

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 вихререзрешающих подходов* : практикум / Е. К. Гусева, А. В. Гарбарук, А. А. Смирновский. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – 49 с.

Практикум посвящен применению вихререзрешающих 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 вихререзрешающих 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 **"Прикладные 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 вихреразрешающих подходов, является необходимым навыком для специалистов в области механики сплошных сред.

Настоящий практикум предназначен для студентов магистратуры СПбПУ по направлению «Прикладные 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 вихреразрешающего подхода может быть проведен на сетках

размером до 500 тысяч ячеек<sup>1</sup>. Индивидуальные варианты различаются числом Рейнольдса, используемым подходом к моделированию турбулентности, численным алгоритмом, размером расчетной области и величиной шага по времени.

<sup>1</sup> 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 жидкости<sup>2</sup>. При этом используются двумерные уравнения Рейнольдса (для задачи об обтекании цилиндра), или

<sup>2</sup> 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

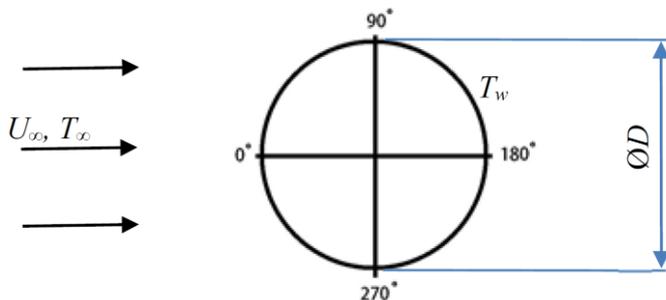
Расчет обтекания цилиндра с нагретой стенкой проводится в трех вариантах:

- решаются двумерные<sup>3</sup> 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  $T_\infty$  (Рис. 1). Данная задача определяется двумя критериями подобия: числом Рейнольдса ( $Re$ ), построенным по скорости набегающего потока  $U_\infty$  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.

<sup>3</sup> 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  $z$ .

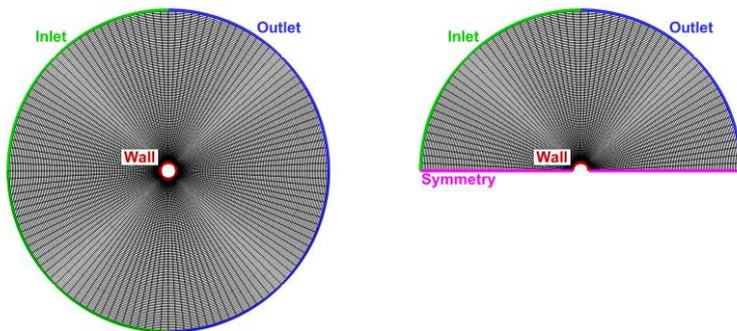


**Рис. 1.** Схема обтекания кругового цилиндра.

### *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 ( $128 \cdot 130 \cdot 30 = 499200$ ).

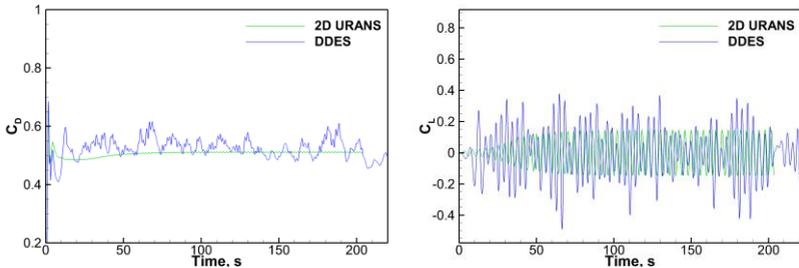
Шаг по времени не должен превышать  $\Delta t = 0.02D/U_\infty$ , поскольку именно такой шаг обеспечивает число Куранта меньше единицы в основной части расчетной области.

### ***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,  $\rho$  – плотность), указать период установления решения, а также моменты начала и окончания интервала осреднения по времени.

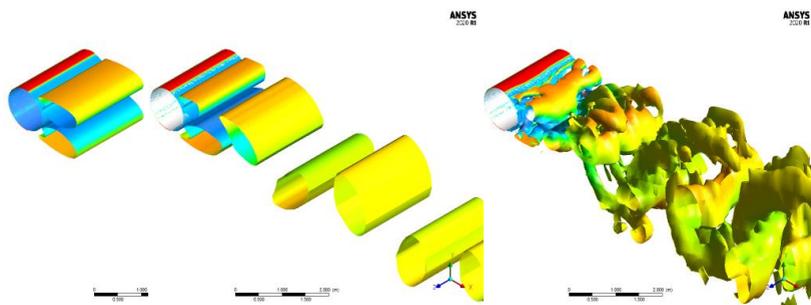


**Рис. 3. Изменение коэффициентов сопротивления и подъёмной силы во времени.**

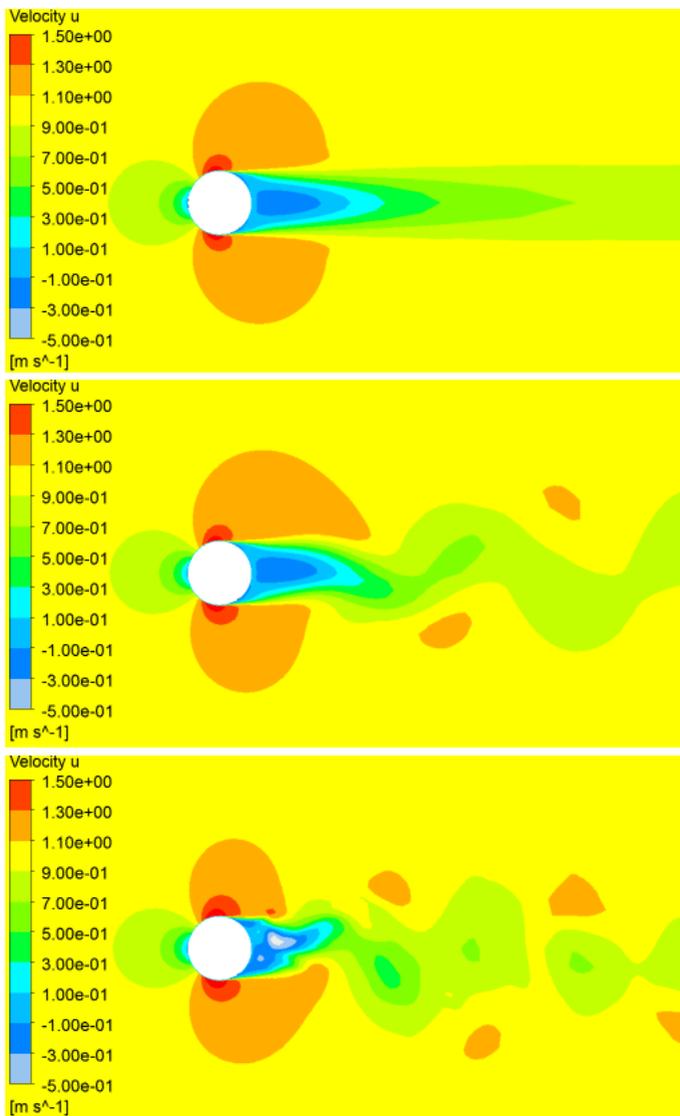
#### **2. Визуализация течения**

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

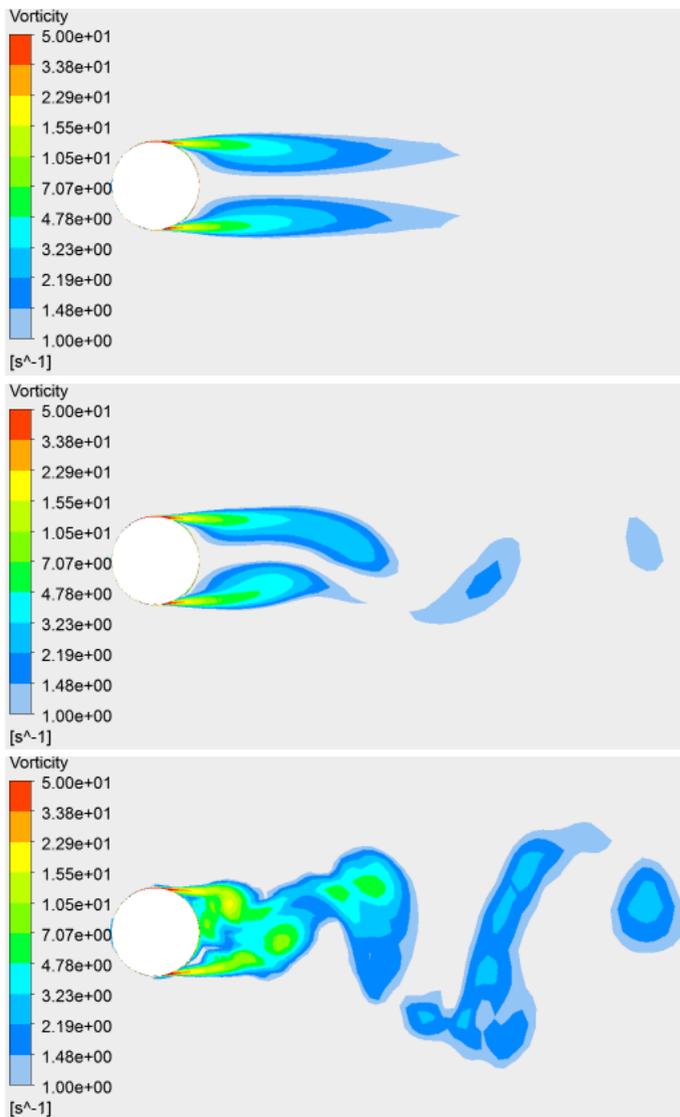
полей скорости, завихренности, турбулентной вязкости в плоскости XY и температуры (Рис. 4 - 8). Следует отметить, что для визуализации результатов двумерных расчетов, приведенных на рис. 4, координата z была масштабирована, а в случае решения стационарной задачи в половине области полученное поле было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



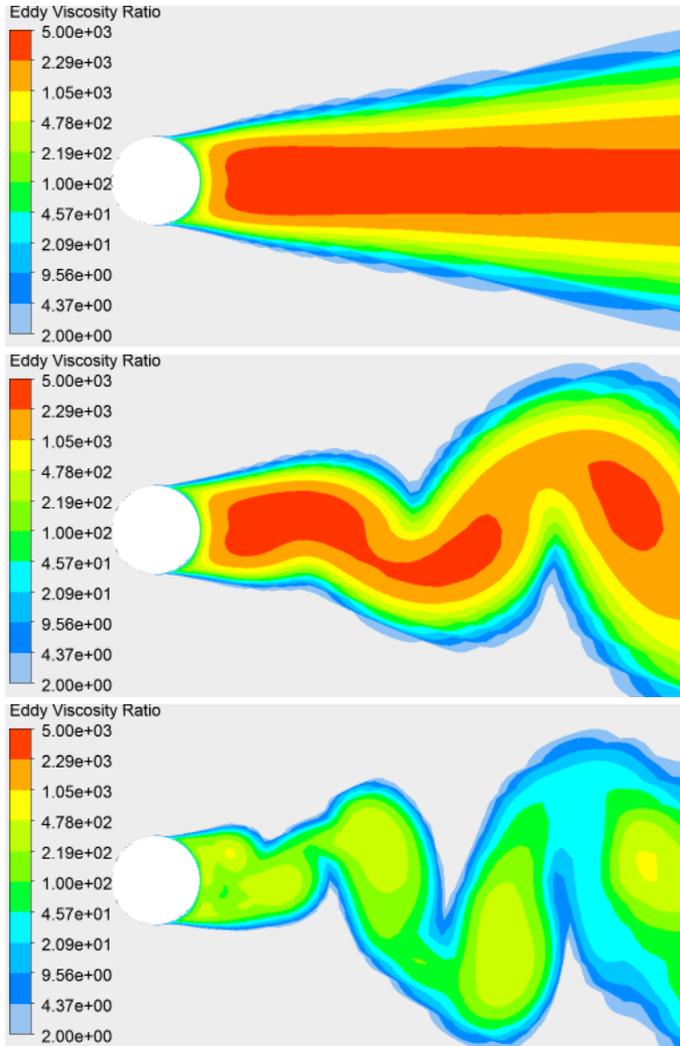
**Рис. 4. Исоповерхность Q-критерия, окрашенная величиной продольной составляющей скорости (цветовая шкала приведена на Рис. 5). Справа налево: результаты расчетов 2D steady RANS, 2D URANS, DDES.**



**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.**

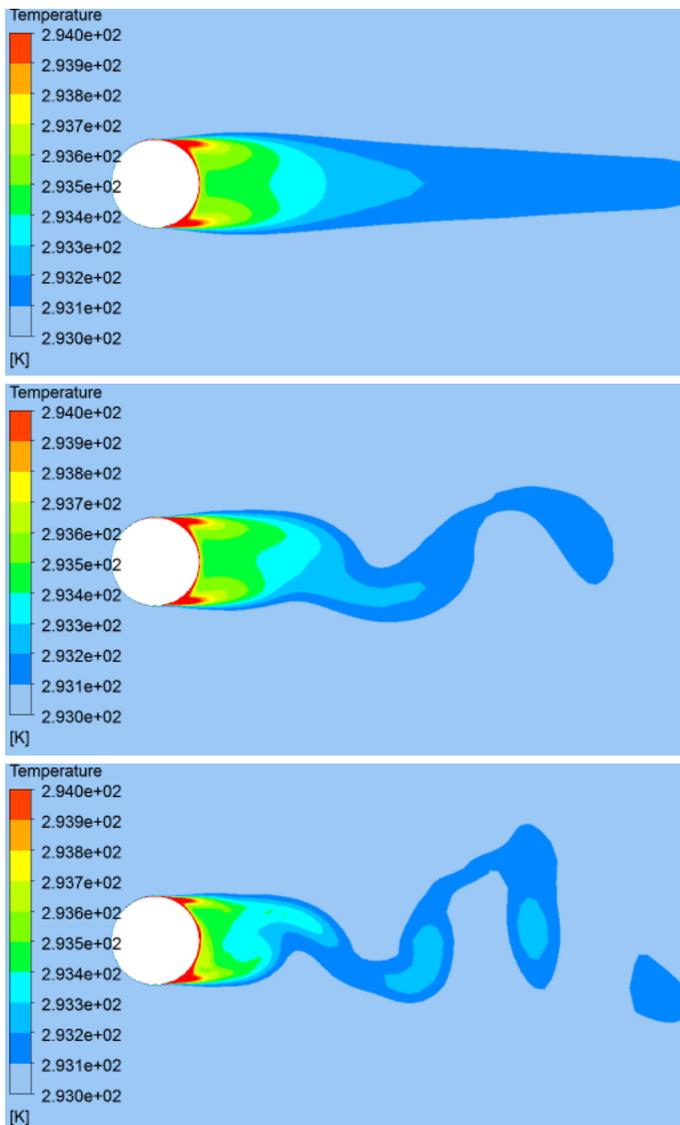
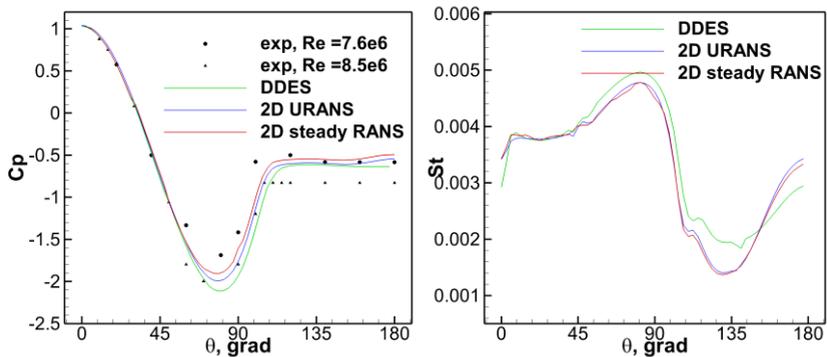


Рис. 8. Мгновенное поле температуры. Сверху вниз: результаты расчетов 2D steady RANS, 2D URANS, DDES.

### 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 вихререзрывающего 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  $Re_\tau = \rho(H/2) \cdot u_\tau / \mu$ , где  $H$  – высота канала,  $u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$  – динамическая скорость,  $\rho$  – плотность,  $\mu$  – 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)<sup>4</sup>. В направлении  $y$  расчетная сетка строится со сгущением к стенке, а ее локальный шаг должен удовлетворять следующим условиям:

<sup>4</sup> 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  $\Delta y_{center}$  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).

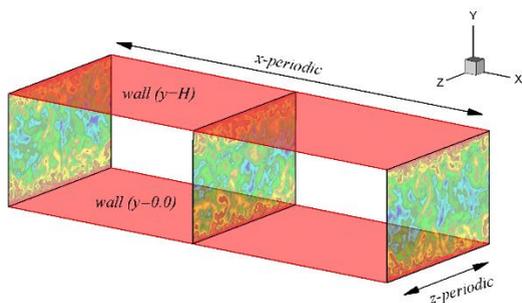


Рис. 10. Расчетная область и граничные условия.

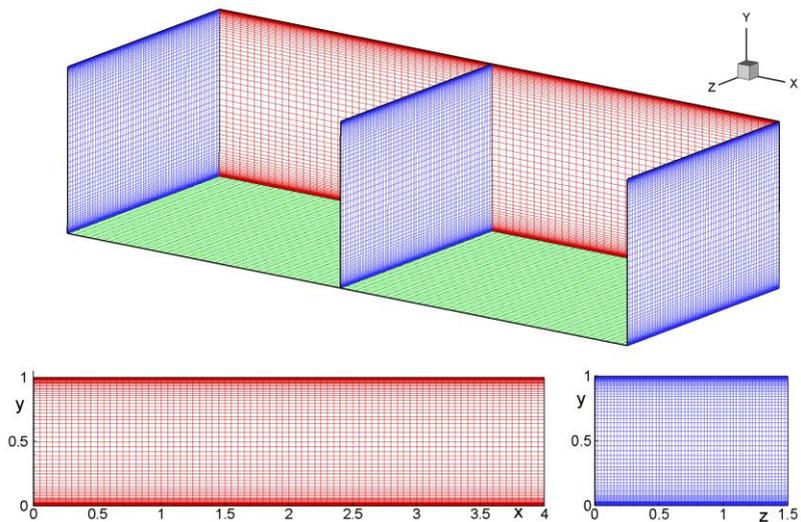


Рис. 11. Пример расчетной сетки.

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  $Re_\tau$ ). 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.

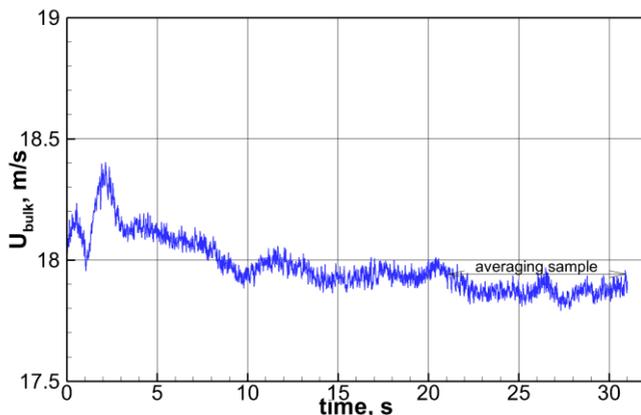


Рис. 12. Изменение среднерасходной скорости во времени.

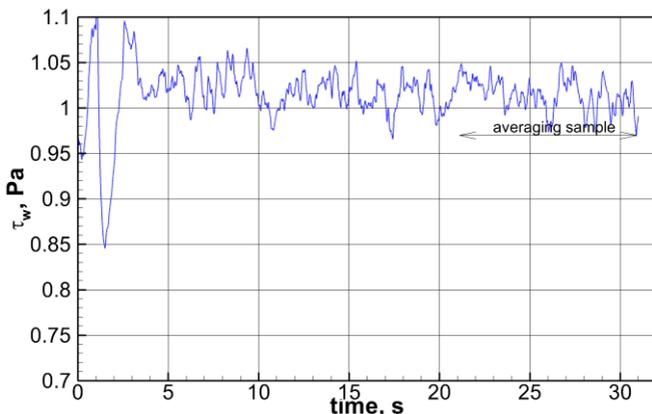


Рис. 13. Изменение среднего трения на стенках канала во времени.

## 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).

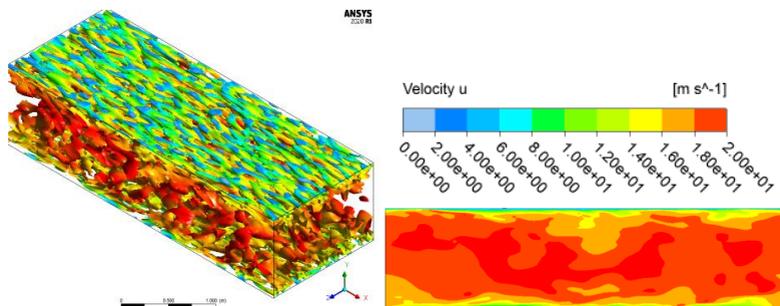


Рис. 14. Изоповерхность Q-критерия, окрашенная величиной продольной скорости (слева), и мгновенное поле продольной компоненты скорости (справа).

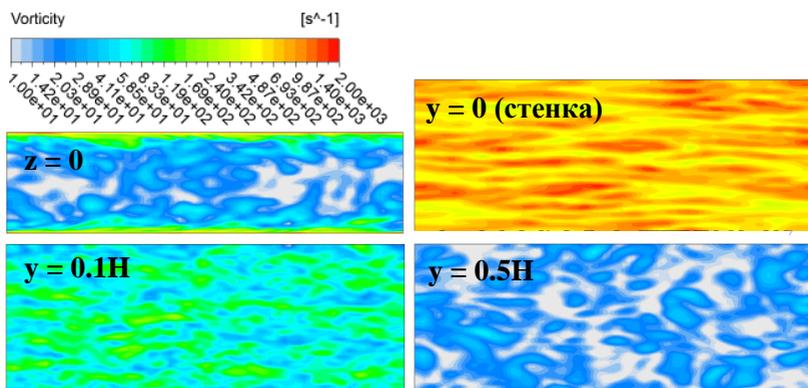
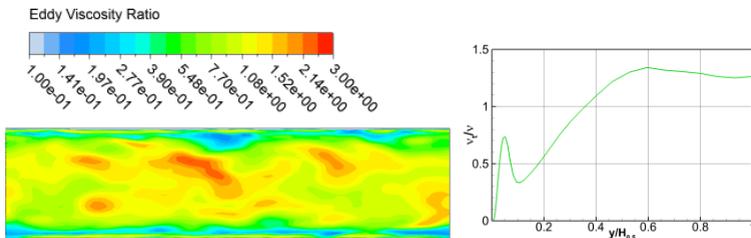


Рис. 15. Мгновенные поля модуля завихренности в нескольких сечениях расчетной области.

### 3. Турбулентная вязкость

Для оценки вклада моделируемых напряжений при расчетах на основе используемого вихререзающего подхода необходимо представить мгновенное поле отношения турбулентной вязкости к молекулярной ( $\nu_t/\nu$ ), а также графики зависимости осредненной (по времени и/или плоскостям XZ ) величины  $\nu_t/\nu$  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,  $u_\tau$  – динамическая скорость, рассчитанная по осредненному по времени и пространству (в двух однородных направлениях) трению на стенке,

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

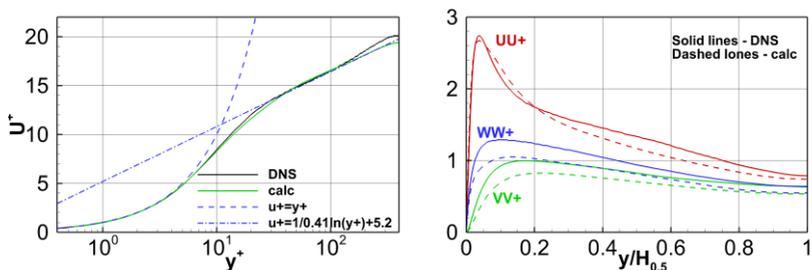
$$uu^+ = \sqrt{\overline{U'U'}} / u_\tau \quad (2.2)$$

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

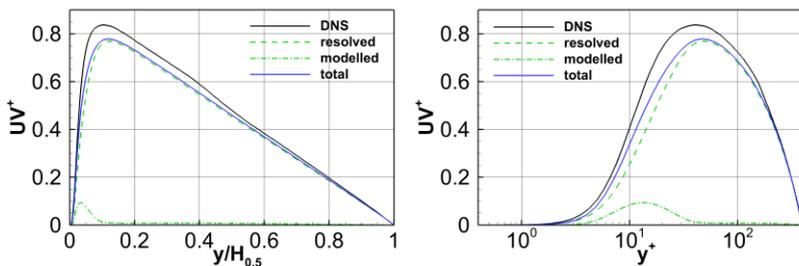
$$ww^+ = \sqrt{\overline{W'W'}} / u_\tau \quad (2.4)$$

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

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 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).

Periodic Conditions	
<b>Type</b>	<b>Flow Direction</b>
<input type="radio"/> Specify Mass Flow	X 1
<input checked="" type="radio"/> Specify Pressure Gradient	Y 0
	Z 0
Mass Flow Rate (kg/s)	Relaxation Factor
0	0.5
Pressure Gradient (pascal/m)	Number of Iterations
0	1
Upstream Bulk Temperature (k)	
300	
OK Update Cancel Help	

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

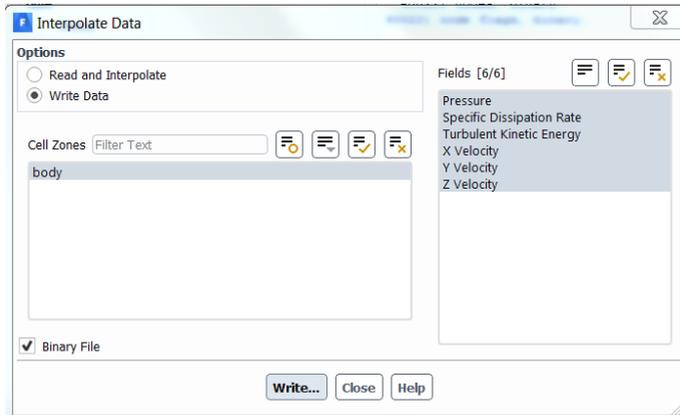
## 3.2 Получение начального приближения

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 Рейнольдса<sup>5</sup> (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.

<sup>5</sup> 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:

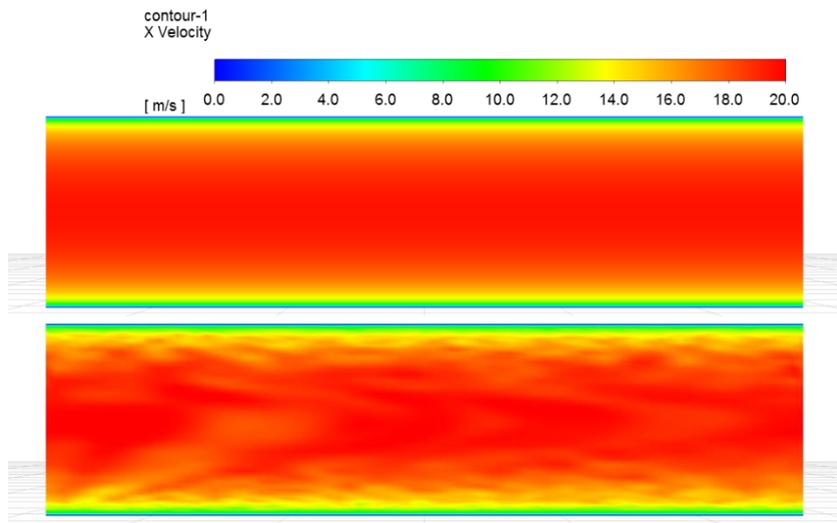
`/solve/initialize/init-turb-vel-fluctuations` (для версий FLUENT начиная с 2020R1)

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).

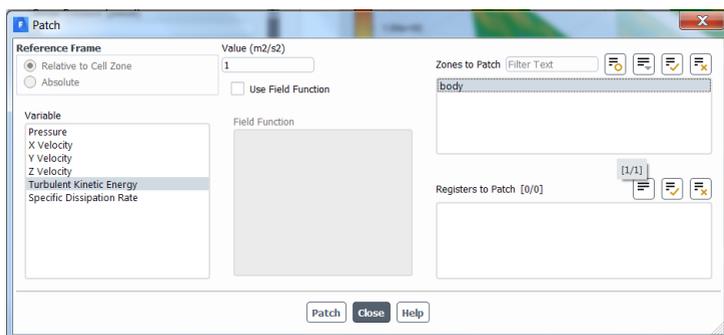


**Рис. 21. Поле продольной составляющей скорости, полученное с использованием модели SST, до наложения пульсаций (сверху) и после (справа).**

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  $\omega$ . Использование в качестве начального приближения полей  $k$  и  $\omega$  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.

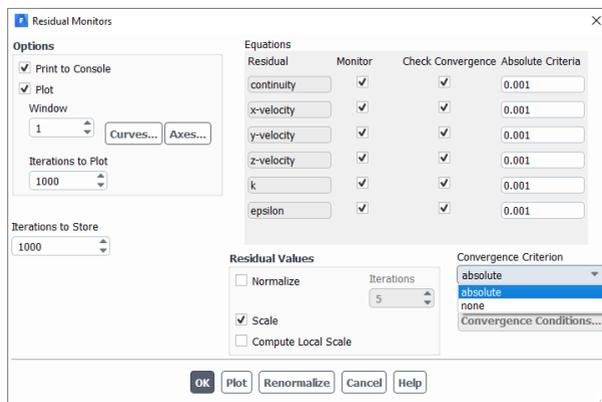
- Для интерполяции скорости на грань ячейки в конвективных слагаемых для задачи об обтекании цилиндра рекомендуется использовать гибридную схему, сочетающую в себе центрально разностную схему второго порядка и противопоточную схему второго порядка (в обозначениях ANSYS-FLUENT – Bounded Central Differencing 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).

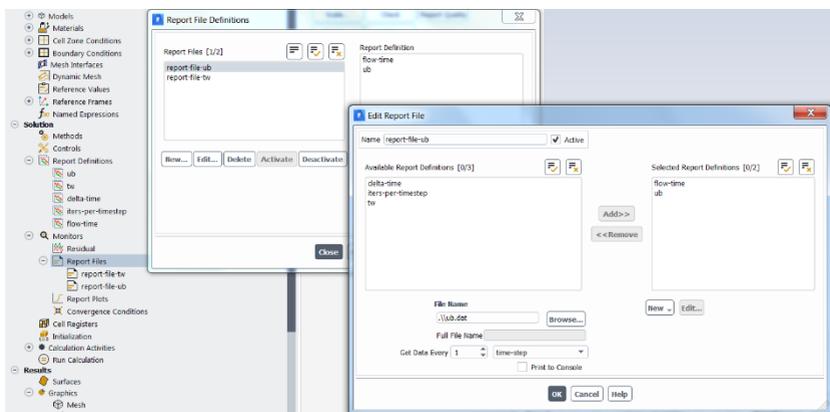


**Рис. 23.** Окно настройки контроля невязок.

## **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.

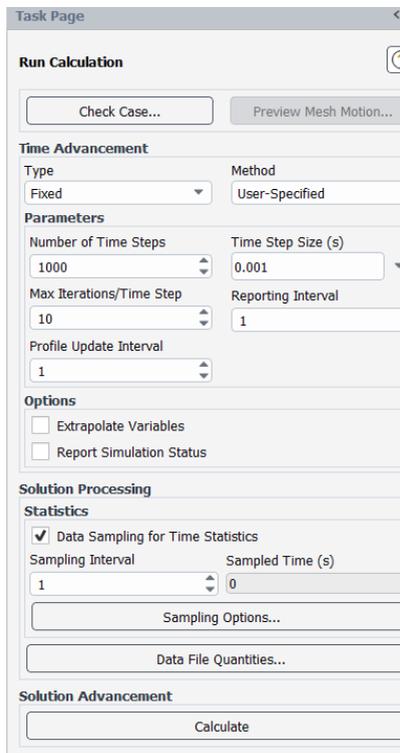
Для контроля процесса установления в задаче о течении в канале удобно контролировать изменение среднего значения трения ( $\tau_w$ ) на стенках канала и значения среднерасходной скорости ( $U_b$ ) во времени, а в задаче о течении в цилиндре – изменение коэффициентов подъемной силы  $C_l$  и силы сопротивления  $C_d$ . 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/](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, $\Theta$	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, $\Theta$	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.