

УДК 532.526

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ С ПРЕГРАДОЙ И ТРЕХМЕРНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОГЕРЕНТНЫХ СТРУКТУР

В. Г. КУЗЬМЕНКО

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев
03680 Киев – 180, МСП, ул. Желябова, 8/4
office@hydromech.com.ua

Получено 10.09.2015

Нестационарный трехмерный турбулентный поток несжимаемой жидкости над прямоугольной двумерной преградой в пограничном слое численно исследуется, используя гибридный LES/URANS-подход, пристенные модели и конечно-разностный метод. Отношение высоты к длине преграды составляет 4, число Рейнольдса для преграды Re равно 10500 и число Рейнольдса на “входе” $Re_\delta=10500$ для турбулентного пограничного слоя. Крупномасштабные когерентные структуры идентифицируются посредством Q -критерия (ряд пороговых величин $\{Q_{si}\}$ для всей области расчета). Численное моделирование выполнено для исследования Q -изоповерхностей. Обнаружены когерентные структуры разных конфигураций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: турбулентный пограничный слой, преграда, численный метод, крупномасштабные когерентные структуры, критерий идентификации

Нестационарний тривимірний турбулентний потік нестисливої рідини над прямокутною двохвимірною перешкодою в прилежовому шарі чисельно досліджується, використовуючи гібридний LES/URANS-підхід, пристінні моделі та кінцево-різницевий метод. Співвідношення висоти до довжини перешкоди становить 4, число Рейнольдса для перешкоди Re дорівнює 10500 та число Рейнольдса на “вході” $Re_\delta=10500$ для турбулентного прилежового шару. Великомасштабні когерентні структури ідентифікуються за допомогою Q -критерія (ряд порогових величин $\{Q_{si}\}$ для всієї області розрахунку). Чисельне моделювання було виконано для дослідження Q -ізоповерхонь. Знайдені когерентні структури різних конфігурацій.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: турбулентний прилежовий шар, перешкода, чисельний метод, великомасштабні когерентні структури, критерій ідентифікації

The unsteady three-dimensional turbulent incompressible flow over a rectangular two-dimensional fence in a boundary layer is simulated using hybrid LES/URANS-approach, wall models and finite-difference method. The aspect ratio (height/length) of the fence are 4, fence Reynolds number Re are 10500, inflow Reynolds number are $Re_\delta=10500$ for turbulent boundary layer. The large-scale coherent structures are identified by the Q -criterion (set of threshold value $\{Q_{si}\}$ for total numerical domain). The simulation were performed to study the Q -isosurfaces. The coherent structures of different configurations were identified.

KEY WORDS: turbulent boundary layer, fence, numerical method, large-scale coherent structures, identification criterion

ВВЕДЕНИЕ

Изучение вихревой структуры турбулентных течений и разных видов крупномасштабных энергонесущих вихрей составляет значительную часть современной гидромеханики. Турбулентный режим течения – это наиболее распространенная форма движения жидкости, которая присутствует в большинстве инженерных задач. Ряд работ [1–47] изучают: 1) структуру пристенной турбулентности; 2) обтекание преград; 3) процессы в нестационарных трехмерных турбулентных течениях с отрывом и присоединением потока; 4) связи между крупными и малыми масштабами вихрей; 5) роль анизотропии и энергетических каскадов. На все эти процессы влияют геометрия стенки и формы преграды. Вихри образуются в результате развития неустойчивости в сдвиговых

течениях и при отрывном обтекании тел. Отрыв по своей природе нестационарен и всегда связан с вязким взаимодействием потока с поверхностью и, следовательно, с образованием пограничных слоев. Вихревые структуры вносят существенный вклад в процессы порождения, переноса и диссипации турбулентной энергии, особенно это касается организованных квазидетерминированных образований. Для исследования роли сложной пространственной и временной организации когерентных вихревых структур выполнен ряд работ [1–4, 28, 39, 40, 43–50, 53–54]. Гидродинамической когерентной структурой можно назвать компактное образование, включающее в себя долгоживущую пространственную (обычно, вихревую) структуру и продукты ее дискретного когерентного каскадного распада. Когерентная структура содержит как крупномасштабную,

так и мелкомасштабную турбулентность. Формы и размеры когерентных образований нечеткие. Представление о такой картине течения основано на экспериментальных работах [1–3, 5–7, 27, 28, 36, 37, 39]. На данный момент времени нет единого общепризнанного критерия идентификации когерентной вихревой структуры, ее внешней оболочки и ядра. Совокупность различных методов визуализации и идентификации содержит в себе некоторую неоднозначность и внутреннюю противоречивость. Поэтому визуализируемые когерентные структуры, полученные с помощью различных критериев, могут принимать различные формы и размеры. Организованные турбулентные структуры обнаружены в пристенной и внешней областях пограничного слоя. В каждой из этих областей существуют определенные типы когерентных структур, которые имеют свои характерные масштабы, формы и времена жизни. В исследованиях [4, 28, 39, 40, 43–47] установлено, что когерентные структуры имеют место уже при наименьших масштабах, вблизи масштаба вязкой диссипации. Выявлены трубчатые структуры регионов высокой завихренности.

Прямые численные методы [9, 48, 50] решения уравнений Навье-Стокса (DNS) могут определить наличие когерентных структур всех масштабов. Использование LES (моделирование крупных вихрей) требует более внимательного подхода. Уточним, что вычислительная сетка для DNS намного мельче, чем для LES. Поэтому минимальный размер когерентных структур, который может определить LES [8–11, 13–18, 23–24, 33–34, 38, 41, 49, 53], ограничен размером вычислительной ячейки и шириной фильтра для подсеточной модели. Вследствие существования спорного вопроса о едином надежном критерии идентификации когерентных структур различных масштабов и типов подробные количественные сравнения таких структур все еще отсутствуют. Поскольку когерентные структуры диссипируют намного медленнее некогерентных, правильная идентификация таких вихревых структур представляет наибольший интерес при исследовании турбулентных течений.

Классификация методов идентификации когерентных структур проводится в двух категориях: технологии визуализации течения и статистические методы. Для выделения основных критериев применяют расчленение тензора градиентов скорости на симметричную \mathbf{S} и антисимметричную $\mathbf{\Omega}$ части. В работах [43–47] представлены следующие критерии:

i) λ_2 – второе собственное значение характеристического уравнения для тензора $\mathbf{S}^2 + \mathbf{\Omega}^2$. Сердце-

вина вихревого течения определяется как совокупность подобластей течения с отрицательным вторым собственным значением ($\lambda_2 < 0$) в них;

ii) Q – второй инвариант характеристического уравнения тензора градиентов скорости. Критерий $Q > 0$ означает, что завихренность преобладает над деформацией.

iii) $\Delta = (Q/3)^3 + (R/2)^2$. Критерий $\Delta > 0$ требует лишь наличие локального вращения.

iv) спиральность (закручивание) $H = \vec{u} \cdot \vec{\omega}$. Идентификация вихрей происходит при условии $H > 0$.

Статистические методы [4, 11, 12, 37, 43–47] часто используются в экспериментальных исследованиях, но мало пригодны для качественной обработки численных данных, полученных с помощью LES. Обзор всех основных методов идентификации когерентных структур подробно представлен в исследовании [53].

В настоящее время не исследовано влияние порогового значения параметра Q на размер и форму когерентных структур, образующихся при обтекании преграды турбулентным потоком, на различных значимых участках: 1) без отрыва; 2) отрыв; 3) присоединение; 4) восстановление. Использование набора пороговых величин Q для трехмерной визуализации развивающихся во времени организованных вихревых образований также представляет большой практический интерес.

Цель данной работы – исследование проблемы трехмерной идентификации и визуализации крупномасштабных когерентных структур в турбулентном течении с отрывом и присоединением на основе анализа численных данных, полученных с применением гибридного LES/URANS-подхода, что является развитием работ [8, 34, 38].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ДЛЯ LES

Модель состоит в следующем:

1) турбулентный поток вязкой несжимаемой жидкости при нулевом продольном градиенте давления на внешней границе с постоянными свойствами течет на участке $0 \leq X \leq X_k$ над полубесконечной пластиной с поперечной двумерной преградой; максимальная скорость внешнего потока U_0 ; высота преграды S ; ее длина $0.25S$; стенки пластины и преграды имеют пренебрежимо малую шероховатость; (принципиальная схема течения представлена на рис. 1); 2) исследуется трехмерное турбулентное течение при числе Рейнольдса $Re = U_0 S / \nu = 10500$ для преграды, числе Рейнольдса $Re_\delta = 10500$ для турбулентного пограничного слоя при $X=0$ ($\delta=1$; $u_* = 0.052$); 3) задача рассматривается в конечной

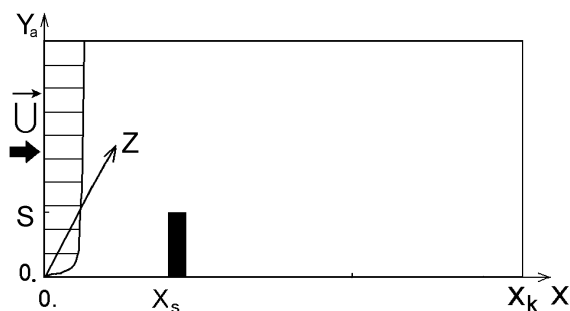


Рис. 1. Принципиальная схема пристенного течения с поперечной преградой на пластине, принятая размерная система координат $OXYaZ$ и профиль средней скорости на “входе”

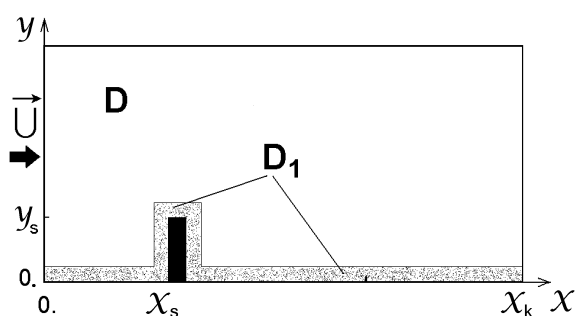


Рис. 2. Схема расположения пристенной вычислительной области D_1 для URANS-подхода (выделена серым фоном)

трехмерной вычислительной области с заданными граничными условиями; 4) все параметры и уравнения представлены в безразмерном виде.

Уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости представим в виде обезразмеренных фильтрованных нестационарных уравнений Навье-Стокса [14–17, 34]:

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\tilde{u}_i \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0,$$

где $\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \tilde{u}_3$ (или $\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w}$) – фильтрованные компоненты вектора скорости вдоль координатных осей x, y, z ; P – обобщенное фильтрованное давление; τ_{ij} и P пронормированы на плотность несжимаемой жидкости, все переменные обезразмерены с помощью величин S и U_0 . Тензор подсеточных напряжений τ_{ij} параметризуется на основе динамической подсеточной модели [10, 34]. Для расчета

используется преобразование координат ($y=\eta$, при $\eta \leq 3$ и $y=3+6\{(\eta-3)/2\}^{1.257}$, при $3 < \eta \leq 5$), которое связывает регулярную, равномерную, не зависящую от времени разностную сетку ($\Delta\eta=\Delta S$) в вычислительной области с физической областью D с неравномерной сеткой по направлению к внешней границе. Для шагов вычислительной сетки задаем: $\Delta x=\Delta\eta=\Delta z=\Delta S=0.05$. В рамках LES-подхода каждое из уравнений (1) дискретизируется на прямоугольной расчетной сетке в вычислительной области $D=\{[0 \leq x \leq x_k; 0 \leq \eta \leq \eta_k]$ минус $[x_s < x < x_d; 0 < \eta < \eta_s]$; $0 \leq z \leq z_k\}$, где $x_s=13$; $x_d = x_s+0.25$; $\eta_s=1$; $x_k=40$; $\eta_k=5$; $z_k=7$. В численном методе используется $\{N_x; N_y; N_z\}=\{801; 101; 141\}$ сеточных точек. Для вычисления коэффициента поверхностного трения, применяемого в представленной LES, используется двумерный URANS-подход для области D_1 (рис. 2). Описание граничных условий и деталей численного метода для LES и URANS имеют полностью аналогичный работе [34] вид.

2. КРИТЕРИЙ ТРЕХМЕРНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ КОГЕРЕНТНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР

Исследование динамики турбулентных течений и механизмов отрыва вихревых структур несжимаемой вязкой жидкости показывает, что недостаточно трех общеизвестных интуитивных индикаторов вихрей (минимума давления, линии тока и изоповерхности завихренности). В научной литературе предложены специальные методы визуализации, позволяющие идентифицировать большую часть вихрей в потоке. Эти способы идентификации когерентных вихрей подробно рассмотрены в работе [53]. В результате сравнительного анализа различных критериев визуализации организованных образований [43, 45–48, 50] установлено, что при наличии в турбулентных течениях вихрей с различными размерами наиболее информативным и физически значимым для идентификации трехмерных крупномасштабных когерентных структур является параметр Q :

$$Q = -\frac{1}{2} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}.$$

Отметим, что в рамках данной работы все величины безразмерны, в том числе компоненты скорости u_i и параметр Q .

Критерий идентификации когерентных образований справедлив при $Q > 0$ (завихренность преобладает над деформацией). Q -критерий наиболее часто используется в последние го-

ды в научной литературе [43–47], но при этом назначается только одно пороговое значение. В рамках общего определения критерия предполагается, что когерентные вихри представляют собой вихревые трубки, касательные к вектору скорости. Такие трубки содержат жидкость с уровнем малых значений динамического давления $P = p + \vec{u}^2/2$, где p – статическое давление; P и p пронормированы на плотность несжимаемой жидкости. Критерий $Q > 0$ определяет регион наименьшего давления в трубке выпуклого сечения. Уравнение $Q = \nabla^2 p/2$ подразумевает, что Q –критерий содержит в себе намного больше маломасштабной активности, чем критерий, основанный на давлении.

Необходимо отметить, что критерий идентификации $Q > 0$ определяет лишь общее месторасположение когерентных структур без выделения конкретного набора искомых масштабов вихрей. Требуется, исходя из неких соображений, для определения соответствующей геометрически трехмерной конфигурации поверхности когерентных структур назначить пороговое значение Q , как это обычно делается в [43–47]. В нашем случае исследуется в большой физической области нестационарное трехмерное турбулентное течение с наличием: 1) различных типов вихревых движений и их изменением вдоль по потоку; 2) процессов отрыва и присоединения; 3) значительных местных градиентов поля скорости и параметра Q . Поэтому для всей вычислительной области не целесообразно назначать только одно универсальное пороговое значение $Q=Q_s$ при определении видов когерентных структур с разным содержанием турбулентной энергии. В общем случае эффективная визуализация когерентных структур для каждого отдельного региона в большой вычислительной области требует выбрать соответствующий набор значений $\{Q_{sd}(x, y, z)\}$. Но возникает вопрос о правильном сочлениении визуализированных структур между подобластями с разными наборами пороговых величин $\{Q_{sd}(x, y, z)\}$.

В нашем исследовании предлагается использовать набор (универсальный во всей большой области) оптимальных значений $\{Q_{si}\}$ для трехмерной идентификации и визуализации в виде изоповерхностей крупномасштабных когерентных структур, заметно отличающихся по размеру, конфигурации и энергосодержанию. Справедливость идеологии такого подхода согласуется с результатами работы [53], где визуализация проведена при ряде пороговых значений $\{Q_{si}\}$ с помощью изолиний параметра Q для различных двумерных сечений в области $D = \{0 \leq x \leq 40; 0 \leq y \leq 7\}$.

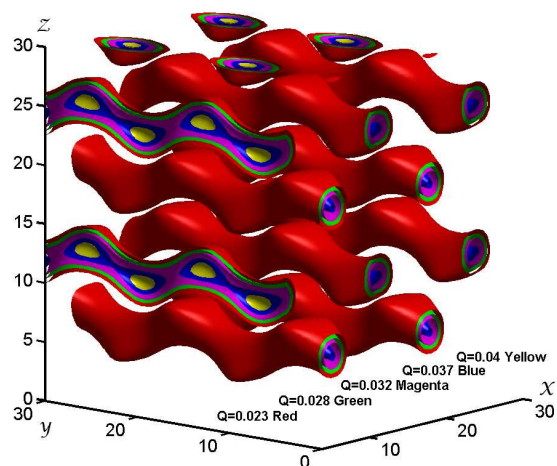


Рис. 3. Изоповерхности параметра Q с пороговыми значениями $Q=0.023$ (красный); $Q=0.028$ (зеленый); $Q=0.032$ (малиновый); $Q=0.037$ (голубой); $Q=0.04$ (желтый)

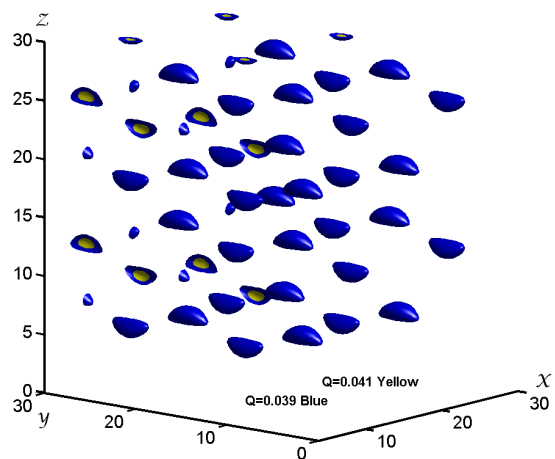


Рис. 4. Изоповерхности параметра Q с пороговыми значениями $Q=0.039$ (голубой); $Q=0.041$ (желтый)

$9; 0 \leq z \leq 7\}$.

Представляет большой практический интерес применить разработанный нами подход при выбранном наборе оптимальных пороговых значений $\{Q_{si}\}$ для существенно трехмерной идентификации когерентных структур и определения их эволюции в виде изоповерхностей параметра Q в общей области D .

Для выявления основных закономерностей и особенностей процесса визуализации когерентных структур при помощи набора пороговых значений $\{Q_{si}\}$ рассмотрим тестовый случай в виде ABC (Arnold-Beltrami-Childress) трехмерного периодического течения [54]. Поле скорости этого те-

чения задается в аналитическом виде:

$$u = A \sin(Gz) + C \cos(Gy);$$

$$v = B \sin(Gx) + A \cos(Gz);$$

$$w = C \sin(Gy) + B \cos(Gx),$$

где $A=1$; $B=0.15$; $C=0.08$; $G=0.5$. Такие величины параметров A , B , C и G выбраны только из соображений удобства и наглядности при проведении трехмерной визуализации когерентных структур в области $\{3.5 \leq x \leq 30; 3.5 \leq y \leq 30; 3.5 \leq z \leq 30\}$ и не учтено влияние конкретного числа Рейнольдса. Главное достоинство ABC течения как тестового примера заключается в том, что распределения его поля скорости и параметра Q можно задавать в аналитическом виде. В применении численных методов нет необходимости и, следовательно, они не влияют на окончательный результат. Для тестового случая на рис. 3–4 представлены результаты апробации технологии трехмерной идентификации и визуализации когерентных структур при следующих наборах пороговых значений Q –критерия: $\{Q_{si}\}=\{0.023; 0.028; 0.032; 0.037; 0.04\}$ и $\{Q_{si}\}=\{0.039; 0.041\}$. На рис. 3 отображены изоповерхности мгновенных величин Q с различными пороговыми величинами $Q=0.023$ (красный цвет); $Q=0.028$ (зеленый цвет); $Q=0.032$ (малиновый цвет); $Q=0.037$ (голубой цвет); $Q=0.04$ (желтый цвет). Такой набор $\{Q_{si}\}$ позволяет наглядно выявить характерные формы когерентных структур и их размеры. На гранях вычислительной области показаны сечения когерентных образований в соответствии с набором $\{Q_{si}\}$. Из рис. 3 следует, что при меньшем значении параметра Q визуализируется когерентное образование большего размера. Для случая $\{Q_{si}\}=\{0.023; 0.028; 0.032\}$ конфигурации структур очень подобны, но имеют разные размеры; для $\{Q_{si}\}=\{0.037; 0.04\}$ формы и размеры образований абсолютно различны. На рис. 4 представлены изоповерхности параметра Q с пороговыми значениями $Q=0.039$ (голубой цвет); $Q=0.041$ (желтый цвет). Если основываться только на результатах визуализации при $\{Q_{si}\}=\{0.039; 0.041\}$, то мы получим трехмерное изображение, которое кардинально отличается по размеру и форме от представления когерентных структур при $Q=0.023$ (рис. 3, красный цвет). Поэтому при первичном анализе трехмерных образований очень важно использовать наиболее широкий диапазон пороговых значений Q . Затем ряд пороговых величин $\{Q_{si}\}$ нужно оптимизировать в соответствии с особенностями течения в рассматриваемой области.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Проведена трехмерная идентификация крупномасштабных когерентных структур на основе численных результатов работы [38] в нестационарном турбулентном течении перед, над и за преградой для числа Рейнольдса $Re=10500$ и набора параметров на входе в вычислительную область $Re_\delta=10500$; $\delta=1$; $u_*=0.052$, применяя гибридный LES/URANS-подход и его численный алгоритм.

Для вычислений использовался компьютер INTEL PENTIUM COREi5 с тактовой частотой 4 ГГц и оперативной памятью 4 Гб. Статистика была собрана на каждом шаге по времени в процессе расчета полностью нестационарного режима течения. Для одного набора параметров на входе в вычислительную область было проведено 20000 шагов по времени с $\Delta t=0.03$ за промежуток времени $T_{oc}=600$ в обезразмеренных единицах измерения. Реальное время расчета задачи на компьютере равно 45 часам 35 минутам.

На основе предварительных визуализаций для данного типа течения во всей большой вычислительной области определено оптимальное значение параметра $Q=0.01$ с целью ограничения снизу интервала чисел набора пороговых величин $\{Q_{si}\}$ при трехмерной идентификации крупномасштабных когерентных структур. Основываясь на физическом определении Q –критерия и тестовых результатах (рис. 3–4), можно утверждать, что наибольшим значениям параметра Q соответствуют конфигурации образований в их ядре.

Результаты апробации трехмерной идентификации и визуализации крупномасштабных когерентных структур в турбулентном течении с преградой на плоской пластине при наличии отрыва и присоединения представлены с помощью рис. 5–16 в виде изоповерхностей параметра Q . Сечения когерентных образований в соответствии с принятым набором пороговых значений $\{Q_{si}\}$ показаны посредством распределения выбранной цветовой гаммы на гранях вычислительной области, а преграда изображена в виде параллелепипеда синего цвета.

Изоповерхности мгновенных величин Q с различными пороговыми значениями: $Q=0.01$ (красный цвет); $Q=0.07$ (зеленый цвет); $Q=0.13$ (малиновый цвет); $Q=0.19$ (голубой цвет) для $t=68$ отображены на рис. 5 при $7 < x < 40$. Перед, над и за преградой наблюдаются трехмерные крупномасштабные когерентные структуры. За преградой эти образования при движении вдоль оси x постепенно приближаются к горизонтальной стенке до зоны присоединения отрывного слоя.

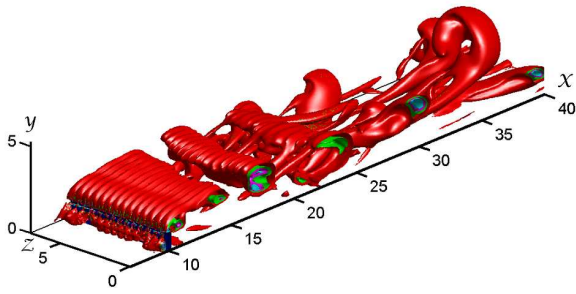


Рис. 5. Исоповерхности параметра Q с пороговыми значениями $Q=0.01$ (красный); $Q=0.07$ (зеленый); $Q=0.13$ (малиновый); $Q=0.19$ (голубой) для $t=68$ и $Re=10500$; преграда (параллелепипед синего цвета)

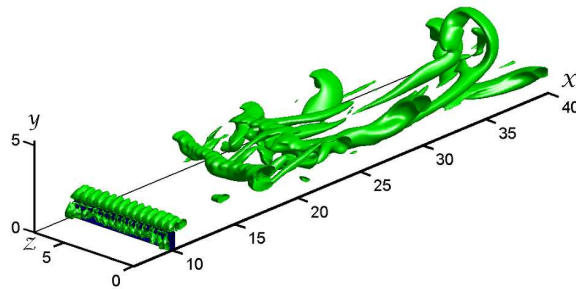


Рис. 6. Исоповерхности параметра Q с пороговым значением $Q=0.07$ (зеленый) при $t=68$ и $Re=10500$

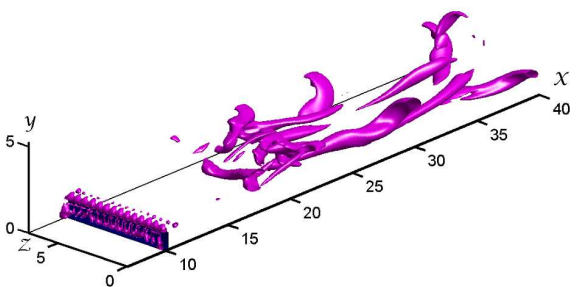


Рис. 7. Исоповерхности параметра Q с пороговым значением $Q=0.13$ (малиновый) при $t=68$ и $Re=10500$

На рис. 6 представлены isoповерхности параметра Q с пороговым значением $Q=0.07$ (зеленый цвет) для $t=68$ и $7 < x < 40$. При сравнении рис. 5 и 6 установлено, что увеличение порогового значения Q уменьшает визуализируемые размеры когерентных структур. На рис. 7 отображены isoповерхности мгновенных величин Q с пороговым значением $Q=0.13$ (малиновый) для $t=68$ и $7 < x < 40$. При сравнении рис. 3–4 и рис. 5–7 определено, что меньшей величине параметра Q соответствует визуализируемое когерентное образование большего размера. Отметим, что срав-

нение рис. 5–7 показывает существование заметного отличия при визуализации в размерах и формах крупномасштабных когерентных структур перед, над преградой и за ней на разных расстояниях вдоль по потоку. На некоторых участках ($11 < x < 15$) организованные вихревые образования не визуализируются при заданных Q (рис. 6, 7). Сравнение рис. 5–7 выявляет тот факт, что в окрестности ядра когерентной структуры значение параметра Q будет максимальным, но разным на различных участках течения вдоль по потоку.

Проведено исследование эволюции крупномасштабных когерентных структур на интервале времени $50 \leq t \leq 80$. Идентификация крупномасштабных организованных вихревых образований в большой вычислительной области осуществлялась для набора пороговых величин $\{Q_{si}\} = \{0.01; 0.07; 0.13; 0.19\}$. На рис. 8 отображены isoповерхности мгновенных величин Q с различными пороговыми значениями: $Q=0.01$ (красный цвет); $Q=0.07$ (зеленый цвет); $Q=0.13$ (малиновый цвет); $Q=0.19$ (голубой цвет) для случаев i) $t=50$; ii) $t=56$; iii) $t=62$ при $7 < x < 40$. Перед, над и за преградой наблюдаются трехмерные крупномасштабные когерентные структуры. За преградой эти образования при движении вдоль x постепенно приближаются к горизонтальной стенке до зоны присоединения отрывного слоя. Вблизи поверхности вдоль оси x перед преградой наблюдаются округлые когерентные структуры с преобладанием периодичности по z . Над и за преградой на участке $10 < x < 22$ расположены крупномасштабные когерентные структуры, периодические по z , которые имеют продолговатую форму вдоль z . Далее вдоль по потоку ($22 < x < 40$) вблизи зоны присоединения течения и за ней организованные образования кардинально преобразуются по форме и размеру с утратой периодичности по z , а затем постепенно удлиняются вдоль оси x . Такое поведение подтверждается следующими рисунками.

Рис. 9 показывает isoповерхности при пороговом значении $Q=0.01$ (красный цвет) для случаев i) $t=50$; ii) $t=56$; iii) $t=62$ в плоскости xz на участке $7 < x < 40$. Хорошо заметны преобразования организованных структур вдоль по потоку для разных мгновений времени t . На рис. 10 отображены isoповерхности Q с различными пороговыми значениями: $Q=0.01$ (красный цвет); $Q=0.07$ (зеленый цвет); $Q=0.13$ (малиновый цвет); $Q=0.19$ (голубой цвет) для i) $t=50$; ii) $t=56$; iii) $t=62$ в плоскости xy при $7 < x < 40$. Явно наблюдается эволюционное движение крупномасштабных когерентных структур вдоль оси x и влияние ви-

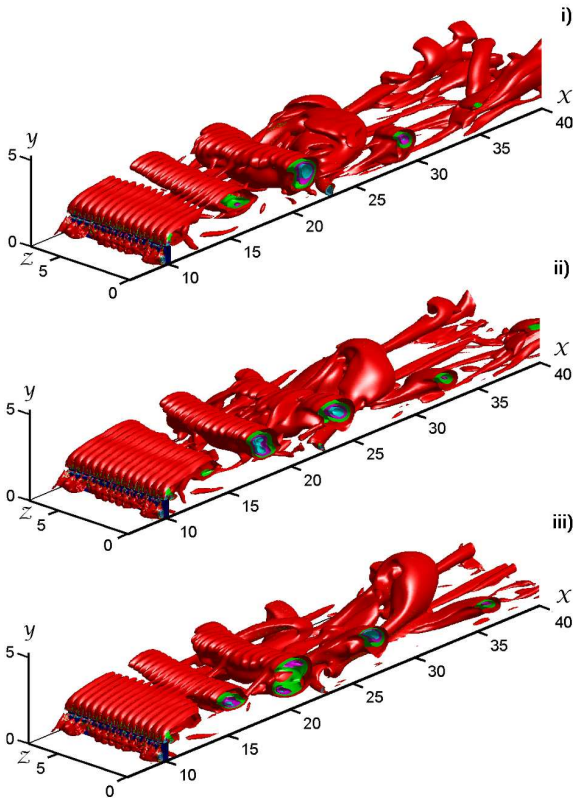


Рис. 8. Изоповерхности параметра Q с пороговыми значениями $Q=0.01$ (красный); $Q=0.07$ (зеленый); $Q=0.13$ (малиновый); $Q=0.19$ (голубой) для i) $t=50$; ii) $t=56$; iii) $t=62$ и $Re=10500$

зуализации на их форму и размер при различных пороговых значениях Q .

Изучение процессов эволюции крупномасштабных когерентных структур продолжено на интервале времени $68 \leq t \leq 80$ (рис. 11–13). Изоповерхности Q показаны на рис. 11 с различными пороговыми значениями: $Q=0.01$ (красный цвет); $Q=0.07$ (зеленый цвет); $Q=0.13$ (малиновый цвет); $Q=0.19$ (голубой цвет) для случаев i) $t=68$; ii) $t=74$; iii) $t=80$ на участке $7 < x < 40$. Перед преградой наблюдаются когерентные структуры, периодические по z , аналогичные образованиям на рис. 8. За преградой на участке $10 < x < 22$ крупномасштабные когерентные структуры сохраняют периодичность по z , что хорошо согласуется с рис. 8. Далее вдоль по потоку ($22 < x < 40$) крупномасштабные образования видоизменяются по форме и размеру с нарушением периодичности по z . На рис. 12 представлены изоповерхности при $Q=0.01$ (красный цвет) для i) $t=68$; ii) $t=74$; iii) $t=80$ при $7 < x < 40$ в плоскости xz . Легко можно проследить за тем, как образуются коге-

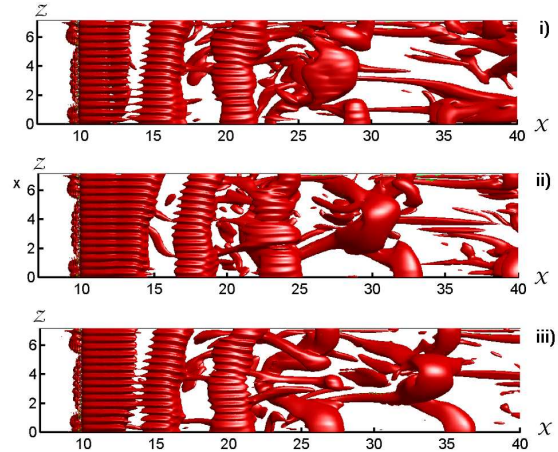


Рис. 9. Изоповерхности параметра Q с пороговыми значениями $Q=0.01$ (красный) для i) $t=50$; ii) $t=56$; iii) $t=62$ и $Re=10500$

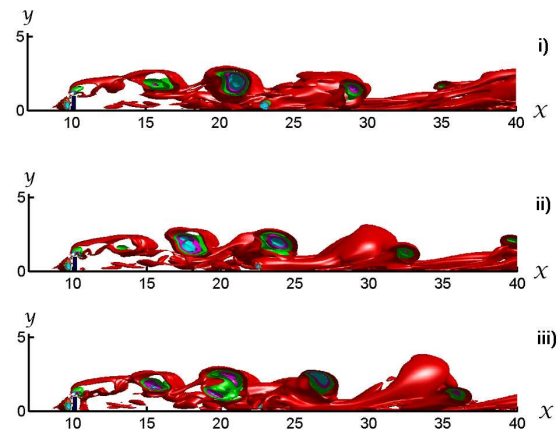


Рис. 10. Изоповерхности параметра Q с пороговыми значениями $Q=0.01$ (красный); $Q=0.07$ (зеленый); $Q=0.13$ (малиновый); $Q=0.19$ (голубой) для i) $t=50$; ii) $t=56$; iii) $t=62$ и $Re=10500$

рентные структуры перед и над преградой, а затем перемещаются вдоль по потоку, разрушая периодичность по z . Рис. 13 отображает изоповерхности мгновенных величин Q с различными пороговыми значениями: $Q=0.01$ (красный цвет); $Q=0.07$ (зеленый цвет); $Q=0.13$ (малиновый цвет); $Q=0.19$ (голубой цвет) для i) $t=68$; ii) $t=74$; iii) $t=80$ в плоскости xy при $7 < x < 40$. Развитие когерентных структур вдоль по потоку имеет очевидные общие черты для случаев $t=\{50; 56; 62; 68; 74; 80\}$. Закономерности распространения и трансформации крупномасштабных когерентных структур хорошо согласуются при сравнительном анализе представленных выше результатов (рис. 8–13).

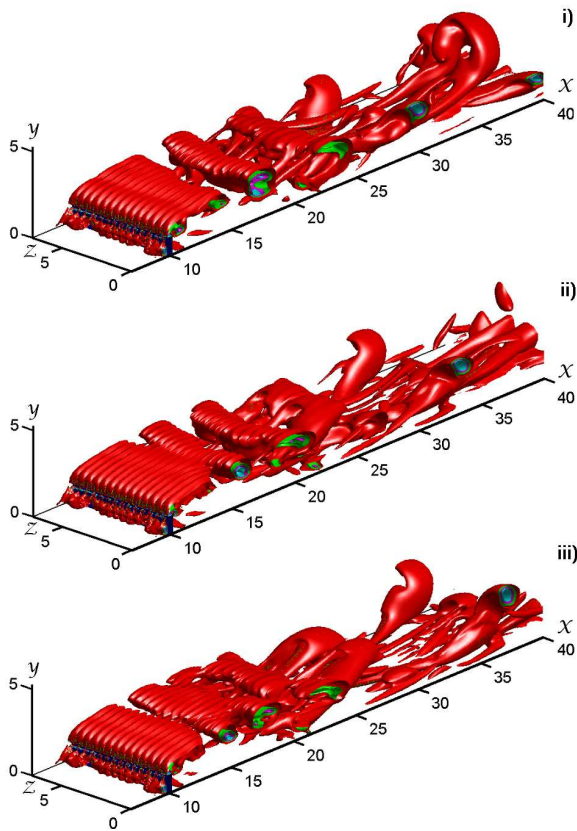


Рис. 11. Исоповерхности параметра Q с пороговыми значениями $Q=0.01$ (красный); $Q=0.07$ (зеленый); $Q=0.13$ (малиновый); $Q=0.19$ (голубой) для i) $t=68$; ii) $t=74$; iii) $t=80$ и $Re=10500$

Напомним, что исследование крупномасштабных организованных вихрей происходит с помощью принятого набора пороговых величин $\{Q_{si}\}$ во всей большой вычислительной области ($0 \leq x \leq 40$). Значительное влияние на процессы визуализации также оказывает выбор точки наблюдения за трехмерными когерентными структурами для меньших участков вдоль оси x . Рис. 14 показывает изоповерхности Q на участке $7 \leq x \leq 27$ с различными пороговыми значениями: $Q=0.01$ (красный цвет); $Q=0.07$ (зеленый цвет); $Q=0.13$ (малиновый цвет); $Q=0.19$ (голубой цвет) для $t=68$. Такой вид крупномасштабных когерентных структур подчеркивает закономерности при визуализации рядом пороговых значений участка отрыва течения ($10 \leq x \leq 21$) и зоны присоединения потока ($21 \leq x \leq 27$). На участке отрыва наблюдается строгая периодичность по z в расположении когерентных образований. В начальной зоне присоединения нарушается периодичность по z в кон-

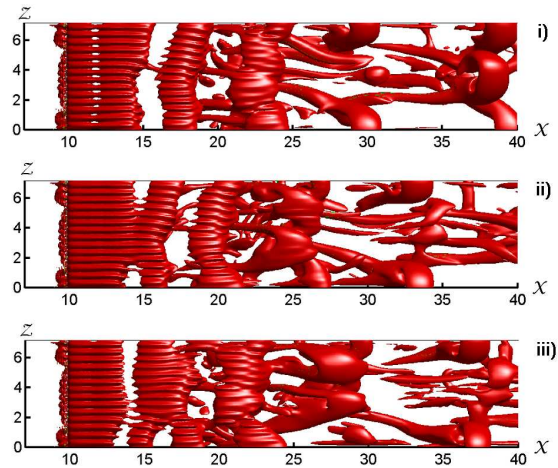


Рис. 12. Исоповерхности параметра Q с пороговыми значениями $Q=0.01$ (красный) для i) $t=68$; ii) $t=74$; iii) $t=80$ и $Re=10500$

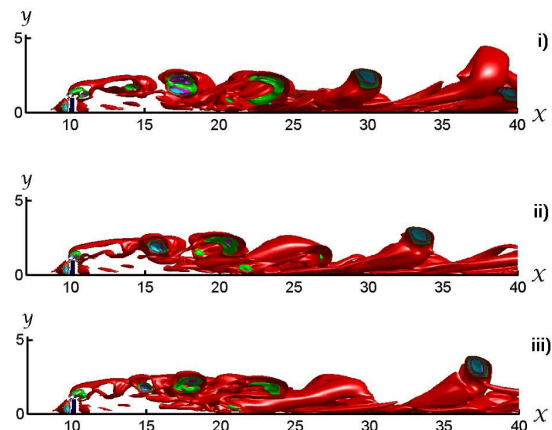


Рис. 13. Исоповерхности параметра Q с пороговыми значениями $Q=0.01$ (красный); $Q=0.07$ (зеленый); $Q=0.13$ (малиновый); $Q=0.19$ (голубой) для i) $t=68$; ii) $t=74$; iii) $t=80$ и $Re=10500$

фигурации крупномасштабных структур. На рис. 15 изображены изоповерхности Q с параметрами, аналогичными для рис. 14, но только на участке $7 \leq x \leq 19$. Выбрана такая точка обзора, чтобы наилучшим образом оценить конфигурацию когерентных структур перед двумерным препятствием, которое идентично вдоль z . На участках отрыва течения перед, над и за преградой проявляются характерные черты данного типа когерентных вихрей – структуры расположены плотной цепочкой вдоль z с периодическим размещением вдоль этой оси. Успешная визуализация непосредственно зависит от назначенного ряда пороговых значений Q , связана с конфигурациями

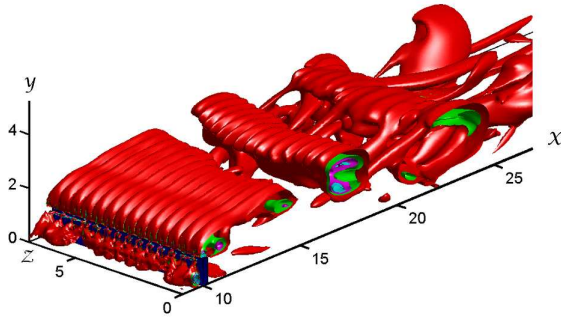


Рис. 14. Исоповерхности параметра Q с пороговыми значениями $Q=0.01$ (красный); $Q=0.07$ (зеленый); $Q=0.13$ (малиновый); $Q=0.19$ (голубой); $t=68$

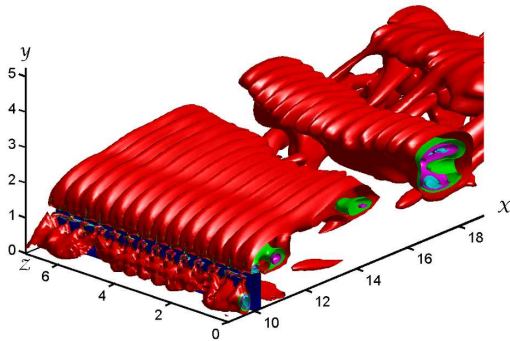


Рис. 15. Исоповерхности параметра Q с пороговыми значениями $Q=0.01$ (красный); $Q=0.07$ (зеленый); $Q=0.13$ (малиновый); $Q=0.19$ (голубой); $t=68$

когерентных структур, знания о которых основаны на ограниченном числе работ [1–7, 21, 28, 36, 43, 45–48, 50] и требуют дальнейших исследований. Рис. 15 подробно показывает эти особенности при использовании набора $\{Q_{si}\}$ только на участке отрыва течения. Трехмерные изоповерхности значений $Q=0.07$ (зеленый); $Q=0.13$ (малиновый); $Q=0.19$ (голубой) изображены с увеличенным уровнем визуальной разрешающей способности по сравнению с идентификацией образований, представленных на рис. 5–14. Это позволяет более адекватно оценить формы когерентных вихрей в их ядрах.

На рис. 16 представлены изоповерхности Q с различными пороговыми значениями: $Q=0.01$ (красный цвет); $Q=0.07$ (зеленый цвет); $Q=0.13$ (малиновый цвет); $Q=0.19$ (голубой цвет) для $t=68$ на участке $7 < x < 19$. Рис. 16 более подробно, но с другой точки обзора по сравнению

с рис. 14–15, изображает результаты визуализации крупномасштабных когерентных структур набором пороговых значений $\{Q_{si}\}$ только на участке отрыва течения (перед и за преградой). Изменение точки обзора позволяет лучше оценить влияние $Q=\{0.07; 0.13; 0.19\}$ на визуализируемые конфигурации организованных вихрей при приближении к их ядрам. Над и за преградой ($10 \leq x \leq 15$) наблюдается заметное отличие и в размерах, и в форме крупномасштабных когерентных структур при $Q=0.01$ и $Q=\{0.07; 0.13; 0.19\}$. Пороговой величине $Q=0.01$ из применяемого набора $\{Q_{si}\}$ соответствует наибольший размер визуализируемой поверхности организованных образований. При сравнении рис. 16 с рис. 5–7 установлено, что наибольшие различия в размерах визуализируемых изоповерхностей параметра Q наблюдаются на участке отрыва течения за преградой ($10 \leq x \leq 15$) для набора $\{Q_{si}\}=\{0.01; 0.07; 0.13; 0.19\}$. Рис. 16 показывает на участке $10 \leq x \leq 19$ изоповерхности с пороговым значением $Q=0.01$ (красный цвет) с размерами когерентных структур, которые в 2–5 раз больше, чем визуализируемые организованные образования при $Q=0.07$ (зеленый цвет). Анализ рис. 5–6 выявляет различие в размерах выше упомянутых структур при $Q=\{0.01; 0.07\}$ примерно в 1.5–3 раза на участке восстановления течения ($25 \leq x \leq 40$).

Сравнение рис. 5–16 устанавливает тот факт, что в окрестности ядра когерентной структуры значение параметра Q будет максимальным, но разным по величине в соответствующих зонах вдоль по потоку: предотрывной, отрывной, присоединения и восстановления течения. В наших исследованиях (рис. 5–16) для данного типа турбулентного отрывного течения с преградой величина $Q=0.01$ (изоповерхности красного цвета) выбрана в качестве главного порогового значения для трехмерной визуализации и идентификации крупномасштабных когерентных структур.

ВЫВОДЫ

Рассмотрены методы трехмерной визуализации результатов численных исследований турбулентного течения. В данной работе на основе гибридного LES/URANS-подхода, разработанного в исследованиях [8, 34, 38], использована численная нестационарная трехмерная модель турбулентного течения несжимаемой жидкости с поперечной двумерной преградой на стенке при первоначальном турбулентном пограничном слое с нулевым продольным градиентом давления. В модели все параметры и уравнения имеют безраз-

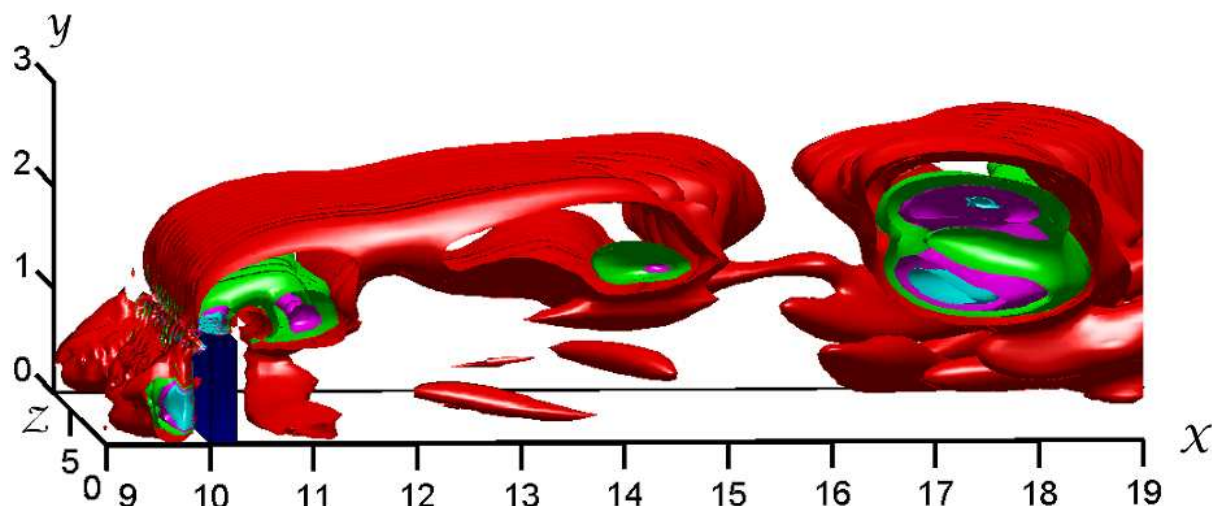


Рис. 16. Исоповерхности параметра Q с пороговыми значениями $Q=0.01$ (красный); $Q=0.07$ (зеленый); $Q=0.13$ (малиновый); $Q=0.19$ (голубой); $t=68$; $Re=10500$

мерный вид. Численная модель содержит три основных параметра: 1) число Рейнольдса преграды Re ; 2) число Рейнольдса турбулентного пограничного слоя Re_δ при $x=0$; 3) динамическая скорость u_* при $x=0$. Динамическая подсеточная модель имеет расчетный коэффициент C_V .

Впервые в рамках гибридного LES/URANS-подхода в случае отрывного нестационарного трехмерного турбулентного течения несжимаемой жидкости с поперечной преградой на стенке с параметрами $Re=10500$; $Re_\delta=10500$; $\delta=1$; $u_*=0.052$ использованы численные значения компонент скорости и параметра Q для трехмерной визуализации и идентификации крупномасштабных когерентных структур. Эта новая технология основана на применении набора пороговых значений Q в большой области. В работах [40, 43–52] использованы абсолютно разные пороговые величины Q и идентификация проведена только при одном пороговом значении Q , которое назначалось на усмотрение каждого из авторов. Для визуализации изоповерхности Q даже для одного типа течения не существует общепринятой единой пороговой величины Q . Выбор значения Q для определения внешней поверхности когерентных структур в трехмерном пространстве влечет за собой существенные изменения в формах и размерах визуализируемых вихревых образований.

В нашем исследовании для случая течения $Re=10500$ и $Re_\delta=10500$ проведена визуализация

поверхности когерентных структур в качестве трехмерной изоповерхности параметра Q в большой вычислительной области для определения влияния величины порогового значения Q на размеры когерентных структур. Новые результаты о трехмерных крупномасштабных когерентных структурах и их эволюции перед, над и за двумерной преградой получены на основе правильной взаимосвязи входных условий, сравнительно большого размера области расчета (особенно в поперечном направлении z), адекватности и точности численного алгоритма гибридного LES/URANS-подхода. Установлено, что визуализация изоповерхности только при одном выбранном пороговом значении Q в большой вычислительной области может идентифицировать только часть когерентных структур, а в некоторых подобластях может и вовсе ничего не визуализировать. Одно пороговое значение Q не в состоянии учитывать все многообразие типов когерентных структур при их эволюции в большой области. При сравнении численных результатов для $Q=\{0.01; 0.07; 0.13\}$ выявлено, что размеры когерентных структур отличаются в несколько раз (чем больше пороговое Q , тем меньше размеры структур при визуализации), причем на каждом участке по-разному. Для правильного физического понимания механизмов вихреобразования разных типов течений в большой вычислительной области предпочтительнее изображать когерентные структуры с помощью

трехмерных изоповерхностей с набором пороговых оптимальных значений $\{Q_{si}\}$. В предлагаемой технологии трехмерной идентификации когерентных структур пороговые уровни для Q при увеличении их значений определяют меру приближения к ядру когерентной структуры при исследовании течения несжимаемой жидкости в турбулентном режиме. Установлено, что в окрестности ядра когерентной структуры значение Q будет максимальным, но разным на различных расстояниях вдоль по потоку. Эти участки соответствуют условиям зон: предотрывной, отрывной, присоединения и восстановления потока.

Представленная новая технология трехмерной идентификации и визуализации способна эффективно выявить крупномасштабные когерентные структуры в большой области с требуемой точностью. Она обеспечивает последовательную и непрерывную взаимосвязь визуализируемых трехмерных образований при исследовании их эволюции в большой области расчета.

Гибридный LES/URANS-подход правомерно использовать в диапазоне $5000 < Re < 10^{10}$. Разработанная технология трехмерной идентификации и визуализации когерентных структур не имеет ограничений по числу Рейнольдса.

1. Siller H., Fernholtz H. Control of separated flow downstream of a two-dimensional fence by low-frequency forcing // *Appl.Sci.Res.*– 1997.– v.57.– P. 309–318.
2. Good M., Joubert P. The form drag of two-dimensional bluff-plates immersed in turbulent boundary layers // *J.Fluid.Mech.*– 1968.– v.31.– P. 547–582.
3. Siller H., Fernholtz H. Separation behavior in front of two-dimensional fence // *Eur.J.Mech.B-Fluids.*– 2001.– v.20,N5.– P. 727–740.
4. Hudy L., Naguiba A., Humphreys W. Stochastic estimation of a separated-flow field using wall-pressure-array measurements // *Phys.Fluids.*– 2007.– v.19.– P. 024103.
5. Ranga Raju K., Loeser J., Plate E. Velocity profiles and fence drag for a turbulent boundary layer along smooth and rough flat plates // *J.Fluid.Mech.*– 1976.– v.76(2).– P. 383–399.
6. Siller H., Fernholz H. Manipulation of the reverse-flow region downstream of a fence by spanwise vortices // *Eur.J.Mech.B-Fluids.*– 2007.– v.26,N2.– P. 236–257.
7. Aoki K., Kanba K., Takata S. Numerical analysis of a supersonic rarefied gas flow past a flat plate // *Phys.Fluids.*– 1997.– v.9,N4.– P. 1144–1161.
8. Кузьменко В.Г. Численное моделирование турбулентного пристенного течения с преградой на основе гибридного LES/RANS-подхода // *Прикладна гідромеханіка.*– 2011.– **13(85)**, N3.– С. 48–60.
9. Orellano A., Wengle H. Numerical simulation (DNS and LES) of manipulated turbulent boundary layer flow over a surface-mounted fence // *Eur.J.Mech.B-Fluids.*– 2000.– v.19,N5.– P. 765–788.
10. Germano M., Piomelli U., Moin P., Cabot W. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model // *Phys.Fluids A.*– 1991.– v.3,N7.– P. 1760–1765.
11. VerHulst C., Meneveau C. Large eddy simulation study of the kinetic energy entrainment by energetic turbulent flow structures in large wind farms // *Physics of fluids.*– 2014.– v.26.– P. 025113.
12. Selimefendigil F., Polifke W. Nonlinear, Proper-Orthogonal-Decomposition-Based Model of Forced Convection Heat Transfer in Pulsating Flow // *AI-AA J.*– 2014.– v.52, N1.– P. 131–145.
13. Piomelli U., Balaras E. Wall-layer models for Large-Eddy Simulations // *Annu.Rev.Fluid.Mech.*– 2002.– v.34.– P. 349–374.
14. Кузьменко В.Г. Численное трехмерное моделирование турбулентного пограничного слоя в режиме развитой шероховатости на основе LES-технологии // *Прикладна гідромеханіка.*– 2002.– **4(76)**, N3.– С. 31–41.
15. Кузьменко В.Г. Численное трехмерное моделирование турбулентного пограничного слоя в режиме промежуточной шероховатости // *Прикладна гідромеханіка.*– 2003.– **5(77)**, N2.– С. 27–36.
16. Кузьменко В.Г. Численное трехмерное моделирование турбулентного пограничного слоя на основе экономической LES-технологии // *Прикладна гідромеханіка.*– 2004.– **6(78)**, N1.– С. 19–24.
17. Кузьменко В.Г. Динамические подсеточные модели для LES-технологии // *Прикладна гідромеханіка.*– 2004.– **6(78)**, N3.– С. 22–27.
18. Кузьменко В.Г. Численное моделирование турбулентного течения с отрывом в асимметричном канале на основе гибридной LES/RANS-технологии // *Прикладна гідромеханіка.*– 2010.– **12(84)**, N3.– С. 24–36.
19. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя.– М.: Инлит, 1956.– 528 с.
20. Бабенко В.В., Канарский М.Б., Коробов Б.И. Пограничный слой на эластичных пластинах.– К.: Наукова думка, 1993.– 264 с.
21. Ligrani P., Moffat R. Structure of transitionally rough and fully rough turbulent boundary layers // *J.Fluid.Mech.*– 1986.– v.162.– P. 69–98.
22. Ротта И.К. Турбулентный пограничный слой в несжимаемой жидкости.– Л.: Судостроение, 1967.– 232 с.
23. Кузьменко В.Г. Численное моделирование нестационарного турбулентного течения с отрывом над впадиной и внутри впадины // *Прикладна гідромеханіка.*– 2009.– **11(83)**, N3.– С. 28–41.
24. Breuer M. Wall models for LES of separated flows // *ERCOTAC Bulletin.*– 2007.– N72.– P. 13–18.
25. Hoyas S., Jimenez J. Scaling of the velocity fluctuations in turbulent channels up to $Re_\tau=2003$ // *Phys.Fluids.*– 2006.– v.18.– P. 011702.
26. Diurno G.V., Balaras E., Piomelli U. Wall-layer models of separated flows // In *Modern simulation strategies for turbulent flux*, ed. B.Geurts.– Philadelphia.– 2001.– P. 207–222.
27. Perry A.E., Henbest S.M., Chong M.S. A theoretical and experimental study of wall turbulence // *J.Fluid.Mech.*– 1986.– v.165.– P. 163–199.
28. Zhou J., Adrian R., Balachandar S. Autogeneration of near-wall vortical structures in channel flow // *Phys.Fluids.*– 1996.– v.8.– P. 288–305.

29. *Jakirlic S.* Wall modelling in LES: method development and application // ERCOFTAC Bulletin.– 2007.– N72.– P. 5–6.
30. *Fubery C.* On LES and DES of wall bounded flows // ERCOFTAC Bulletin.– 2007.– N72.– P. 67–72.
31. *DeGraaf D., Eaton J.* Reynolds-number scaling of the flat-plate turbulent boundary layer // J.Fluid.Mech.– 2000.– v.422.– P. 319–346.
32. *Kaltenbach H.* A priori testing of wall models for separated flows // Phys.Fluids.– 2003.– v.15,N10.– P. 3048–3064.
33. *Кузьменко В.Г.* Численное моделирование турбулентного течения с отрывом за обратным уступом // Прикладна гідромеханіка.– 2007.– **9(81)**, N4.– С. 37–48.
34. *Кузьменко В.Г.* Численное моделирование нестационарного турбулентного течения с преградой на основе гибридного LES/URANS-подхода // Прикладна гідромеханіка.– 2013.– **15(87)**, N2.– С. 22–36.
35. *Klebanoff P.S., Claveland W.G., Tidstrom K.D.* On the evolution of a turbulent boundary layer induced by a three-dimensional roughness element // J.Fluid.Mech.– 1992.– v.237.– P. 101–187.
36. *Perry A.E., Lim K.L., Henbest S.M.* An experimental study of the turbulence structure in smooth- and rough-wall boundary layers // J.Fluid.Mech.– 1987.– v.177.– P. 437–468.
37. *Balint J., Wallace J., Vukoslavcevic P.* The velocity and vorticity vector fields of a turbulent boundary layer. Part 2. Statistical properties // J.Fluid.Mech.– 1991.– v.228.– P. 53–86.
38. *Кузьменко В.Г.* Численное моделирование турбулентного течения с преградой при разных внешних условиях на основе гибридного LES/URANS-подхода. Часть 1 // Прикладна гідромеханіка.– 2015.– **17(89)**, N1.– С. 59–71.
39. *Carlier J., Stasnislas M.* Experimental study of eddy structures in a turbulent boundary layer using particle image velocimetry // J.Fluid Mech.– 2005.– v.535.– P. 143–158.
40. *Natrajan V., Christensen* The role of coherent structures in subgrid-scale energy transfer within the log layer of wall turbulence // Phys.Fluids.– 2006.– v.18.– P. 065104.
41. *Spyropoulos E, Blaisdell G.* Large-Eddy simulation of a spatially evolving supersonic turbulent boundary-layer flow // AIAA J.– 1998.– v.36, N11.– P. 1983–1990.
42. *Lesieur M., Begou P., Comte P., Metais O.* Vortex recognition in numerical simulations // ERCOFTAC Bulletin.– 2000.– N46.– P. 25–28.
43. *Гущин В.А., Матюшин П.В.* Механизмы формирования вихрей в следе за сферой при $200 < Re < 380$ // Известия РАН. МЖГ.– 2006.– N5.– С. 135–151.
44. *Zhang S., Choudhury D.* Eigen helicity density: A new vortex identification scheme and its application in accelerated inhomogeneous flows // Phys.Fluids.– 2006.– v.18.– P. 058104.
45. *Kolar V.* Vortex identification: New requirements and limitations // Int.J. of Heat and Fluid Flow.– 2007.– v.28.– P. 638–652.
46. *Chakraborty P., Balachandar S., Adrian R.* On the relationships between local vortex identification schemes // J.Fluid Mech.– 2005.– v.535.– P. 189–214.
47. *Jeong J., Hussain F., Shopp W., Kim J.* Coherent structures near the wall in a turbulent channel flow // J.Fluid Mech.– 1997.– v.332.– P. 185–214.
48. *Meneveau C., Katz J.* Scale-invariance and turbulence models for large-eddy simulation // Annu.Rev.Fluid.Mech.– 2000.– v.32.– P. 1–32.
49. *Neto A., Grand D., Metais O., Lesieur M.* A numerical investigation of the coherent vortices in turbulence behind a backward-facing step // J.Fluid.Mech.– 1993.– v.256.– P. 1–25.
50. *Orlandi P.* The importance of wall-normal Reynolds stress in turbulent rough channel flows // Phys.Fluids.– 2013.– v.25.– P. 110813.
51. *Harbig R., Sheridan J., Thompson M.* Reynolds number and aspect ratio effects on the leading-edge vortex for rotating insect wing planforms // J.Fluid Mech.– 2013.– v.717.– P. 166–192.
52. *Кузьменко В.Г.* Численное моделирование турбулентного течения с преградой при разных внешних условиях. Часть 2. Идентификация когерентных структур // Прикладна гідромеханіка.– 2015.– **17(89)**, N3.– С. 18–34.
53. *Haller G.* Distinguished material surfaces and coherent structures in three-dimensional fluid flows. // Physica D.– 2001.– N149.– P. 248–277.