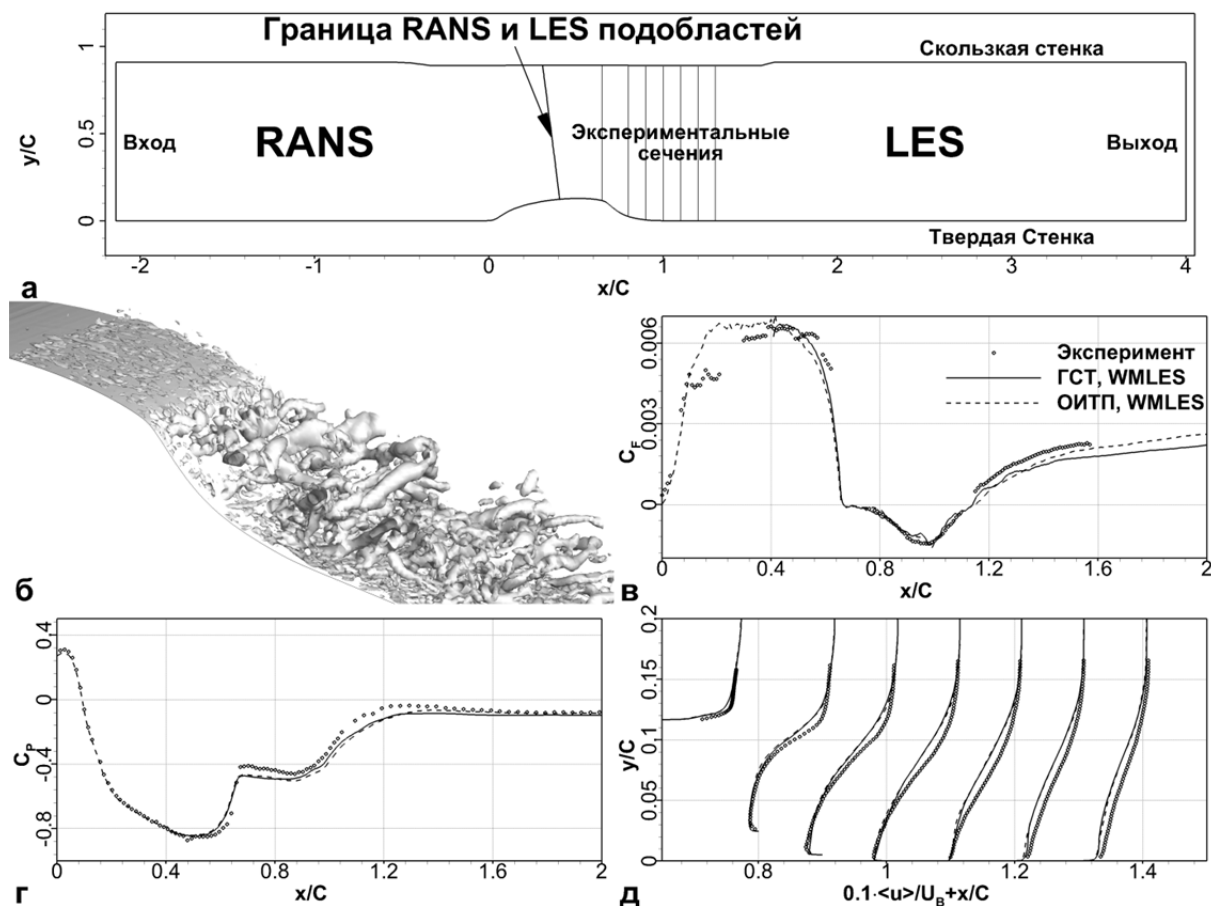


Рис. 4. Результаты расчетов обтекания выпуклости на стенке канала: мгновенная изоповерхность  $Q$ -критерия окрашенная по величине модуля скорости (а), расчетные распределения коэффициента трения (б) и коэффициента давления (в) вдоль нижней стенки канала и профили скорости (г) в сечениях  $x/C=0.65, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3$

## Заключение

В работе предложен простой и эффективный метод расчета турбулентных течений в рамках встроенного LES подхода, основанный на оригинальном способе реализации идеи создания турбулентного контента в LES подобласти с помощью объемного источника турбулентных пульсаций. Метод реализован в CFD коде FLUENT и, как показали



результаты его тестирования, обеспечивает высокую точность расчета, как присоединенных, так и отрывных течений. Кроме того, продемонстрирована эффективность предложенного метода в сочетании с различными подсеточными моделями турбулентности, и показано, что он не только не уступает, но и несколько превосходит по точности менее технологичный метод создания турбулентного контента, основанный на использовании нестационарных граничных условий на RANS-LES интерфейсе.

## Список литературы

1. **Spalart P.R. [и др.]** Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach [текст] // Proceedings of first AFOSR international conference on DND/LES. 1997.
2. **von Terzi D., Frohlich J., Rodi W.** Hybrid techniques for large-eddy simulations of complex turbulent flows [текст] // High Performance Computing in Science and Engineering 2 / ed. Nagel W.E. 2008. P. 195–213.
3. **Mathey F.** Aerodynamic noise simulation of the flow past an airfoil trailing-edge using a hybrid zonal RANS-LES [текст] // Computers & Fluids. 2008. Vol. 37. P. 836–843.
4. **Mathey F. [и др.]** Assessment of the vortex method for LES inlet conditions [текст] // Progress in Computational Fluid Dynamics. 2006. Vol. 6. P. 58–67.
5. **Adamian D., Travin A.** An Efficient Generator of Synthetic Turbulence at RANS-LES Interface in Embedded LES of Wall-Bounded and Free Shear Flows [текст] // ICCFD6. 2010.
6. **Адамьян Д.Ю., Стрелец М.Х., Травин А.К.** Эффективный метод генерации синтетической турбулентности на входных границах LES области в рамках комбинированных RANS-LES подходов к расчету турбулентных течений [текст] // Математическое моделирование. 2011. Vol. 23, № 7. P. 3–20.
7. **von Terzi D.A., Frohlich J.** Segregated coupling of large-eddy simulations with downstream Reynolds-Averaged Navier–Stokes calculations [текст] // Computers & Fluids. 2010. Vol. 39, № 8. P. 1314–1331.
8. **Shur M.L. [и др.]** A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modeled LES capabilities [текст] // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2008. Vol. 29. P. 1638–1649.

9. ANSYS FLUENT 13.0 Theory Guide, ANSYS Inc. [текст] // ANSYS Inc. 2009.
10. **Menter F.R., Kuntz M., Langtry R.** Ten Years of Experience with the SST Turbulence Model [текст] // 4th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Antalya Turbulence, Heat and Mass Transfer. 2003. P. 625–632.
11. **Rhie C.M., Chow W.L.** Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation [текст] // AIAA Journal. 1983. Vol. 21, № 11. P. 1525–1532.
12. **Smagorinsky J.** General Circulation Experiments with the Primitive Equations [текст] // Monthly Weather Review. 1963. Vol. 91. P. 99–165.
13. **Vandormaal J.P., Raithby G.D.** Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows [текст] // Numer. Heat Transfer. 1984. Vol. 7. P. 147–163.
14. **Dukowicz J.K., Dvinsky A.S.** Approximate Factorization as a High-Order Splitting for the Implicit Incompressible Flow Equations [текст] // Journal of Computational Physics. 1992. Vol. 102. P. 336–347.
15. **Comte-Bellot G., Corrsin S.** Simple Eulerian time correlation of full- and narrow-band velocity signals in grid-generated “isotropic” turbulence [текст] // J. Fluid Mech. 1971. Vol. 48. P. 273–337.
16. **Comte-Bellot G., Corrsin S.** The use of a contraction to improve the isotropy of grid-generated turbulence [текст] // J. Fluid Mech. 1966. Vol. 25. P. 657–682.
17. **David C. Wilcox.** Turbulence Modeling for CFD. [книга] 3rd ed. DCW, 2006.
18. **Strelets M.** Detached Eddy Simulation of Massively Separated Flows [текст] // AIAA Journal. 2001. Vol. 2001-0879. P. 1–18.
19. **Schoenherr K.E.** Resistance of flat surfaces moving through a fluid [текст] // Transactions - The Society of Naval Architects and Marine Engineers. 1932. Vol. 40.
20. **Watson R.D., Hall R.M., Anders J.B.** Review of skin friction measurements including recent high Reynolds number results from NASA Langley NTF [текст] // AIAA Paper. 2000. Vol. 2000-2392.
21. **Greenblatt D. [и др.]** A Separation Control CFD Validation Test Case Part 2. Zero Efflux Oscillatory Blowing [текст] // AIAA Paper. 2005. Vol. 2005-0485. P. 1–24.
22. **Avdis A., Lardeau S., Leschziner M.** Large Eddy Simulation of Separated Flow over a Two-dimensional Hump with and without Control by Means of a Synthetic Slot-jet [текст] // Flow Turbul. Combust. 2009. Vol. 83. P. 343–370.
23. **Rumsey C. [и др.]** Summary of the 2004 CFD Validation Workshop on Synthetic Jets and Turbulent Separation Control [текст] // AIAA Paper. 2004. Vol. 2004-2217. P. 1–31.