

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра Математического и компьютерного моделирования

Моделирование свободной поверхности средствами OpenFOAM

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 411 группы

направление 01.03.02 — Прикладная математика и информатика

механико-математического факультета

Белова Александра Павловича

Научный руководитель
доцент, к.т.н., доцент

И.А. Панкратов

Зав. кафедрой
зав. каф., д.ф.-м.н., доцент

Ю.А. Блинков

Саратов 2022

Введение. Зарождение математического моделирования в период 20 века стало великим открытием, которым владеют люди. Современное понимание всей сущности математического моделирования стало формироваться с конца 19 века. Его становлению огромное значение придали работы Р. Фреше (1878 - 1973) и Д. Гильберта (1862 - 1943), которые внесли новое трактование близости в математике (т.е. метрическое и гильбертово пространства). В результате, были сформированы новые методы в вычислительной математике и в основу современного математического моделирования были заложены необходимые теоретические основы. Затем, в становлении математического моделирования основополагающую роль сыграли новые концепции в формулировке задач математической физики в виде интегральных тождеств, а также восходящий к Р. Куранту (1888 - 1972) подход конечных элементов, который стал фундаментом для разработки вариационных и проекционных разностных методов решения задач математической физики. Значительную роль в создании передовой идеи математического моделирования сыграли российские ученые А. А. Самарский (1919 - 2008), О.М. Белоцерковский (1925 - 2015). Важно отметить, что математическое моделирование внесло огромный вклад для достижений цивилизации, равно также, как и революция в физике в 19 - 20 века.

Актуальность работы. Моделирование физических процессов в настоящее время является актуальным, так как в научной деятельности часто возникают такие ситуации, когда объект доступен, но его использование может быть дорогостоящим или может привести к серьезным катастрофам. Задачей исследователя, в данном случае, является создание модели исходного объекта, чтобы предугадать характер и поведение используемого объекта. Математическое моделирование является неотъемлемой частью научно-технического прогресса, оно позволяет предугадывать поведение ландшафтов, рек, сооружений, магнитных волн и множество других вещей.

Цель работы. Цель данной работы: изучить основы механики жидкости и газа, изучить понятие математического моделирования, рассмотреть программное обеспечение, производящее расчёты для математического моделирования, математически смоделировать физический процесс и увидеть изме-

нение поведения физического процесса в зависимости от изменения параметров математической модели.

Практическая значимость работы. Рассмотренный пример данной работы имеет прикладной характер, его можно использовать в изучении поведения потоков жидкости в условиях разных температур и давлений.

Структура бакалаврской работы. Бакалаврская работа состоит из четырёх глав, заключения и списка литературы.

Во введении ставятся цели для рассмотрения моделирования физического процесса в программном пакете OpenFOAM.

Первая глава посвящена основам механики жидкости и газа.

Во второй главе описаны наиболее часто используемые пакеты для численного решения задач механики жидкости и газа.

В третьей главе содержатся теоретические основы для описания физического процесса, который далее будет смоделирован.

В четвёртой главе описана установка OpenFOAM и нюансы работы с этим программным пакетом, а также создание и приведение в действие примера физического процесса со свободной поверхностью.

Основное содержание работы. В первой главе работы описаны основы механики жидкости и газа, а именно предмет и задачи данной научной области.

Само понятие «механика жидкости и газа» включает в себя такие понятия, как гидромеханика, газовая динамика. В свою очередь, гидромеханика объединяет такие понятия, как гидравлика, аэродинамика.

Гидравлика - наука о законах движения капельных жидкостей (так называемая внутренняя задача - движение жидкостей в ограниченных областях, например, в трубах, каналах и так далее).

Аэродинамика - наука о законах движения газов (так называемая внешняя задача - обтекание газовым потоком твердых тел).

Газовая динамика - наука о законах движения газов с большими скоростями

Задачей механики жидкости и газа является построение и исследование математических моделей для описания параметров потоков движущихся сред в широком диапазоне условий, проведение экспериментальных исследований

течений и их взаимодействия с телами и интерпретация экспериментальных данных с целью прогнозирования и контроля природных явлений и технологических процессов.

Математическое описание задач усложнилось настолько, что стало невозможным решать их традиционными аналитическими методами.

Создание быстродействующих электронных вычислительных машин, бурное развитие методов вычислений, прямой численный расчёт сложных математических задач ознаменовали собой новый этап в применении математических методов к решению задач науки и техники.

Программные пакеты часто используются для численного решения задач механики жидкости и газа и моделирования других физических процессов.

В данной работе рассматривается такой программный пакет как OpenFOAM. Он удобнее остальных тем, что это программное обеспечение удобно использовать при настройке алгоритмов и методов в вычислениях, а также задании значений величин.

В вышеописанном программном обеспечении был рассмотрен несжимаемый поток вещества со свободной поверхностью, вокруг которого описаны граничные условия.

Свободная поверхность - поверхность жидкости, не ограниченная стенками сосуда или русла.

Несжимаемая жидкость - математическая модель сплошной среды, плотность которой сохраняется при изменении давления.

PIMPLE-алгоритм был использован в OpenFOAM для моделирования движения несжимаемого потока. Данный алгоритм является совмещением PISO-алгоритма и SIMPLE-алгоритма.

PISO-алгоритм - расширение SIMPLE-алгоритма, используется в вычислительной гидродинамике для решения системы уравнений Навье-Стокса. В случае несжимаемой жидкости система состоит из трёх уравнений:

- Уравнение движения:

$$\operatorname{div} \sigma + \bar{F} = \rho \frac{dv}{dt}$$

- Уравнение неразрывности:

$$\frac{dp}{dt} + \bar{v} = 0$$

- Уравнение несжимаемости:

$$\nabla \bar{v} = 0$$

Векторный вид уравнений Навье-Стокса для жидкости:

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -(\bar{v} \nabla) \bar{v} + \nu \Delta \bar{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \bar{f}$$

∇ - оператор Набла, Δ - векторный оператор Лапласа, t - время, ν - коэффициент кинематической вязкости, ρ - плотность, p - давление, $\bar{v} = (v^1, \dots, v^n)$ - векторное поле скорости, \bar{f} - векторное поле массовых сил.

Уравнение Рейнольдса используется для описания турбулентных течений, которые присутствуют в рассматриваемом выше физическом процессе.

Уравнения Рейнольдса описывают осредненное по времени течение жидкости, их особенность (по сравнению с уравнениями Навье-Стокса) заключается в том, что в них появились новые неизвестные функции.

Архитектура программной платформы OpenFOAM представляет с собой набор библиотек, предоставляющих инструменты для решения систем дифференциальных уравнений в частных производных как в пространстве, так и во времени.

Условно код OpenFOAM можно разделить на следующие части (как и любую другую сложную программу):

1. ядро (core) - набор файлов, определяющих основные функциональные возможности кода;
2. библиотеки (solvers) - содержат множество моделей механики сплошных сред;
3. исполняемые файлы (utilities) - утилиты для решения задач механики сплошных сред, подготовки и обработки данных.

Общая схема решения состоит из подготовки исходных данных с помощью препроцессора, процесса решения, а также обработки визуализации результатов вычислений с помощью постпроцессора.

Решение любой задачи в данном прикладном программном пакете начинается с описания геометрии расчетной области, построения сетки в ней и задания граничных условий, что является основными задачами препроцессора. Препроцессорами являются приложения blockMesh и snappyHexMesh, которые входят в состав OpenFOAM.

Утилита blockMesh наиболее подходит в случае областей простейшей формы. Она позволяет строить структурированные сетки, состоящие из гекса-

эдров. Принцип работы blockMesh заключается в делении всей расчетной области на трехмерные гексаэдральные блоки. Ребрами этих блоков могут быть отрезки прямых или дуг. Сетка получается вследствие разбиения каждого блока на определенное число ячеек в каждом направлении. Вся необходимая информация о построении сетки указывается в текстовом файле blockMeshDict.

Задачей решателя является подготовка системы линейных алгебраических уравнений, аппроксимирующих исходную математическую модель, и нахождение ее решения. OpenFOAM содержит большое количество решателей, которые разделены на группы, соответствующие группам решаемых задач.

Постпроцессором является программа ParaView. Эта программа является основным средством визуализации результатов в пакете OpenFOAM. ParaView обладает большими возможностями для визуализации, т.е. позволяет визуализировать скалярные и векторные поля, линии тока, изоповерхности, получать информацию о нужном поле в точке или вдоль некоторой линии.

Установка OpenFOAM представляет с собой последовательность команд, введённых в командную строку одной из операционных систем Linux.

OpenFOAM и ParaView могут быть легко установлены с помощью менеджера пакетов Linux apt. Пользователю придётся предоставить пароль администратора (superuser), так как установку следует проводить используя команду sudo:

1. копировать и вставить в командную строку следующее (так происходит добавление ресурса dl.openfoam.org в список репозиториев ПО, в которых apt производит поиск пакетов, и добавление ключа для репозитория для проверки сигнатур пакетов):

```
sudo sh -c "wget -O - https://dl.openfoam.org/gpg.key | apt-key add -"  
sudo add-apt-repository http://dl.openfoam.org/ubuntu
```

2. обновить список пакетов apt для загрузки из нового репозитория:

```
sudo apt-get update
```

3. установить OpenFOAM (в данном случае 8 версию), вместе с этим установится и ParaView:

```
sudo apt-get -y install openfoam8
```

4. для использования установленного OpenFOAM необходимо открыть файл `.bashrc` в папке `home` в редакторе:

```
gedit /.bashrc
```

5. в конце этого файла необходимо добавить следующую строку и сохранить файл:

```
source /opt/openfoam8/etc/bashrc
```

6. открыть новую командную строку и проверить работу `simpleFoam` приложения, выполнив:

```
simpleFoam -help
```

должна появиться информация, относящаяся к работе с программой OpenFOAM.

Создание примера несжимаемого потока со свободной поверхностью в OpenFOAM. В работе с OpenFOAM рассматривается прежде всего вычислительная область, в которой и происходят моделируемые процессы. В ней рассматриваются разного вида данные, структуру которых составляют:

- вершины;
- ребра (соединяют вершины);
- грани (замкнутый многоугольник из рёбер);
- ячейки (объёмы, ограниченные гранями).

Создание проекта OpenFOAM подчинено иерархии: каждая расчетная задача (`case`, случай) в OpenFOAM представлена папкой с характерным названием и набором каталогов, содержащих управляющие файлы, контролирующие ту или иную область исходных данных. Всего можно выделить три типа управляющих файлов (и соответственно, каталогов их содержащих):

- `constant` - файлы, содержащие расчетную сетку и контролирующие физические параметры модели;
- `system` - файлы, предназначенные для управления ходом решения, параметрами дискретизации системы уравнений и контролирующие процесс решения СЛАУ;
- «срезы времени» - каждый расчетный момент времени сохраняется на дисковом пространстве как каталог, содержащий файлы с распределением искомых величин по пространству. Имена файлов соответствуют имени искомого поля (например, давление — p , скорость — U , и так

далее). В каждой задаче всегда должен быть каталог 0 — в нем содержатся описание граничных условий по времени (начальные условия) и математическая формулировка граничных условий по пространству искомых переменных.

Папка system содержит следующие файлы:

- blockMeshDict - словарь, используемый генератором сетки blockMesh;
- controlDict - словарь, используемый для общей настройки моделируемого процесса: изменение временного отрезка и формата выходных данных, подключение дополнительных библиотек, которые могут понадобиться во время запуска процесса, и так далее;
- fvSchemes - словарь, используемый для настройки алгоритма для получения значений для производных и других операторов в уравнениях;
- fvSolution - словарь, используемый для настройки решателей и алгоритмов решения для уравнений.

Папка constant содержит следующие файлы:

- папка polyMesh - содержит файлы с описанием расчётной сетки:
 - boundary - описание физических типов граничных условий;
 - faces - список граней, образующих контрольные объёмы расчётной сетки;
 - neighbour - список граней, являющихся соседними по отношению к контрольному объёму;
 - owner - список граней, принадлежащих контрольным объёмам;
 - points - координаты узлов, образующих сетку.
- momentumTransport - словарь, считываемый решателем в случае турбулентного процесса;
- transportProperties - словарь, используемый для указания ньютоновской модели.

Папка 0 содержит следующие файлы:

- k - хранит значение кинематической энергии;
- nut - хранит значение кинематической вязкости;
- omega - хранит значение частоты;
- p - описывает распределение давления по пространству;
- T - описывает распределение температуры по пространству;

- U - описывает распределение скорости по пространству.

Описание содержания файлов становится слишком объёмным для изложения в данной работе, стоит отметить лишь значения тех параметров, изменение которых будет наиболее сильно влиять на прохождение физического процесса: скорости и давления.

Для осуществления расчётов и визуализации результатов в командную строку необходимо ввести последовательность команд:

1. необходимо зайти в папку с проектом в командной строке, пусть название корневой папки - MyProject:

```
cd MyProject
```

2. следует построить сетку:

```
blockMesh
```

3. требуется запустить решатель, так как процесс не является стационарным, используется алгоритм PIMPLE, а следовательно - решатель pimpleFoam:

```
pimpleFoam
```

4. после произведения расчётов нужно запустить средство визуализации результатов - ParaView:

```
paraFoam
```

Результат последовательности действий выше отображен в соответствии с рисунком 1.

Изменение параметров и нахождение визуальных изменений смоделированного физического процесса - суть данной работы.

Значения, манипуляции над которыми проводятся в данной работе, хранятся в файлах папки 0. Наибольший интерес представляют значения давления и скорости, причём давление из граничного условия - atmosphere и скорость из граничного условия - inlet. Скорость задаётся в виде вектора: (a b c), а давление как скаляр.

В начальном случае скорость равна (1 0 0) - 1 м/с по x, а давление $1 \text{ м}^2/\text{с}^2$.

Пусть теперь значение скорости равно (1 2 0):

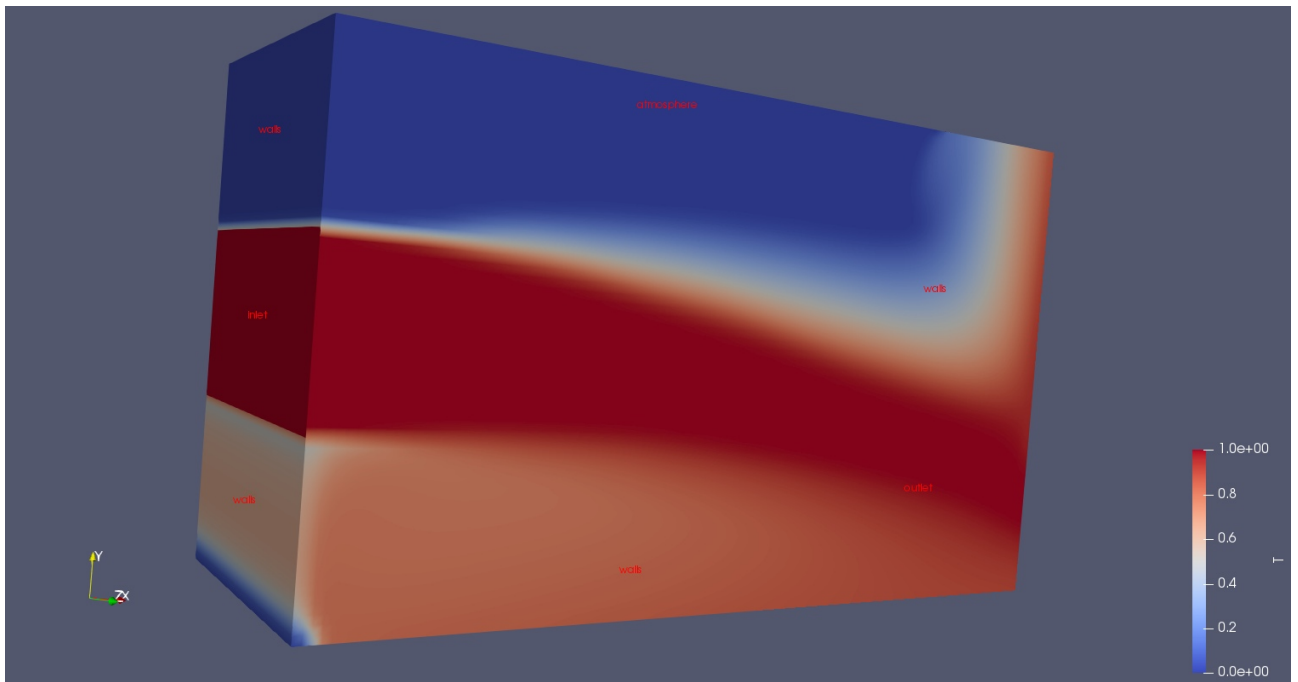


Рисунок 1 — Процесс при начальных значениях скорости потока и атмосферного давления.

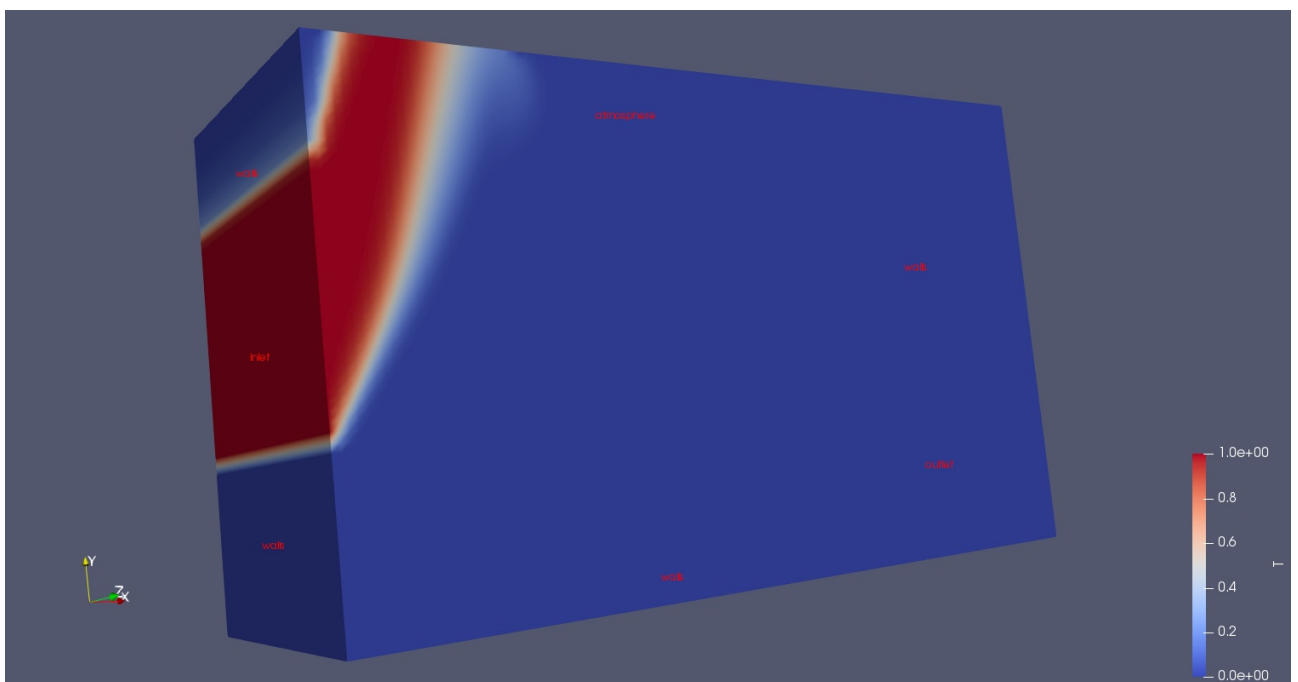


Рисунок 2 — Процесс при изменении значения вектора скорости потока.

В соответствии с рисунком 2 можно сделать вывод, что при новом векторе скорости поток устремляется вправо-вверх, а не только вправо. Это соответствует направлению заданного вектора скорости.

Пусть теперь значение скорости равно начальному значению, а строки файла 0/p имеют следующий вид:

```
atmosphere
{
type totalPressure
p0 uniform 10;
value uniform 0;
}
```

Итоговое, равномерно распределённое давление, имеет значение $10 \text{ м}^2/\text{с}^2$.

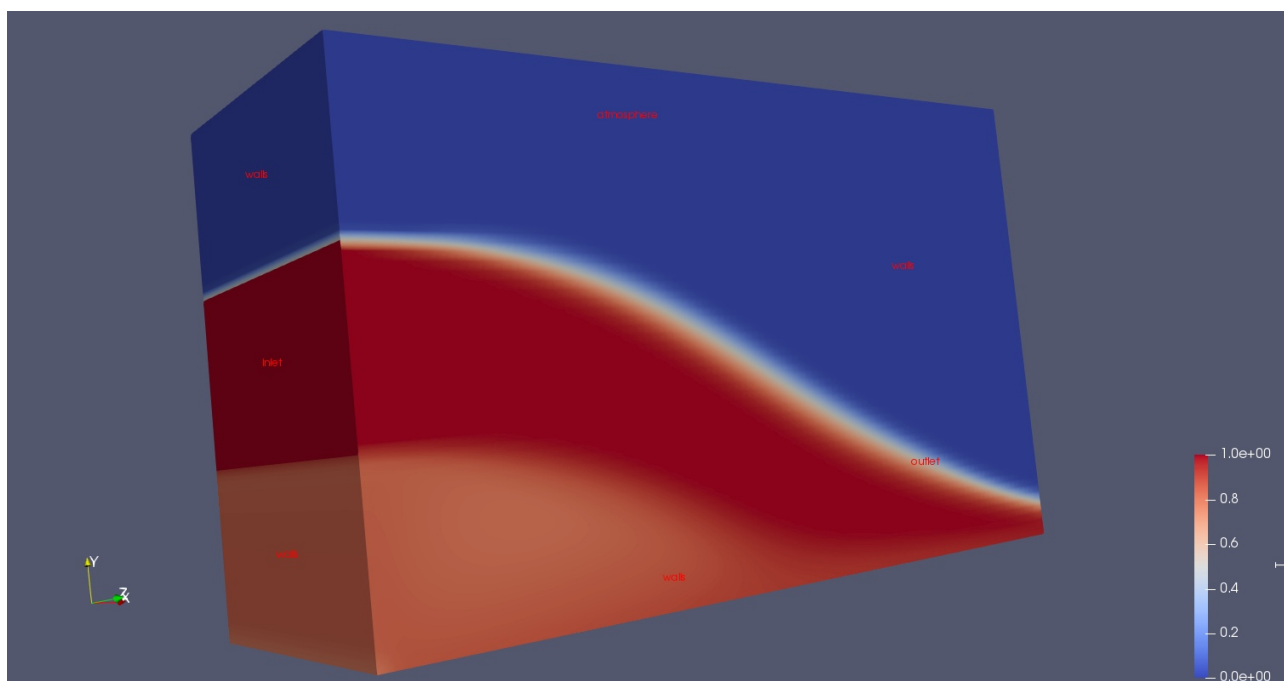


Рисунок 3 — Процесс при изменении значения атмосферного давления.

В соответствии с рисунком 3 можно сделать вывод, что при новом значении атмосферного давления большая часть потока движется по траектории, стремящейся к нижней границе «walls» - ко дну.

Заключение. В данной работе были рассмотрены математические основы моделирования физических процессов, начиная с механики жидкости и газа и заканчивая непосредственно реализацией и визуализацией вычислений в программном обеспечении OpenFOAM.

OpenFOAM предлагает набор инструментов для моделирования разных физических процессов, использующего разные численные методы и алгоритмы в зависимости от решаемой задачи.

В процессе изложения материала также были кратко рассмотрены альтернативные программы для произведения вычислений. Вместе с этим был описан процесс установки программного обеспечения, что может помочь сложить общее впечатление о данной научно-технической области.