

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра Математического и компьютерного моделирования

ПРИМЕНЕНИЕ OPENFOAM К РАСЧЕТУ ОБТЕКАНИЯ БРУСА

Автореферат бакалаврской работы

студентки 4 курса 413 группы

направление 01.03.02 - Прикладная математика и информатика

механико-математического факультета

Директоренко Марии Евгеньевны

Научный руководитель

зав.каф., д.ф.-м.н.

Ю.А. Блинков

Зав. кафедрой

зав.д.ф. – м. н.

Ю.А. Блинков

Саратов 2017

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее сложной задачей для изучения обтекания является турбулентное течение из-за неустойчивости среды на высоких скоростях течения. В результате неустойчивости среды чрезвычайно осложняется не только практическое исследование, но и построение его теории. Экспериментальные и математические трудности этих исследований до сих пор преодолены лишь частично. Поэтому ряд практически важных задач (течение воды в каналах и реках, движение самолета заданного профиля в воздухе и др.) приходится либо решать приблизительно, либо испытанием соответствующих моделей в специальных гидродинамических трубах. Для перехода от результатов, полученных на модели, к явлению в натуре служит так называемая теория подобия. Число Рейнольдса является одним из основных критериев подобия течения вязкой жидкости.

Использование программного пакета для математического расчета и моделирования OpenFOAM в данной выпускной бакалаврской работе позволило рассмотреть и изучить нетрадиционную задачу гидродинамики вязкой жидкости. В результате предложенный алгоритм расчета позволяет развить новые подходы к изучению гидродинамики вязкой жидкости. На основе предложенного алгоритма решения задачи по обтеканию вязкой несжимаемой жидкостью в плоско-параллельном течении бруса выявлена перспективная возможность использования программного пакета OpenFOAM для дальнейшего упрощения моделирования и расчета обтекания вязкой жидкостью твердых тел как простых форм, так и сложных, таких, как различные типы наземных, водных и воздушных судов, летательных аппаратов или иных гидравлических или аэродинамических характеристик.

Одной из важнейших проблем этого направления является оптимизация расчета обтекания жидкостями и газами твердых тел с постоянно изменяющимися требованиями к параметрам тел и среды с которой они взаимодействуют. Достигнутые успехи в решение традиционных задач не позволяют получать результирующее воздействие жидкости на тело с необходимой точностью, в сжатые сроки и с минимальной стоимостью. Поэтому актуальными задачами перед инженерами становятся задачи по совершенствованию мето-

дов расчета обтекания жидкостями твердых тел различных параметров и их автоматизацией.

В основе OpenFOAM лежит дискретизация системы уравнения движения вязкой жидкости при помощи метода конечных объемов, который позволяет формировать алгебраические соотношения с произвольным количеством ребер. На самом деле, функционал OpenFOAM расширен настолько, что покрывает практически все существующие задачи гидродинамики. Об этом свидетельствует широкий список стандартных решателей, которые покрывают всевозможные физические условия, как то сжимаемая или несжимаемая жидкость, турбулентное или ламинарное движение жидкости или газа и многое другое.

В данной работе исследуется обтекание вязкой несжимаемой жидкостью плоско-параллельного течения прямоугольного бруса. Проводится анализ вопроса, и подробно описываются общие свойства движения вязкой жидкости, движение вязкой жидкости при малых и больших числах Рейнольдса, несжимаемая среда, а также методы их расчета. Приводится назначение и область применения исследуемой области. Среди всех приведенных форм твердого тела, в работе производится выбор того, который наиболее полно отвечал бы условиям задания.

Цель работы состоит в исследовании возможности применения пакета программного обеспечения OpenFOAM к расчету обтекаемости твердого тела внешним плоско-параллельным течением несжимаемой вязкой жидкости. Объектом исследования является обтекание бруса при варьирующихся числах Рейнольдса.

В данной работе будут представлены основные определения и понятия, которые позволят составить и решить задачу. Для решения будут использованы современные методы математического моделирования и численные методы. При помощи объектно-ориентированного программного языка C++ в открытой интегрируемой платформе для численного моделирования задач механики сплошных сред OpenFOAM будет составлен алгоритм расчета и моделирования обтекания бруса, а также представлены промежуточные результаты. По окончании исследования с помощью открытого программного пакета для параллельной интерактивной научной визуализации ParaView будут

представлены конечные иллюстрации, наглядно демонстрирующие результат расчета и моделирования обтекания бруса несжимаемой вязкой жидкостью.

Достоверность полученных результатов следует из анализа алгоритмов и разбора существующих решений задач, связанных с плоско-параллельным течением несжимаемой вязкой жидкости.

Результаты данной работы могут быть использованы как для дальнейших исследований в области гидродинамики несжимаемых жидкостей, так и для практического применения их для проектирования приспособлений исследуемой формы.

В первой главе проведен анализ современного состояния и описание физических свойств при расчете обтекания твердых тел.

Во второй главе рассматривается математическое описание и составляется алгоритм для расчета.

В третьей главе приводится процесс выполнения программного кода и вывод результатов.

Также приведено описание разработанного на их основе программного комплекса.

В приложениях приведены тексты программных модулей.

1 Анализ состояния вопроса и выбор направления исследования

Гидродинамика – это раздел гидромеханики, изучающий движение жидкостей и их воздействие на обтекаемые ими твердые тела. Теоретические методы гидродинамики основаны на решении точных или приближенных уравнений, описывающих физические явления в движущихся жидкостях или газах. В экспериментальной гидродинамике возникающие задачи исследуются непосредственно на моделях, обтекаемых газами или жидкостями, при этом должны соблюдаться условия подобия теории.

Вязкость, или, иными словами, внутреннее трение — это свойство реальных жидкостей оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой. При перемещении одних слоев реальной жидкости относительно других возникают силы внутреннего трения, направленные по касательной к поверхности слоев. Действие этих сил проявляется в том, что со стороны слоя, движущегося быстрее, на слой, движущийся медленнее, действует ускоряющая сила. Со стороны же слоя, движущегося медленнее, на слой, движущийся быстрее, действует тормозящая сила. Идеальная жидкость, т. е. жидкость без трения, является абстракцией. Всем реальным жидкостям и газам в большей или меньшей степени присуща вязкость или внутреннее трение. Вязкость проявляется в том, что возникшее в жидкости или газе движение после прекращения действия причин, его вызвавших, постепенно прекращается.

Также одним из важных параметров при постановке задачи гидродинамики является ламинарное или турбулентное течение. Ламинарное течение жидкости наблюдается при небольших скоростях ее движения. При ламинарном течении траектории всех частиц параллельны и формой своей повторяют границы потока. Турбулентным называется течение, сопровождающееся интенсивным перемешиванием жидкости и пульсациями скоростей и давлений. Движение отдельных частиц беспорядочному движению молекул газа. При турбулентном течении векторы скоростей имеют не только осевые, но и нормальные к оси русла составляющие, поэтому наряду с основным продольным перемещением жидкости вдоль русла происходят поперечные перемещения (перемешивание) и вращательное движение отдельных объемов жидкости.

Этим и объясняются пульсации скоростей и давления. Переход к турбулентности связан с неустойчивостью, а неустойчивость, в свою очередь, – с возникновением и развитием возмущений. Для решения задачи по применению OpenFOAM для расчета обтекания несжимаемой вязкой жидкостью бруса в плоско-параллельном течение возможно исследование обоих случаев.

Невозможность практического использования исходной системы уравнения Навье – Стокса привела к появлению различных подходов к моделированию турбулентных течений, среди которых наиболее известные – решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса. Тем не менее, для изучения турбулентного движения жидкости широко используется метод осреднения не только отдельных кинематических и динамических характеристик движения, но и ряда уравнений.

Скорости потока во времени в данной точке пространства можно положить:

$$u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v', \quad \omega = \bar{\omega} + \omega', \quad (1.1)$$

где u, v, ω - действительные мгновенные скорости потока в данной точке, $\bar{u}, \bar{v}, \bar{\omega}$ - осредненные по времени скорости, а u', v', ω' - отклонения действительных скоростей от осредненных, т.е. пульсационные скорости.

Если предполагать, что в развитом турбулентном движении пульсации (пульсационные скорости) малы по сравнению со средними скоростями потока, и что величины осредненных скоростей зависят от способа осреднения, то

$$\bar{\varphi}(x, y, z; t) = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} \varphi(x, y, z; t) d\tau, \quad (1.2)$$

где T – период осреднения.

Также для каждого рассматриваемого турбулентного движения существует такой достаточно большой по сравнению с периодом турбулентных пульсаций, но малый по сравнению с характерным для осредненного турбулентного движения интервалом времени постоянный период осреднения T , что сглаживание во времени приводит к осредненной величине, при повторном

сглаживании уже не изменяющейся.

$$\bar{\bar{\varphi}} = \bar{\varphi}, \quad (1.3)$$

Если в результате осреднения (1.1), проведенного в данной точке в разные моменты времени t , будут получаться одни и те же значения $\bar{\varphi}$, то такое осредненное движение называется стационарным, а само турбулентное движение – квазистационарным.

Предположение (1.3) эквивалентно утверждению о равенстве нулю средних значений пульсаций величины, равных $\bar{\varphi}'$. В силу линейности операции осреднения (1.1) и равенства (1.2), получается

$$\bar{\varphi}' = \bar{\varphi} - \bar{\bar{\varphi}} = 0, \quad (1.4)$$

По определению осреднения (1.1) следует, что среднее значение производной от некоторой функции по координате равно производной от среднего значения функции по той же координате:

$$\frac{\bar{\partial\varphi}}{\partial x} = \frac{\partial\bar{\varphi}}{\partial x}, \quad (1.5)$$

так как операции дифференцирования по координате и интегрирования по времени независимы. Таким же свойством обладает и производная по времени.

2 Математическое описание и расчет обтекания бруса

В данной выпускной бакалаврской работе для рассмотрения в роли твердого тела будет использоваться прямоугольный брус, на который набегают поток вязкой несжимаемой жидкости плоско-параллельного течения. В рамках заданного класса задачи моделирования обтекания бруса рассмотрим реализацию для четырех различных чисел Рейнольдса.

Список решателей, поставляемых вместе с OpenFOAM, широк и определен под любые нужды. Так, например, есть решатели для несжимаемой и сжимаемой жидкости, для моделирования горения, формирования многофазного потока и тепловой конвекции. В нашем случае мы должны выбрать из списка решателей несжимаемого потока. Определив число Рейнольдса для любого потока и сравнив его с критическим, можно узнать характер движения, который, в свою очередь, определяет зависимость потерь напора от скорости. В природе и технике турбулентное движение наблюдается чаще, чем ламинарное. Области ламинарного движения – движение вязких жидкостей типа масел по трубам и в механизмах, фильтрация вод в тонких порах мелкозернистых грунтов, движение в капиллярах (в том числе и движение крови в организмах). Течение воздуха в атмосфере, воды в морях и реках, в каналах, в трубах всегда турбулентно. Критическое число Рейнольдса, при которых движение из ламинарного переходит в турбулентное, в зависимости от разных условий, равняется от $Re=2320$ до $Re=4000$. Очевидно, что при числах Рейнольдса $Re=100$, $Re=1000$ движение будет ламинарным, поэтому в качестве решателя будет использоваться `icoFoam`, который предназначен для расчет несжимаемого ламинарного потока. При числах Рейнольдса $Re=10000$, $Re=100000$ движение переходит в турбулентное, так что в качестве решателя `icoFoam` не подходит. Для больших чисел Рейнольдса в нашем случае подойдет стандартный решатель `pisoFoam`, предназначенный для несжимаемого турбулентного потока.

Граничные условия:

- На входе (`inlet`) — задается U ($U_x=1\text{м/с}$), k , ω . Нулевой градиент для давления
- На выходе (`outlet`) — задается давление $p=0$, нулевые градиенты для U , k , ω

- На стенках канала (tube-walls) — условие проскальзывания (slip) для всех величин
- На стенках бруса (cube-walls) — условие прилипания для скорости, пристеночные функции для k , ω и ν_{t} , условие непроницаемости для p

Задание ГУ и НУ для полей k , ω и ν_{t} необходимо только при решении турбулентной задачи

Граничные и начальные условия для полей k , ω и ν_{t} необходимо задавать при высоких значениях числа Рейнольдса при турбулентном движении. При задании граничных условий, равно как и начальных, необходимо учесть, что параметры k , ω и ν_{t} необходимы в случае решения турбулентной задачи, то есть в случае больших чисел Рейнольдса.

Параметр k задается по формуле

$$k = \frac{1}{2} \overline{U'U'} \quad (2.1)$$

при этом в декартовых координатах кинетическая энергия турбулентности равна

$$k = \frac{1}{2} (U_x^2 + U_y^2 + U_z^2), \quad (2.2)$$

где U_x , U_y , U_z есть координаты скорости.

Исходя из заданных h (10см по умолчанию) и скорости на входе (1м/с по умолчанию) выбираем такую вязкость, чтобы соответствовала заданному числу Re:

- Re=100, вязкость — $1e-4$ (при $h=10\text{см}$, $U_x=1\text{м/с}$)
- Re=1000, вязкость — $1e-5$ (при $h=10\text{см}$, $U_x=1\text{м/с}$)
- Re=10000, вязкость — $1e-6$ (при $h=10\text{см}$, $U_x=1\text{м/с}$)
- Re=100000, вязкость — $1e-7$ (при $h=10\text{см}$, $U_x=1\text{м/с}$)

Для первых двух случаев можно не использовать моделирование турбулентности, для третьего и четвертого обязательно. Модель турбулентности - kOmegaSST.

Для числа Рейнольдса Re=100 результат представлен в соответствии с рисунком 2.1. Для числа Рейнольдса Re=1000 результат представлен в соответствии с рисунком 2.2.

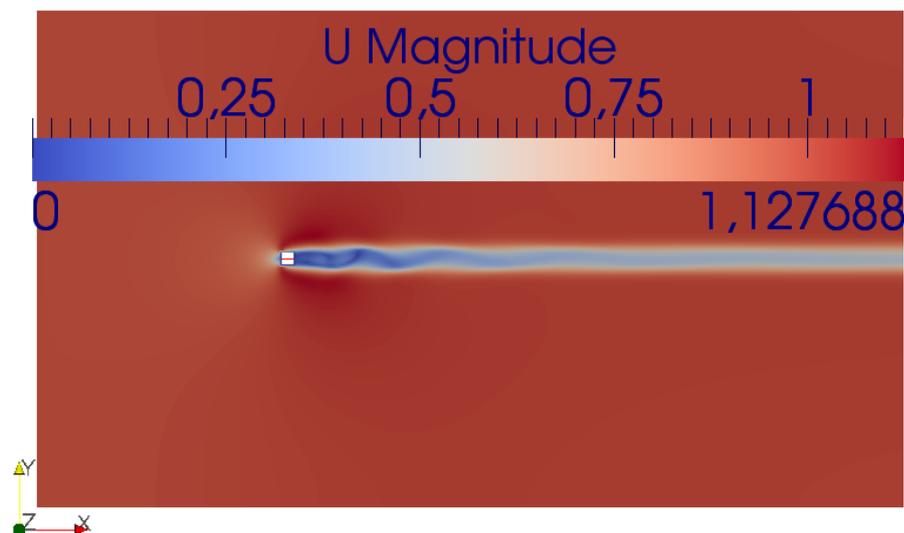


Рисунок 2.1 — Вариант 1

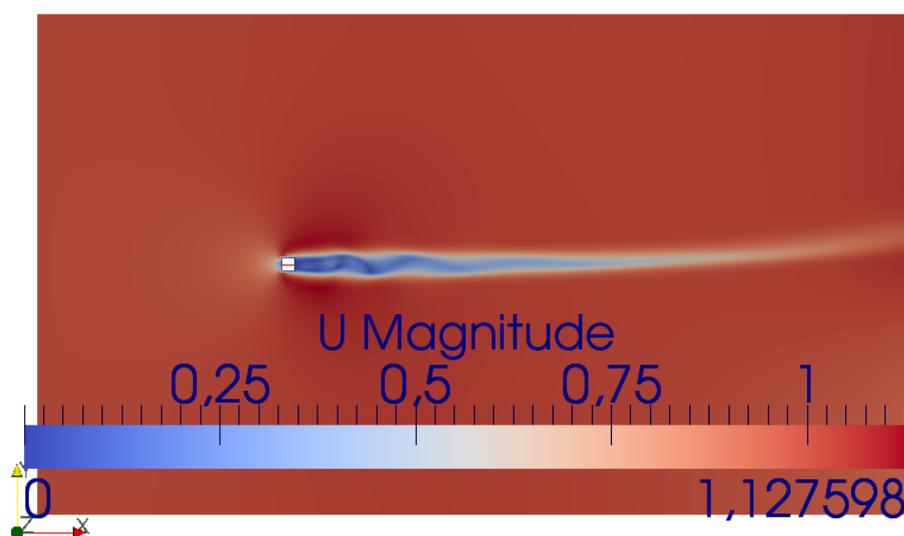


Рисунок 2.2 — Вариант 2

При значении числа Рейнольдса $Re=2320$ и более движение из ламинарного становится переходным, и при возрастании числа Рейнольдса становится турбулентным. Рассмотрим моделирование турбулентности для полученных значений вязкости. Для моделирования турбулентности будем использовать k - ω Shear Stress Transport (SST). Коэффициенты релаксации: $rU=0.5$, $r\mu=0.3m$, $r_k=0.7$, $r_{\omega}=0.7$.

Для числа Рейнольдса $Re=1000$ результат представлен в соответствии с рисунком 2.3. Для числа Рейнольдса $Re=10000$ результат представлен в соответствии с рисунком 2.4.

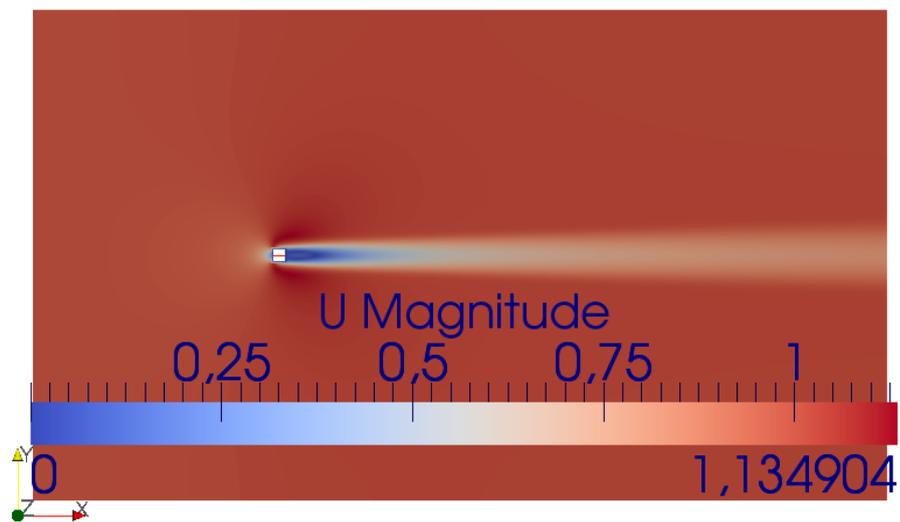


Рисунок 2.3 — ОБТЕКАНИЕ БРУСА — Вариант 3

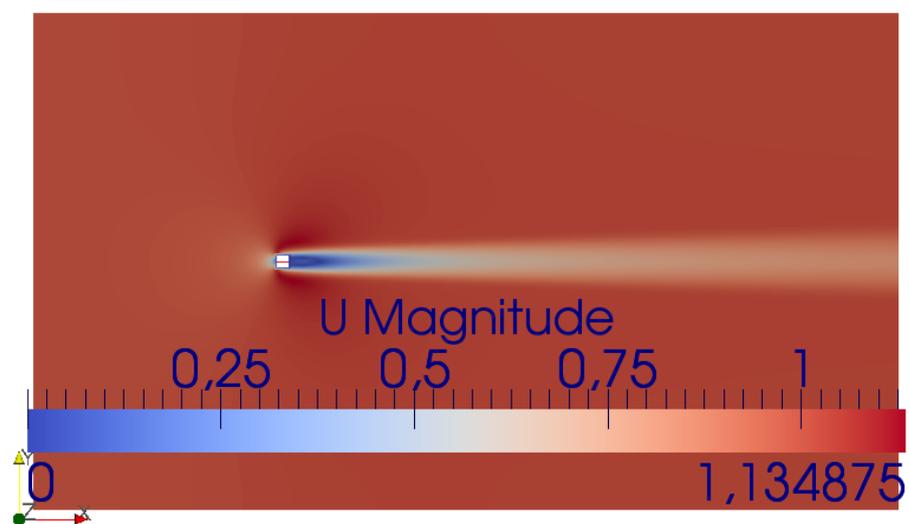


Рисунок 2.4 — ОБТЕКАНИЕ БРУСА — Вариант 4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выпускная бакалаврская работа направлена на расширение и упрощение возможностей расчета и моделирования обтекания вязкими несжимаемыми жидкостями твердых тел с помощью современного программного продукта OpenFOAM, SALOME и ParaView в составе пакета для численного моделирования.

В ходе проделанной работы проведен анализ и собрана информация по данной проблеме, выбрана необходимая методика и по ней составлена математическая модель исследуемого обтекания твердого тела, который удовлетворяет требованиям технического задания.

По разработанному алгоритму составлена программа расчета, которая исследует результирующее воздействие вязкой несжимаемой жидкости плоскопараллельного течения набегающей жидкости на твердое тело в форме бруса.

Методика анализа обтекания вязкой несжимаемой жидкостью в плоскопараллельном течении бруса имеет достаточную для практических целей точность и возможность быстрого проектирования.