

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Е. К. Гусева А. В. Гарбарук А. А. Смирновский

МОДЕЛИ
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ
ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ
И ТУРБУЛЕНТНОСТИ

РАСЧЕТ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ
С ПРИМЕНЕНИЕМ
ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩИХ ПОДХОДОВ

Практикум



ПОЛИТЕХ-ПРЕСС

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург

2020

ББК 22.311
Г96

Гусева Е. К. Модели физико-химической гидрогазодинамики и турбулентности. Расчет турбулентных течений с применением вихреразрешающих подходов : практикум / Е. К. Гусева, А. В. Гарбарук, А. А. Смирновский. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – 49 с.

Практикум посвящен применению вихреразрешающих подходов к численному моделированию турбулентности, с опорой на возможности программного пакета ANSYS FLUENT. Для двух представительных задач – турбулентного обтекания цилиндра (внешнее течение) и развитого движения жидкости в плоскопараллельном канале (внутреннее течение), – детально изложена последовательность применения вихреразрешающих подходов к моделированию турбулентной структуры потока и расчету основных статистических характеристик. Даны рекомендации по обработке полученных результатов и их представлению.

Практикум предназначен для студентов магистратуры СПбПУ по направлению «Прикладные математика и физика», изучающих курс «Модели физико-химической гидрогазодинамики и турбулентности» – одну их важнейших составляющих образовательной программы «Модели и высокопроизводительные вычисления в физической гидрогазодинамике». Практикум может быть также полезен студентам других специальностей, осваивающим методы инженерного анализа с применением пакета ANSYS FLUENT.

Печатается по решению
Совета по издательской деятельности Ученого совета
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

© Гусева Е. К., Гарбарук А. В.,
Смирновский А. А., 2020
© Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, 2020

ISBN 978-5-7422-7167-3

Подготовка бакалавров и магистров по направлению **"Прикладная математика и физика"** ведется в Высшей школе прикладной математики и вычислительной физики СПбПУ и обеспечивается профессорско-преподавательским составом секции "Гидроаэродинамика, горение и теплообмен".

Бакалаврская программа сформирована по профилю "Математические модели и вычислительные технологии в гидроаэродинамике и теплофизике". Студенты получают фундаментальную подготовку по высшей математике и общей физике, которая дополняется курсами математической физики, теоретической физики, химии, теоретической механики и др. На третьем курсе начинается преподавание профильных дисциплин, нацеленных на освоение как моделей и задач гидроаэродинамики и теплофизики, так и современных вычислительных методов и технологий, включая различные программные пакеты.

Продолжение обучения проводится в магистратуре. Образование, получаемое по программе "Модели и высокопроизводительные вычисления в физической гидрогазодинамике", позволяет выпускникам заниматься решением комплексных проблем физической гидрогазодинамики, теплофизических проблем, междисциплинарных задач. В процессе обучения магистранты изучают и плодотворно применяют в учебно-научной работе и в исследованиях по грантам и заказам промышленности современные технологии компьютерного моделирования и инженерного анализа (*CAE-системы*), включая лицензионные (*ANSYS-Mechanical, ANSYS-CFD, ICEM*) и свободно распространяемые (*OpenFOAM*) программные пакеты общего назначения, а также специализированные пакеты вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD).

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Задания к работам	8
2 Постановки задач, рекомендуемые сетки и ожидаемые результаты.....	10
2.1 Обтекание цилиндра с нагретой стенкой.....	10
2.2 Установившееся течение в плоскопараллельном канале	21
3 Этапы решения задач	28
3.1 Создание расчетной области и построение сетки.....	28
3.2 Получение начального приближения.....	30
3.3 Расчет нестационарной задачи с использованием вихреразрешающего подхода.....	34
3.4 Обработка результатов	38
Список литературы.....	42
Приложение 1. Экспериментальные и расчетные данные, привлекаемые для сравнения	43
Приложение 2. Индивидуальные варианты заданий	46
Обтекание цилиндра с нагретой стенкой.....	46
Установившееся течение в плоскопараллельном канале	47

Введение

Расчет турбулентных течений является одной из важнейших задач вычислительной гидродинамики, поскольку именно турбулентная форма движения газов и жидкостей чаще всего реализуется в природе и в различных технических устройствах. В настоящее время, как и на протяжении многих последних десятилетий, доминирующим подходом к расчету турбулентных течений остается подход, базирующийся на решении уравнений Рейнольдса (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*, RANS), замкнутых с помощью той или иной полуэмпирической модели турбулентности. Однако этот подход имеет принципиальные ограничения, связанные с его полуэмпирической природой, что делает невозможным построение универсальной модели для замыкания уравнений Рейнольдса. Этот недостаток RANS, а также быстрый рост производительности вычислительной техники, привели к развитию так называемых вихререзающих методов моделирования турбулентности, в частности, метода моделирования крупных вихрей (*Large Eddy Simulation*, LES) и гибридных RANS-LES подходов, сочетающих в себе сильные стороны RANS и LES [1]. В связи с все более широким распространением вихререзающих подходов, навык расчета турбулентных течений на их основе крайне важен для специалистов, работающих в различных областях.

В последние годы все больше расчетов проводится с использованием кодов общего назначения, позволяющих решать широкий спектр задач. Одним из наиболее распространенных кодов данного класса является пакет ANSYS FLUENT, в котором реализован богатый набор методов расчета турбулентных течений. Владение этим пакетом и умение рассчитывать с его

помощью различные турбулентные течения, в том числе и с использованием вихререзающих подходов, является необходимым навыком для специалистов в области механики сплошных сред.

Настоящий практикум предназначен для студентов магистратуры СПбПУ по направлению «Прикладная математика и физика», изучающих, в рамках образовательной программы «Модели и высокопроизводительные вычисления в физической гидрогазодинамике», курс «Модели физико-химической гидрогазодинамики и турбулентности» и выполняющих профильные курсовые работы. Предполагается что студенты, выполняющие эти работы, ознакомлены с основами моделирования как ламинарных потоков, так турбулентных течений с применением RANS моделей турбулентности в пакете ANSYS FLUENT (освоили курсы «Программные средства вычислительной гидродинамики и теплофизики» и «Моделирование турбулентности» бакалавриата СПбПУ или аналогичные курсы в других высших учебных заведениях), умеют строить расчетные сетки и производить обработку результатов.

В рамках практических занятий по курсу «Модели физико-химической гидрогазодинамики и турбулентности» проводятся расчеты двух течений: турбулентного обтекания цилиндра и развитого турбулентного течения в плоскопараллельном канале. Первая из этих задач является типичной задачей внешнего обтекания, а вторая – простейшим внутренним течением. Выбор этих задач обусловлен и тем, что их расчет на основе вихререзающего подхода может быть проведен на сетках

размером до 500 тысяч ячеек¹. Индивидуальные варианты различаются числом Рейнольдса, используемым подходом к моделированию турбулентности, численным алгоритмом, размером расчетной области и величиной шага по времени.

¹ Академическая лицензия пакета FLUENT, используемая студентами СПбПУ для расчетов, не позволяет проводить расчеты на сетках более 500 тысяч ячеек.

1 Задания к работам

1. Выполнить расчет турбулентного обтекания цилиндра или развитого турбулентного течения в плоскопараллельном канале с использованием вихреразрешающих подходов к моделированию турбулентности и соответствующих замыкающих моделей из индивидуального варианта.
2. Провести обработку и анализ полученных результатов, сравнить результаты, полученные по разным подходам, между собой, а также с данными экспериментов [2, 3] (для цилиндра) и результатами прямого численного моделирования, доступными на сайтах [4, 5] (для канала).
3. Подготовить отчет о проделанной работе, который должен содержать следующие разделы:
 - введение, включающее в себя цель работы и средства ее достижения;
 - физическую и математическую постановку задачи;
 - определяющие уравнения и методы их решения, включая описание используемых численных схем;
 - результаты расчетов, их анализ и сравнение различных подходов (примеры графиков, которые необходимо построить, приведены в разделах 2.1 и 2.2 ниже);
 - заключение, содержащее основные выводы, полученные в работе.

Все рассматриваемые задачи решаются в приближении несжимаемости жидкости². При этом используются двумерные уравнения Рейнольдса (для задачи об обтекании цилиндра), или

² Это приближение вполне оправдано, поскольку полученные результаты необходимо сравнить либо с данными прямого численного моделирования, выполненного в таком же приближении, либо с экспериментальными данными, полученными при малых числах Маха.

трехмерные нестационарные отфильтрованные/осредненные уравнения Навье-Стокса, замкнутые при помощи различных подсеточных/RANS моделей турбулентности.

Принятые обозначения

Для определенности при постановке обеих задач будем использовать декартову систему координат, ось X которой соответствует направлению основного потока, а ось Z перпендикулярна плоскости течения. Соответственно, будем обозначать длину расчетной области через L_x , высоту - L_y , и ширину в третьем направлении - L_z ; обозначения U и V соответствуют продольной и поперечной компоненте скорости в плоскости основного течения, а W – компоненте скорости в трансверсальном (однородном) направлении.

2 Постановки задач, рекомендуемые сетки и ожидаемые результаты

2.1 Обтекание цилиндра с нагретой стенкой

Расчет обтекания цилиндра с нагретой стенкой проводится в трех вариантах:

- решаются двумерные³ стационарные уравнения Рейнольдса, замкнутые с использованием полуэмпирической модели турбулентности из индивидуального задания;
- решаются двумерные нестационарные уравнения Рейнольдса с той же моделью турбулентности;
- применяется вихреразрешающий подход согласно индивидуальному заданию.

Постановка задачи

Рассматривается задача об обтекании кругового цилиндра с равномерно нагретой стенкой ($T = T_w = \text{const}$) несжимаемой жидкостью с температурой набегающего потока T_∞ (Рис. 1). Данная задача определяется двумя критериями подобия: числом Рейнольдса (Re), построенным по скорости набегающего потока U_∞ и диаметру цилиндра D , и числом Прандтля (Pr). В предлагаемом расчетном задании $Re = 1.4 \cdot 10^5$, $Pr = 0.71$. Значения граничных температур можно взять произвольными, например, положить $T_\infty = 293$ К, $T_w = 303$ К.

³ При расчете двумерной задачи по трехмерной версии кода ANSYS FLUENT следует использовать так называемую квазитрехмерную постановку, т.е. трехмерную расчетную область с одной ячейкой в трансверсальном направлении и граничными условиями симметрии по z .

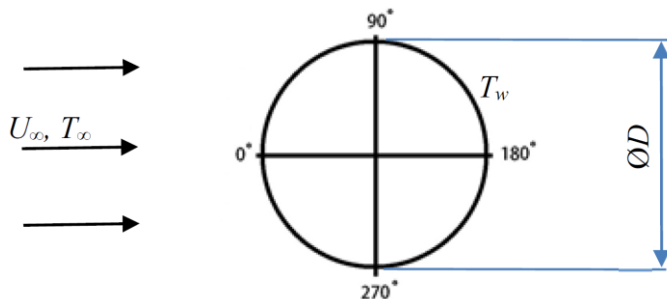


Рис. 1. Схема обтекания кругового цилиндра.

Расчетная область и сетка

Расчетная область в плоскости XY представляет собой круг с радиусом $R = 10D$, в центре которого находится цилиндр (Рис. 2, слева).

В плоскости XY строится сетка О-типа. Рекомендуется использовать сетку со следующими параметрами. Распределение узлов по угловой координате равномерное, количество узлов $N_\theta = 129$. В радиальном направлении сетка сгущена с коэффициентом 1.2 к стенке цилиндра, величина первого пристеночного шага составляет $\Delta_{r\min} = 1.5 \cdot 10^{-4}D$ (такой шаг обеспечивает выполнение условия $y_w^+ < 1$), а общее количество узлов составляет $N_r = 131$. При таком выборе параметров итоговое количество ячеек двумерной сетки в полной области не превышает 17 тысяч узлов.

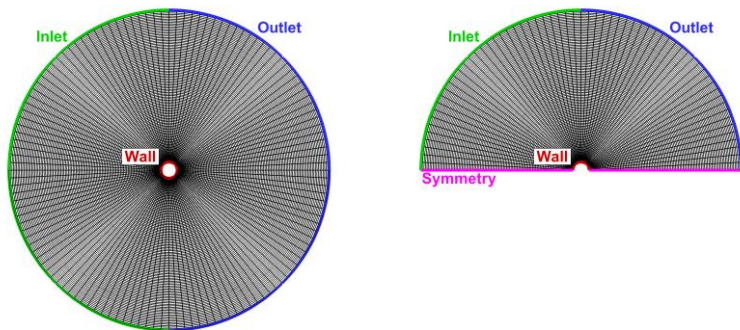


Рис. 2. Расчетная область и расчетная сетка в плоскости XY для решения нестационарных (слева) и стационарных (справа) уравнений Рейнольдса.

Следует отметить, что решение задачи об обтекании цилиндра, предполагаемое к получению в рамках стационарных уравнений Рейнольдса, для расчетной области в виде полного круга оказывается неустойчивым. Устойчивое двумерное стационарное решение можно получить, если использовать расчетную область в виде полукруга, $y \geq 0$, с наложением граничных условий симметрии при $y = 0$ (Рис. 2, справа).

В случае применения вихререзающих подходов необходимо использовать трехмерную расчетную область достаточной протяженности по координате z . Конкретно, при выполнении расчетного задания следует принять размер по z равным $L_z = 2D$ (размер области в плоскости XY остается прежним). При этом на границах в направлении z используются периодические граничные условия. Расчетная сетка в плоскости XY совпадает с описанной выше двумерной «круговой» сеткой, а в направлении z следует использовать равномерное распределение узлов, с рекомендуемым числом узлов $N_z = 31$. Итоговое количество ячеек – чуть менее 500 тысяч ($128 \cdot 130 \cdot 30 = 499200$).

Шаг по времени не должен превышать $\Delta t = 0.02D/U_\infty$, поскольку именно такой шаг обеспечивает число Куранта меньше единицы в основной части расчетной области.

Обработка результатов расчета для включения в отчет

В разделе отчета, посвященном описанию результатов расчетов, должны присутствовать следующие подразделы.

1. История установления решения (для задач в нестационарной постановке)

В отчете следует представить графики (см. рис. 3), иллюстрирующие изменение коэффициентов подъемной силы $C_L = \frac{2F_y}{\rho U_\infty^2 S}$ и силы (лобового) сопротивления $C_D = \frac{2F_x}{\rho U_\infty^2 S}$ (здесь F_x , F_y – компоненты силы, действующей на цилиндр, $S = D \cdot L_z$ – характерная площадь, ρ – плотность), указать период установления решения, а также моменты начала и окончания интервала осреднения по времени.

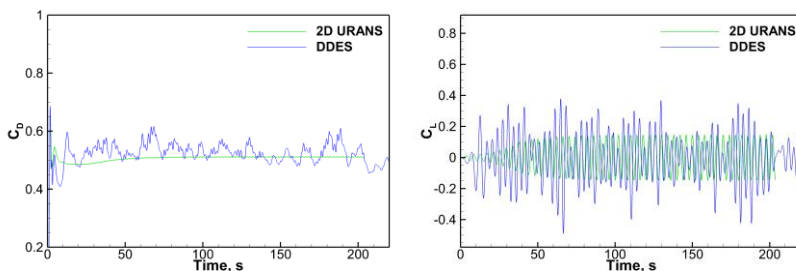


Рис. 3. Изменение коэффициентов сопротивления и подъёмной силы во времени.

2. Визуализация течения

Для визуального анализа структуры предсказываемого течения необходимо представить изображение трехмерной изоповерхности Q-критерия (Рис. 4), а также графики мгновенных

полей скорости, завихренности, турбулентной вязкости в плоскости XY и температуры (Рис. 4 - 8). Следует отметить, что для визуализации результатов двумерных расчетов, приведенных на рис. 4, координата z была масштабирована, а в случае решения стационарной задачи в половине области полученное поле было также дополнено его зеркальным отражением.

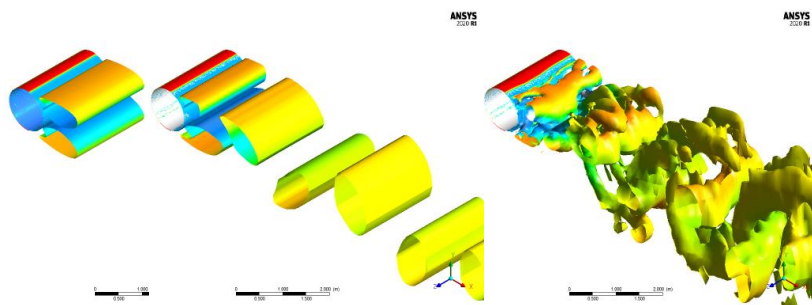


Рис. 4. Исоповерхность Q-критерия, окрашенная величиной продольной составляющей скорости (цветовая шкала приведена на Рис. 5). Справа налево: результаты расчетов 2D steady RANS, 2D URANS, DDES.

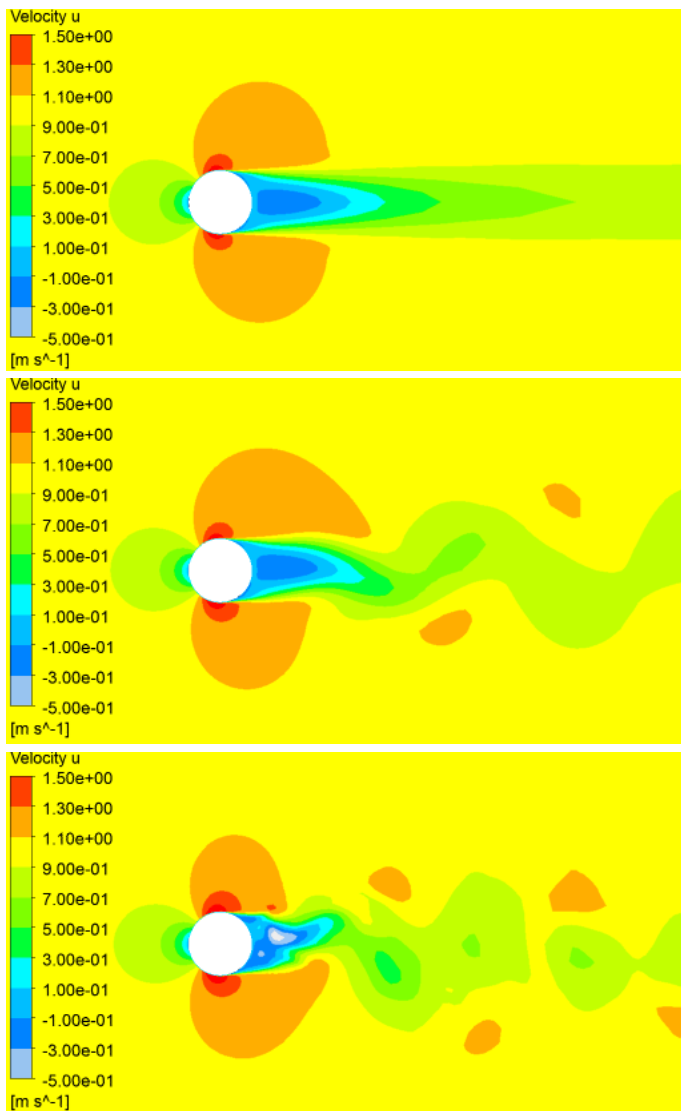


Рис. 5. Поле продольной составляющей скорости. Сверху вниз: результаты расчетов 2D steady RANS, 2D URANS, DDES.

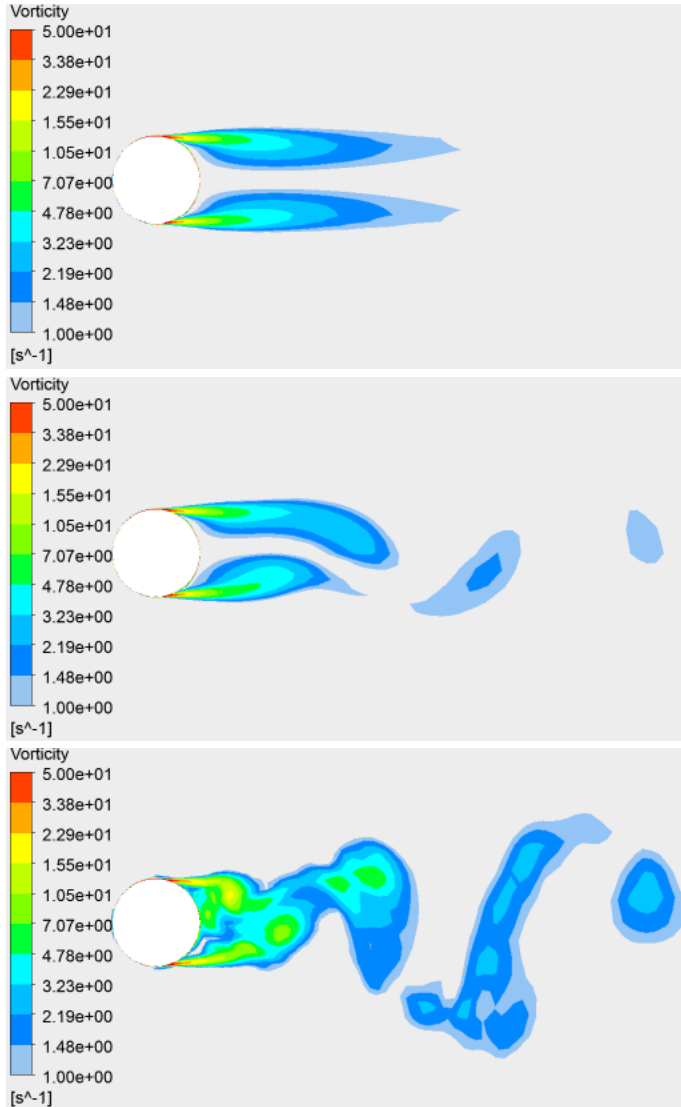


Рис. 6. Мгновенное поле завихренности. Сверху вниз: результаты расчетов 2D steady RANS, 2D URANS, DDES.

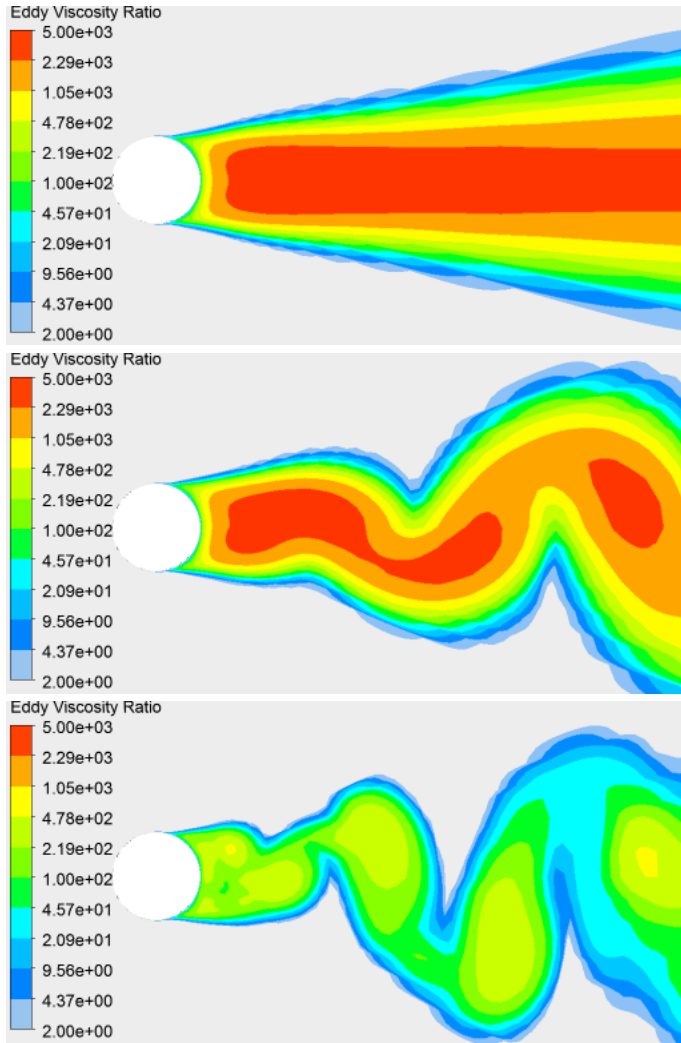


Рис. 7. Мгновенное поле отношения турбулентной вязкости к молекулярной. Сверху вниз: результаты расчетов 2D steady RANS, 2D URANS, DDES.

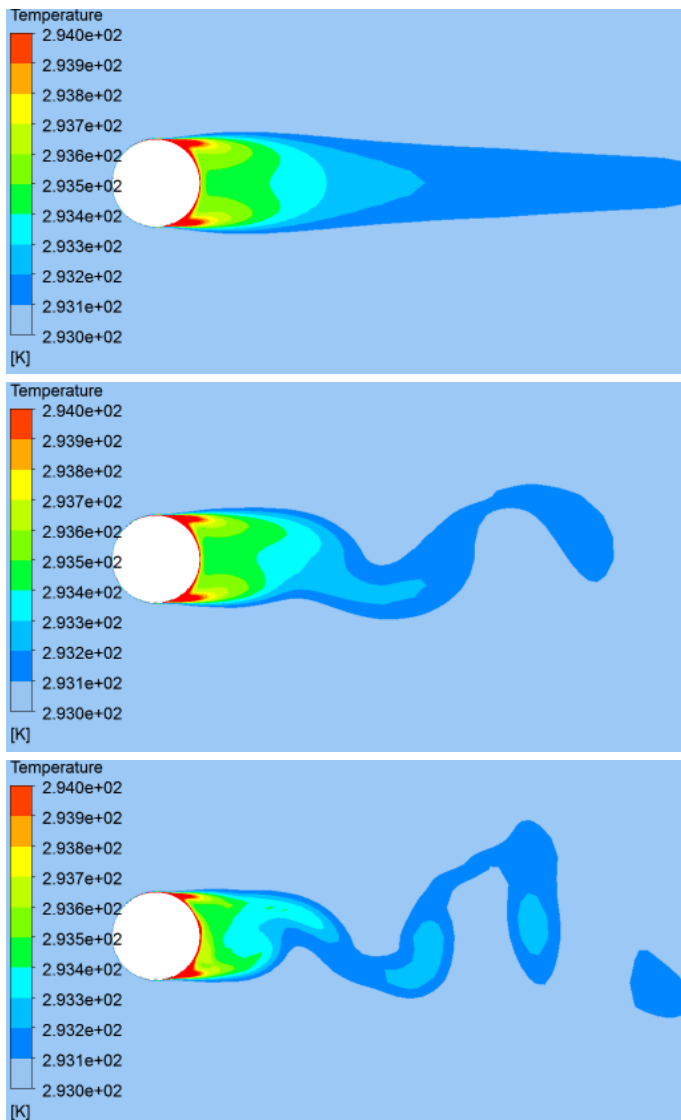


Рис. 8. Мгновенное поле температуры. Сверху вниз: результаты расчетов 2D steady RANS, 2D URANS, DDES.

3. Осредненные характеристики течения

В отчете следует также представить расчетные данные, полученные для осредненных/интегральных характеристик течения в трех заданных вариантах расчета, и сравнить эти данные с литературными. А именно:

- в виде таблицы привести полученные в работе данные для осредненного по времени коэффициента лобового сопротивления C_d , осредненного по времени и поверхности цилиндра числа Стентона (см. определение ниже), числа Струхалия колебаний дорожки Кармана, углового положения точки отрыва пограничного слоя и длины отрывной зоны, и сравнить эти данные с расчетными данными из статьи [6] (см. приложение 1).
- в виде графиков (Рис. 9) дать сравнение расчетных распределений осредненного по времени и координате z коэффициента давления $C_p = \frac{p-p_0}{\rho U_\infty^2/2}$ по поверхности цилиндра с экспериментальными данными [2, 3], а также привести расчетные распределения осредненного по времени и координате z числа Стентона $St = \frac{h}{\rho U_\infty c_p}$ (здесь h – коэффициент теплоотдачи, c_p – удельная теплоемкость жидкости при постоянном давлении).

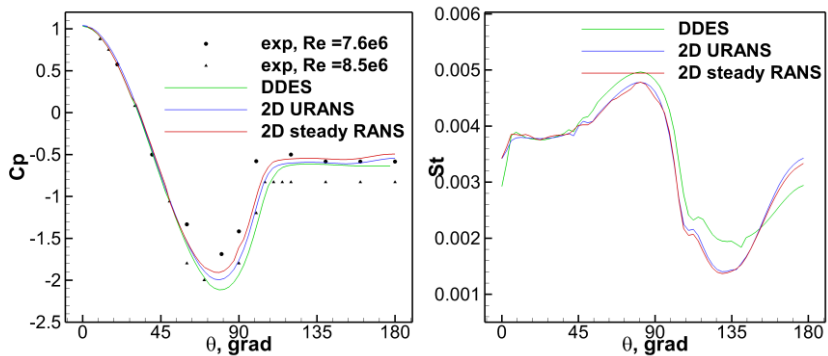


Рис. 9. Распределение коэффициента давления (слева) и числа Стентона (справа) по поверхности цилиндра.

2.2 Установившееся течение в плоскопараллельном канале

Расчет установившегося течения в плоскопараллельном канале проводится в двух вариантах: посредством решения уравнений Рейнольдса, замкнутых при помощи модели турбулентности SST, и на основе вихререзрашающего подхода к моделированию турбулентности в соответствии с индивидуальным заданием.

Постановка задачи

Рассматривается установившееся (развитое) по продольной координате течение несжимаемой жидкости в бесконечном канале, образованном двумя плоскими параллельными стенками. Данное течение характеризуется числом Рейнольдса $Re_\tau = \rho \cdot (H/2) \cdot u_\tau / \mu$, где H – высота канала, $u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$ – динамическая скорость, ρ – плотность, μ – динамическая вязкость. Конкретное значение числа Рейнольдса определяется индивидуальным вариантом расчетного задания.

Расчетная область и сетка

Расчетная область (L_x, L_y, L_z) представляет собой параллелепипед (Рис.10) с размерами $(4H, H, 1.5H)$.

Расчетная сетка в направлениях x и z строится равномерной с шагами $\Delta x/H = 0.05$ и $\Delta z/H = 0.025$, соответственно (Рис. 11)⁴. В направлении y расчетная сетка строится со сгущением к стенке, а ее локальный шаг должен удовлетворять следующим условиям:

⁴ Поскольку решение RANS является двумерным, в целях экономии вычислительных ресурсов при его получении следует использовать квазитрехмерную постановку задачи, т.е. расчетная сетка должна содержать одну ячейку в трансверсальном направлении.

размер пристеночного шага должен обеспечивать условие $\Delta y_{wall}^+ < 1$, в центре канала величина шага Δy_{center} должна быть в диапазоне $\Delta z < \Delta y_{center} < \Delta x$, а коэффициент сгущения не должен превышать величины 1.15. Конкретный размер сетки зависит от числа Рейнольдса задачи (для варианта $Re_\tau = 400$ полный размер сетки составляет около 400 тысяч ячеек).

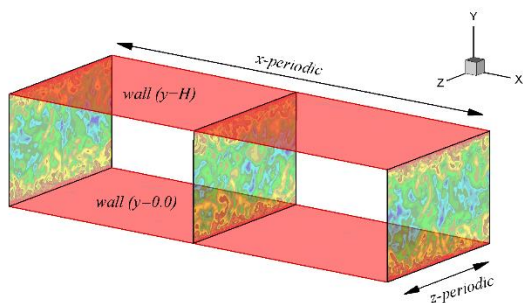


Рис. 10. Расчетная область и граничные условия.

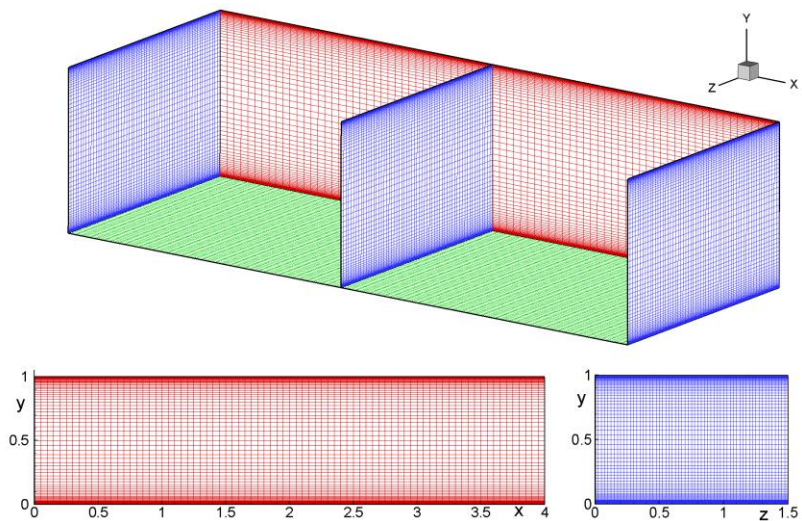


Рис. 11. Пример расчетной сетки.

В направлениях x и z задаются периодические граничные условия. При этом для уравнения баланса импульса в проекции на ось x задается осредненный градиент давления (фактически, однородный по пространству объемный источник, обеспечивающий заданное индивидуальным вариантом число Рейнольдса Re_τ). Связь величины градиента давления и числа Рейнольдса можно найти, проинтегрировав осредненные уравнения движения по высоте канала и приняв во внимание граничные условия прилипания:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{8\mu^2}{\rho H^3} Re_\tau^2$$

Шаг по времени для данной задачи не должен превышать $\Delta t = 0.001 \cdot H/u_\tau$, что обеспечивает величину числа Куранта меньше единицы во всей расчетной области.

Обработка результатов расчета для включения в отчет

В разделе отчета, посвященном описанию результатов расчетов, должны присутствовать следующие подразделы.

1. История установления решения

В отчете следует представить графики, иллюстрирующие изменение во времени среднерасходной скорости в канале (можно на границе периодичности) и осредненного трения на стенке (примеры даются на Рис. 12 и Рис. 13), указать период установления решения, а также моменты начала и окончания интервала осреднения по времени.

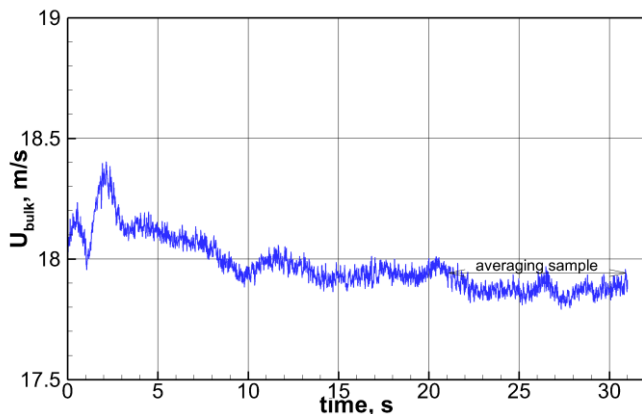


Рис. 12. Изменение среднерасходной скорости во времени.

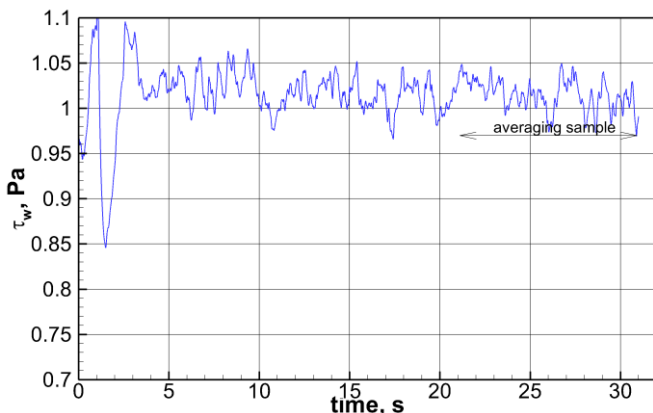


Рис. 13. Изменение среднего трения на стенках канала во времени.

2. Визуализация течения

Для визуального анализа структуры предсказываемого течения необходимо представить изображение трехмерной изоповерхности Q-критерия (Рис. 14, слева) и поле модуля мгновенной скорости в плоскости XY (Рис. 14, справа), а также поля мгновенных значений модуля завихренности в плоскости XY и в нескольких плоскостях XZ (Рис. 15).

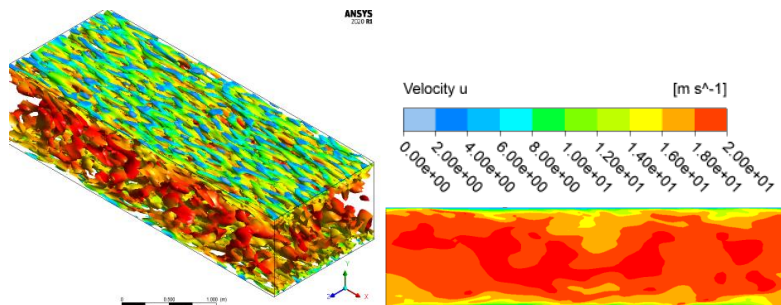


Рис. 14. Изоповерхность Q-критерия, окрашенная величиной продольной скорости (слева), и мгновенное поле продольной компоненты скорости (справа).

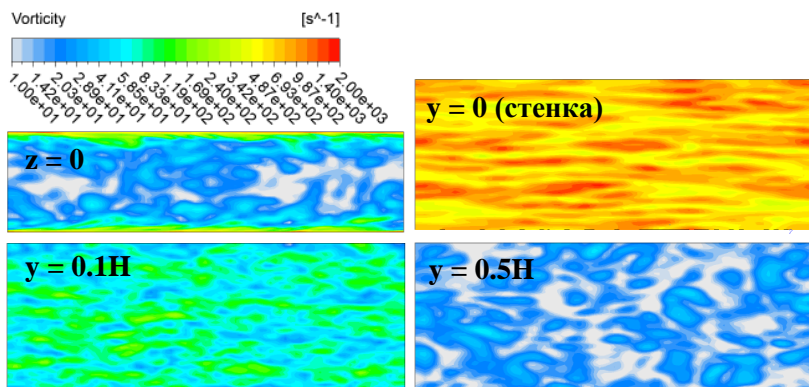


Рис. 15. Мгновенные поля модуля завихренности в нескольких сечениях расчетной области.

3. Турбулентная вязкость

Для оценки вклада моделируемых напряжений при расчетах на основе используемого вихререзающего подхода необходимо представить мгновенное поле отношения турбулентной вязкости к молекулярной (ν_t/ν), а также графики зависимости осредненной (по времени и/или плоскостям XZ) величины ν_t/ν от координаты y (примеры даются на Рис. 16).

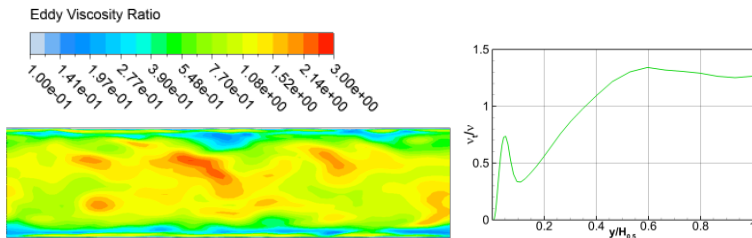


Рис. 16. Поле мгновенных (слева) и профиль осредненных (справа) значений отношения турбулентной вязкости к молекулярной.

4. Профили средней скорости и реинольдсовых напряжений

В отчете следует представить расчетные профили средней скорости течения в канале и четырех реинольдсовых напряжений, полученные с применением вихререзающего подхода, и сравнить их с данными прямого численного моделирования (DNS) [3, 4].

Сопоставление результатов выполненного расчета с данными DNS (примеры даются на Рис. 17, 18) проводится посредством построения следующих профилей: $u^+(y^+)$, $uv^+(y^+)$, $uu^+(y^+)$, $vv^+(y^+)$, $ww^+(y^+)$, где $y^+ = d_w \cdot u_\tau / \nu$, d_w – расстояние до ближайшей стенки, u_τ – динамическая скорость, рассчитанная по осредненному по времени и пространству (в двух однородных направлениях) трению на стенке,

$$u^+ = \bar{U} / u_\tau \quad (2.1)$$

$$uu^+ = \sqrt{\overline{U'U'}} / u_\tau \quad (2.2)$$

$$vv^+ = \sqrt{\overline{V'V'}} / u_\tau \quad (2.3)$$

$$ww^+ = \sqrt{\overline{W'W'}} / u_\tau \quad (2.4)$$

$$uv^+ = \overline{U'V'} / u_\tau^2 \quad (2.5)$$

При сравнении касательных напряжений $uv^+(y^+)$ с данными DNS следует представить разрешенную и моделируемую части напряжений, а также полные касательные напряжения. На графике осредненной скорости следует также показать результаты расчетов по RANS подходу и теоретические корреляции для вязкого подслоя и «логарифмической» области пристеночного турбулентного течения.

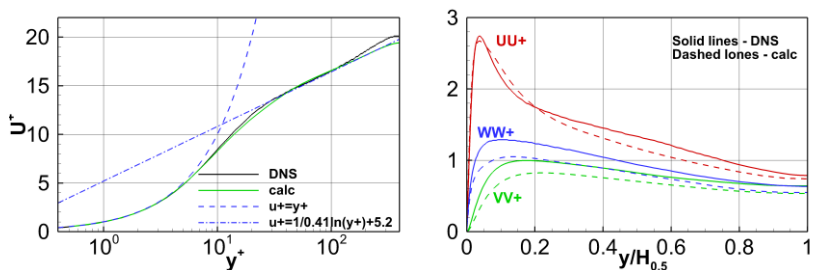


Рис. 17. Профили скорости и нормальных турбулентных напряжений.

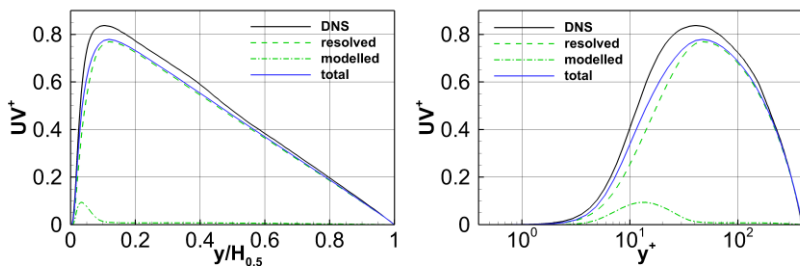


Рис. 18. Профили касательных турбулентных напряжений в линейном (слева) и логарифмическом (справа) масштабах.

3 Этапы решения задач

Решение каждой из представленных выше задач включает несколько важных этапов, описанных ниже.

3.1 Создание расчетной области и построение сетки

Создание расчетной области и построение расчетных сеток для решения предлагаемых задач можно выполнять в различных программных пакетах, таких как Ansys Workbench Meshing, Fluent Meshing Mode, Ansys Gambit или Ansys ICEM CFD (описание работы с ними не входит в цели данного методического пособия). При этом технология построения сеток для вихререзающих расчетов ничем не отличается от соответствующей технологии построения сеток для решения уравнений Навье-Стокса (исходных или осредненных по Рейнольдсу).

После построения сетки в одном из перечисленных пакетов она должна быть импортирована в ANSYS FLUENT через меню команд *File* → *Read* → *Mesh...* и выбора соответствующего файла с расширением **.msh*.

После импорта сетки появляется возможность переопределить граничные условия на границах расчетной области. В большинстве случаев в этом нет необходимости (тип граничных условий устанавливается при построении сетки), однако иногда этого не удается избежать, в том числе и в случае рассматриваемых в пособии задач. Например, некоторые пакеты для построения сеток не позволяют устанавливать периодические граничные условия в двух разных направлениях (такие условия необходимы при решении задачи об установившемся течении в канале), поэтому это приходится делать это уже в программе ANSYS FLUENT (solution mode).

Если необходимо задать условия периодичности на границах `bndnum1` и `bndnum2`, то, в первую очередь, следует убедиться, что сетки на этих границах одинаковы. После этого в текстовом интерфейсе нужно ввести команду:

```
/mesh/modify-zone/make-periodic bndnum1 bndnum2 n u y
```

В результате вместо двух границ `bndnum1` и `bndnum2` останется только `bndnum1` (т.е. первая граница в приведенной выше команде).

При решении задачи о течении в канале необходимо также задать градиент давления. Для этого нужно нажать кнопку *Periodic Conditions* в меню *Boundary conditions*. В окне *Periodic Conditions* необходимо ввести компоненты вектора направления потока (*Flow Direction*), а также значение градиента давления в Па/м (Рис. 19).

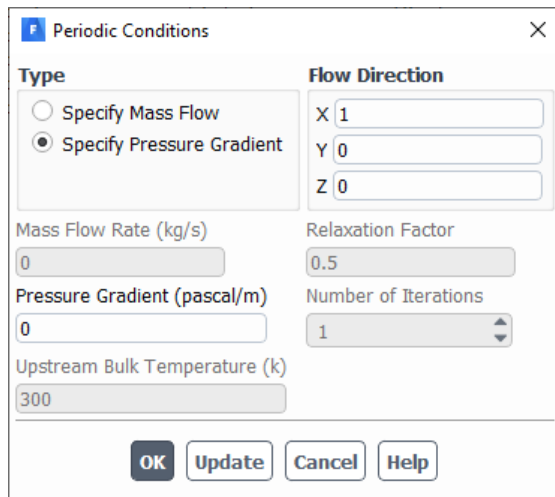


Рис. 19. Окно задания параметров для периодических граничных условий.

3.2 Получение начального приближения

Для того, чтобы сократить вычислительные затраты на проведение вихреразрешающего расчета, в качестве начальных условий рекомендуется использовать «хорошее» (максимально близкое к решению задачи) начальное приближение. Это приближение можно получить различными способами. Один из них заключается в следующем.

Сначала необходимо получить решение уравнений Рейнольдса⁵ (поскольку предполагается, что студенты, выполняющие эти работы, ознакомлены с основами моделирования турбулентных течений с применением RANS моделей турбулентности в пакете ANSYS FLUENT, опустим подробное описание этого этапа работ).

Далее, если уравнения Рейнольдса были решены в квазитрехмерной постановке (на такой же сетке в плоскости XY, но с использованием одной ячейки в направлении z), то полученное решение необходимо интерполировать на трехмерную расчетную сетку. Для того, чтобы сохранить RANS решение для последующей его интерполяции, следует в меню *File*→*Interpolate...* выбрать опцию *write data*, необходимые переменные и зону расчетной области (Рис. 20). Прочитать и интерполировать это решение на основную расчетную сетку можно с использованием того же меню.

⁵ В тех случаях, когда не удастся получить стационарное решение уравнений Рейнольдса, для построения начального приближения можно использовать не сошедшееся решение.

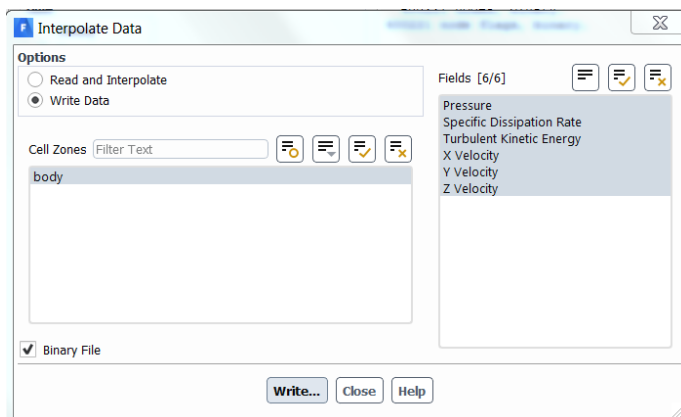


Рис. 20. Окно вывода полей в файл для их последующего чтения и интерполяции решения.

При решении задачи об обтекании цилиндра турбулентные возмущения автоматически появятся в отрывной зоне в ходе расчета вследствие неустойчивости слоев смешения, возникающих при отрыве пограничного слоя от поверхности цилиндра. Поэтому в данном случае нет необходимости добавлять искусственные пульсации к полученному из RANS полю скорости. Однако для задачи о течении в канале такого рода неустойчивость отсутствует, что приводит к необходимости наложения на имеющееся поле скорости искусственных турбулентных пульсаций для получения начального приближения. Для этого в текстовом интерфейсе нужно ввести команду:

`/solve/initialize/init-turb-vel-fluctuations` (для версий FLUENT начиная с 2020R1)

или

`/solve/initialize/init-instantaneous-vel` (для более ранних версий).

Следует иметь в виду, что опция наложения искусственных пульсаций доступна только на этапе RANS моделирования, т.е.

когда в меню *viscous* выбрана одна из моделей турбулентности RANS. После наложения турбулентных пульсаций следует удостовериться в том, что полученное поле отличается от первоначального стационарного поля (Рис. 21).

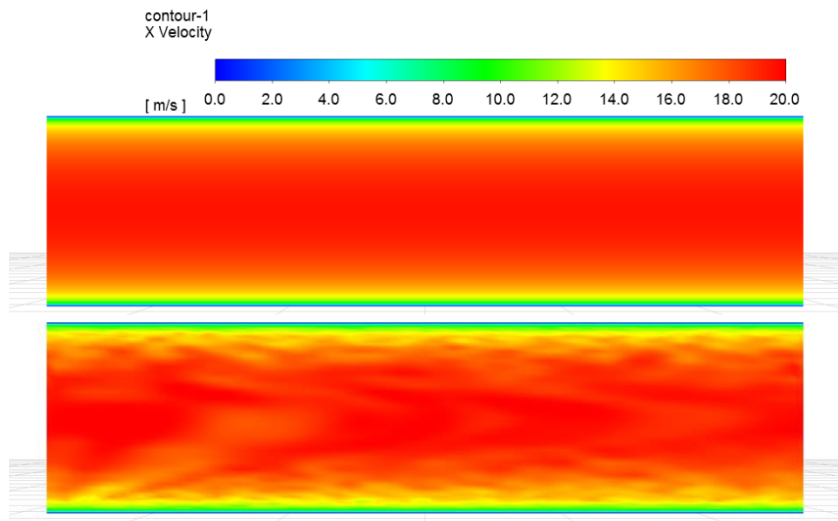


Рис. 21. Поле продольной составляющей скорости, полученное с использованием модели SST, до наложения пульсаций (сверху) и после (справа).

При применении вихреразрешающих подходов, использующих дифференциальные подсеточные модели (например, SST DES или SST IDDES), необходимо также проинициализировать поля кинетической энергии турбулентности k и удельной диссипации ω . Использование в качестве начального приближения полей k и ω из решения RANS приведет к тому, что турбулентные структуры будут диссипировать из-за высокой турбулентной вязкости (в ряде случаев это может привести к их полному подавлению и получению стационарного решения). Поэтому необходимо, чтобы средняя величина k (и,

соответственно, турбулентной вязкости) была существенно ниже, чем в решении RANS.

Эту задачу можно решить, используя в качестве начального приближения результаты короткого (несколько шагов по времени) предварительного расчета с алгебраической подсеточной моделью. Альтернативный подход состоит в «ручной» инициализации кинетической энергии турбулентности заведомо низкой величиной. Для этого в меню *Solution*→*Initialization*→*Patch* (Рис. 22) необходимо выбрать инициализируемую переменную и ее величину.

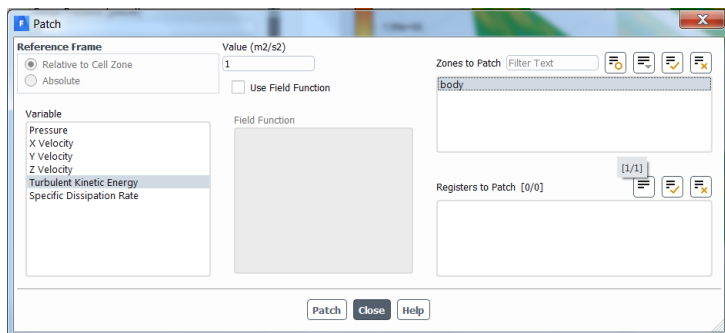


Рис. 22. Окно локальной инициализации отдельных переменных.

3.3 Расчет нестационарной задачи с использованием вихреразрешающего подхода

При решении задачи вихреразрешающими методами необходимо использовать «нестационарную ветвь» ANSYS-FLUENT. Следует особо отметить, что точность расчета, обеспечиваемая вихреразрешающими подходами, сильно зависит от используемого численного метода, поэтому неправильный выбор численной схемы может привести к большим погрешностям в полученном решении.

Вычислительная схема и контроль сходимости

Рекомендуется использовать следующие настройки вычислительного алгоритма.

- Для интерполяции скорости на грань ячейки в конвективных слагаемых для задачи об обтекании цилиндра рекомендуется использовать гибридную схему, сочетающую в себе центрально разностную схему второго порядка и противопоточную схему второго порядка (в обозначениях ANSYS-FLUENT – Bounded Central Differencing или **BCD**), а для задачи о течении в канале – центрально разностную схему второго порядка (**CD**).
- Для интерполяции давления на грань рекомендуется использовать взвешенную противопоточную схему (в обозначениях ANSYS-FLUENT – **Standard**).
- Для вычисления градиентов рекомендуется использовать схему, основанную на теореме Гаусса-Грина (в обозначениях ANSYS-FLUENT – Green Gauss Cell Based или **GGCB**).
- Для аппроксимации производных по времени рекомендуется использовать двуслойную схему Эйлера

второго порядка (в обозначениях ANSYS-FLUENT – Second Order Implicit или **SOI**).

- Для продвижения по времени рекомендуется использовать итерационный метод **SIMPLEC**, при этом на каждом шаге по времени необходимо проводить не менее **10 итераций** по псевдо-времени.
- Для обеспечения максимально быстрой сходимости решения на каждом шаге по времени необходимо установить все **релаксационные параметры** равными **1**.

Контроль сходимости решения осуществляется с помощью мониторинга невязок, рекомендуется убедиться, что на каждом шаге по времени невязки падают на 2-3 порядка.

Рекомендуется также отключить автоматический контроль невязок: в окне *Residual Monitors*, доступ к которому можно получить через меню *Outline View: Solution → Monitors → Residual*, либо через панель управления *Solution → Reports → Residuals...* Отключить контроль невязок путем переключения пункта *Convergence Criterion* в положение *None* (Рис. 23).

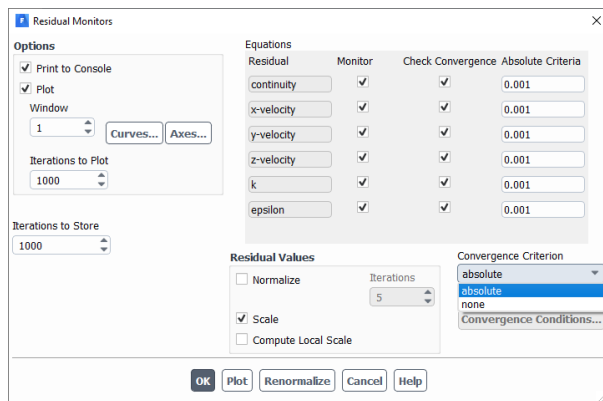


Рис. 23. Окно настройки контроля невязок.

Выход решения на статистически установившийся режим и осреднение решения во времени

Как уже было отмечено выше, нестационарный расчет с использованием вихреразрешающих подходов проводится в два этапа, на первом из которых решение выходит на статистически установившийся режим, а на втором проводится осреднение.

Для контроля процесса установления в задаче о течении в канале удобно контролировать изменение среднего значения трения (τ_w) на стенках канала и значения среднерасходной скорости (U_b) во времени, а в задаче о течении в цилиндре – изменение коэффициентов подъемной силы C_l и силы сопротивления C_d . Для этого рекомендуется использовать инструмент *monitors/report-files* (Рис. 24).

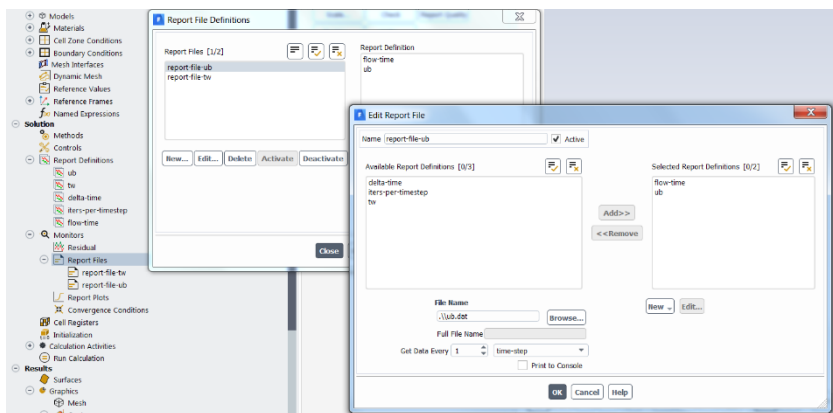


Рис. 24. Окно настройки вывода переменных в процессе расчета.

После того, как значения вышеуказанных величин становится статистически установившимся (среднее значение перестает меняться во времени), можно начинать осреднение по времени. Для этого необходимо переключить пункт *Data sampling*

for time statistics в меню *Run Calculation* в положение *On* (Рис. 25). После начала осреднения рекомендуется продолжать наблюдение за изменением вышеуказанных величин во времени для приобретения большей уверенности в том, что полученное осредненное решение является статистически установившимся.

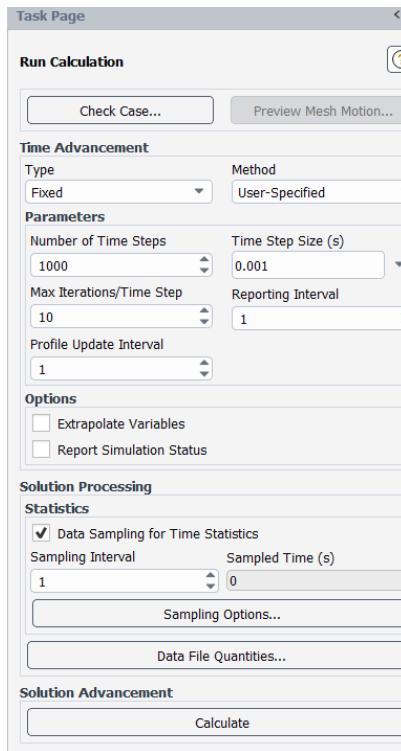


Рис. 25. Окно управления нестационарным процессом решения и осреднением.

Если требуется заново начать осреднение (это бывает необходимо в том случае, когда осреднение начато слишком рано), в текстовый интерфейс нужно ввести следующую команду:

```
/solve/initialize/init-flow-statistics
```

После того, как получено решение для статистически установившегося течения, осредненное на достаточном временном интервале, можно приступить к обработке результатов.

3.4 Обработка результатов

Первичную обработку результатов можно проводить средствами постпроцессора ANSYS FLUENT – пункт *Results* в меню *Outline View*. Для построения графиков и полей для отчета необходимо выгрузить данные в отдельные файлы, а дальнейшую работу и анализ проводить с использованием специализированных программных пакетов для 2D и 3D графики, таких как ANSYS CFDPost, Grapher, Origin, GraphPad Prism, SciDAVis, ParaView, Tecplot и т.д. Экспорт полей рекомендуется производить через окно *Export*, доступ к которому можно получить через пункт меню *File* → *Export* → *Solution Data*.... Здесь нужно выбрать тип файла, выгружаемые поверхности и результаты решения. Затем нажать кнопку *Write*..., ввести имя файла и сохранить его. При построении графиков безразмерных переменных (например, коэффициента трения) следует внимательно проверить используемые для обезразмеривания масштабы. Они доступны к изменению в пункте меню *Outline View: Setup* → *Reference Values* или через панель управления сверху *Results* → *Reports* → *Reference Values*....

Осреднение по пространству

Как правило, временные интервалы, необходимые для получения «гладкого» среднего решения, очень велики. Их можно сократить, проведя дополнительное осреднение по однородному направлению. Для обтекания цилиндра это направление z , а для течения в канале – направления x и z .

Ниже приведен пример скрипта для CFD-POST, позволяющий осреднить давление на стенке цилиндра по направлению z . Чтобы воспользоваться этим скриптом, необходимо в CFD Post выбрать меню *Session*→*Play Session...* и прочесть файл с текстом этого скрипта (расширение *.cse*).

Следует обратить внимание, что в тексте присутствуют названия границ расчетной области (*cylinder*, *zmax*). Их следует заменить на названия соответствующих границ в *.cas* файле, созданном для решаемой задачи.

```
#####
#####

!if(objectExists("Pressure") == 1 )
!{
!   %variables      =      (
!   "p"              =>    "Pressure"
!
!                                     );
POLYLINE:Polyline Inlet
    Boundary List = cylinder
    Line Width = 2
    Location = zmax
    Option = Boundary Intersection
    Visibility = Off
END
EXPORT:
    ANSYS Export Data = Element Heat Flux
    BC Profile Type = Inlet Velocity
    Export Connectivity = Off
    Export File = temp
    Export Geometry = Off
    Export Node Numbers = Off
    Export Null Data = Off
    Export Type = Generic
    Include Header = Off
    Location List = Polyline Inlet
    Overwrite = On
    Precision = 8
    Separator = ", "
    Variable List = X
END
>export
!   open(FI,"<temp");
!   @data1 = <FI>;
!   close(FI);
```

```

!      unlink("temp");
EXPORT:
      ANSYS Export Data = Element Heat Flux
      BC Profile Type = Inlet Velocity
      Export Connectivity = Off
      Export File = temp
      Export Geometry = Off
      Export Node Numbers = Off
      Export Null Data = Off
      Export Type = Generic
      Include Header = Off
      Location List = Polyline Inlet
      Overwrite = On
      Precision = 8
      Separator = ", "
      Variable List = Y

      END
      >export
!      open(FI,"<temp");
!      @data2 = <FI>;
!      close(FI);
!      unlink("temp");
#####
#####
#####
!      open(UCSV, ">p_z_averaged.tec");
!      for($ind = 1; $ind <= @data2-1; $ind++)
!      {
          LINE:LOCATOR
              Apply Instancing Transform = On
              Colour = 1, 1, 0
              Colour Map = Default Colour Map
              Colour Mode = Constant
              Colour Scale = Linear
              Colour Variable = Pressure
              Colour Variable Boundary Values =
Conservative
              Domain List = /DOMAIN GROUP:All Domains
              Instancing Transform = /DEFAULT INSTANCE
TRANSFORM:Default Transform
              Line Samples = 31
              Line Type = Sample
              Line Width = 2
              Max = 0.0
              Min = 0.0
              Option = Two Points
              Point 1 = $data1[$ind] [m], $data2[$ind]
[m], 0 [m]
              Point 2 = $data1[$ind] [m], $data2[$ind]
[m], 2 [m]
          END
!      $pa = ave("p", "LOCATOR");
!      $xii = ave("X", "LOCATOR");

```



```
!           $yii = ave("Y", "LOCATOR");
!           printf(UCSV "%.5E,%.5E,%.5E\n", $xii, $yii,
$pa);
!         }
!         close(UCSV);
!         close(nuCSV);
!       !}
#####
```

Список литературы

1. Гарбарук А. В., Современные подходы к моделированию турбулентности: учеб. пособие / А. В. Гарбарук [и др.]. –СПб. Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 234 с.
2. van Nunen, J.W.G., Pressure and forces on a circular cylinder in a cross flow at high Reynolds numbers. In: Naudascher, E. (ed.), Flow Induced Structural Vibrations. Springer-Verlag, Berlin (1974) pp. 748–754.
3. Roshko, A., Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number. *J. Fluid Mech.* **10**(3) (1961) pp 345–356.
4. [Электронный ресурс]
<http://torroja.dmt.upm.es/channels/data/statistics/>
5. [Электронный ресурс]
https://cfd.spbstu.ru/agarbaruk/lecture/srs_methods/practice/
6. Travin A., Shur M., Strelets M., Spalart P., Detached-Eddy Simulations Past a Circular Cylinder. *Flow, Turbulence and Combustion.* **63** (1999) pp 293–313.

Приложение 1. Экспериментальные и расчетные данные, привлекаемые для сравнения

Таблица 1. Экспериментальное распределение коэффициента давления по поверхности цилиндра из работы [2].

Угол от лобовой точки, Θ	Коэффициент давления, C_p
20°	0.575
40°	-0.5
60°	-1.333
80°	-1.6875
90°	-1.4166
100°	-0.58
120°	-0.5
140°	-0.584
160°	-0.584
180°	-0.584

Таблица 2. Экспериментальное распределение коэффициента давления по поверхности цилиндра из работы [3].

Угол от лобовой точки, Θ	Коэффициент давления, C_p
10°	0.875
15°	0.75
20°	0.58
30°	0.08
40°	-0.495
50°	-1.06
60°	-1.8
70°	-2.0
90°	-1.8
100°	-1.2
105°	-0.83
110°	-0.83
115°	-0.83
120°	-0.83
140°	-0.83
160°	-0.83
180°	-0.83

Таблица 3. Расчетные данные по турбулентному обтеканию цилиндра из работы [6].

Характеристика	Грубая сетка (вариант TS1 из [5])	Измельченная сетка (вариант TS2 из [5])
Коэффициент лобового сопротивления, C_d	0.57	0.59
Число Струхала колебаний дорожки Кармана	0.3	0.31
Угловое положение точки отрыва пограничного слоя (угол отсчитывается от лобовой точки)	99°	99°
Длина зоны рециркуляции за цилиндром	1.1D	1.3D

Приложение 2. Индивидуальные варианты заданий

Обтекание цилиндра с нагретой стенкой

Вариант 1

SA RANS, SA DDES

Вариант 2

SA RANS, SA DES

Вариант 3

SST RANS, SST DDES

Вариант 4

SST RANS, SST DDES

Вариант 5

SA RANS, SAS

Вариант 6

SST RANS, SAS

Вариант 7

SST RANS, SBES (WALE subgrid model)

Вариант 8

SA RANS с поправкой на кривизну линий тока (*curvature correction*), SA DDES с поправкой на кривизну линий тока

Вариант 9

SST RANS, SST IDDES

Вариант 10

SA RANS, SBES (WALE subgrid model)

Вариант 11

SST RANS, SDES

Вариант 12

SST RANS, SBES (Smagorinsky subgrid model)

Установившееся течение в плоскопараллельном канале

Вариант 1

Исследовать влияние числа Рейнольдса ($Re_\tau = 180$ и $Re_\tau = 950$) на решение задачи о течении в канале с использованием SST-IDDES подхода.

Вариант 2

Исследовать влияние схемы аппроксимации конвективных слагаемых (Central Differencing и Bounded Central Differencing) на решение задачи о течении в канале при числе Рейнольдса $Re_\tau = 395$ с использованием SST-IDDES подхода.

Вариант 3

Исследовать влияние схемы аппроксимации конвективных слагаемых (Central Differencing и Upwind) на решение задачи о течении в канале при числе Рейнольдса $Re_\tau = 395$ с использованием WMLES подхода с алгебраической моделью.

Вариант 4

Исследовать влияние числа Рейнольдса ($Re_\tau = 180$ и $Re_\tau = 950$) на решение задачи о течении в канале с использованием SST-DES подхода.

Вариант 5

Исследовать влияние числа Рейнольдса ($Re_\tau = 180$ и $Re_\tau = 950$) на решение задачи о течении в канале с использованием модели WALE.

Вариант 6

Исследовать зависимость результатов решения задачи о течении в канале при числе Рейнольдса $Re_\tau = 395$ от используемого вихререзающего подхода (LES с моделью WALE и SST-IDDES подход).

Вариант 7

Исследовать влияние схемы аппроксимации по времени (схемы первого и второго порядка) на решение задачи о течении в канале при числе Рейнольдса $Re_\tau = 395$ с использованием SST-IDDES подхода.

Вариант 8

Исследовать влияние величины расчетной области в трансверсальном направлении ($L_z = 1.5H$ и $L_z = 0.75H$) на решение задачи о течении в канале при числе Рейнольдса $Re_\tau = 395$ с использованием WMLES подхода с алгебраической моделью.

Вариант 9

Исследовать влияние величины шага по времени ($\Delta t = 0.001c$ и $\Delta t = 0.002c$) на решение задачи о течении в канале при числе Рейнольдса $Re_\tau = 395$ с использованием WMLES подхода с алгебраической моделью.

Вариант 10

Исследовать влияние схемы аппроксимации конвективных слагаемых (Central Differencing и Bounded Central Differencing) на решение задачи о течении в канале при числе Рейнольдса $Re_\tau = 950$ с использованием SST-IDDES подхода.

Вариант 11

Исследовать влияние схемы аппроксимации конвективных слагаемых (Central Differencing и Upwind) на решение задачи о течении в канале при числе Рейнольдса $Re_\tau = 395$ с использованием SST-IDDES подхода.

Вариант 12

Исследовать зависимость результатов решения задачи о течении в канале при числе Рейнольдса $Re_\tau = 950$ от используемого вихреразрешающего подхода (LES с моделью Смагоринского и SST-IDDES подход).

*Гусева Екатерина Константиновна
Гарбарук Андрей Викторович
Смирновский Александр Андреевич*

**МОДЕЛИ
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ
ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ
И ТУРБУЛЕНТНОСТИ**

**РАСЧЕТ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ
С ПРИМЕНЕНИЕМ
ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩИХ ПОДХОДОВ**

Практикум

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т. 2; 95 3005 – учебная литература

Подписано в печать 28.12.2020. Формат 60×84/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 3,25. Тираж 50. Заказ 3547.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного авторами,
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.