

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 РАСЧЁТУ ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРА

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента (ки) 4 курса 413 группы

направления (специальности) 01.03.02 – Прикладная математика и информатика

механико-математического факультета

Беккера Владислава Вячеславовича

Научный руководитель
доцент, к.т.н.

И. А. Панкратов

Зав. кафедрой
зав. каф., д.ф. – м. н.

Ю. А. Блинков

Саратов 2017

ВВЕДЕНИЕ

В бакалаврской работе рассмотрен расчёт потенциального течения жидкости с помощью пакета прикладных программ OpenFOAM. Математическая модель данного простого течения состоит из уравнения неразрывности для скорости и уравнения Лапласа для давления.

При численном решении задач гидродинамики часто применяется метод конечных разностей. При этом значения искомых параметров находятся лишь в конечном наборе точек, принадлежащих расчётной области. В настоящей работе для расчёта обтекания цилиндра применён метод конечных объёмов. Метод конечных объёмов используется для аппроксимации законов сохранения. Дискретизация уравнений переноса проводится с помощью аппроксимации интегральных законов сохранения для каждой ячейки вычислительной сетки. С помощью данного метода получают схемы, для которых выполняются сеточные аналоги законов сохранения. Для всей вычислительной области получается система линейных уравнений.

В первом разделе бакалаврской работы описаны модели обтекания тел потоком жидкости. Во втором разделе приведены краткие сведения о различных численных методах решения дифференциальных уравнений. В третьем и четвёртом разделах описана схема решения задач механики сплошных сред в пакете прикладных программ OpenFOAM. В последнем разделе приведён пример численного решения задачи об обтекании цилиндра, проведено распараллеливание задачи.

1 Основное содержание работы

1.1 Теоретические модели обтекания тел потоком жидкости

Реальные явления природы очень сложны и недоступны для строгого теоретического анализа. Поэтому для построения теории того или иного явления приходится схематизировать действительность и брать в качестве объекта изучения не реальное явления, а его упрощенную физическую модель. В теоретической аэродинамике принято целый ряд моделей обтекания твердых тел потоком жидкости.

Модель корпускулярного строения жидкости была предложена И. Ньютоном. При данной модели жидкость рассматривается как среда, состоящая из отдельных не связанных между собой частиц – корпускул, которые при взаимодействии с телом полностью теряют свою кинетическую энергию, прилипают к нему и преобразуются в потенциальную энергию сил давления, остальные частицы жидкости проходят мимо обтекаемого тела и образуют застойную зону, в которой скорости частиц равны нулю. Данная модель имеет большой недостаток, так как не рассматривает обтекание тел и допускает большую погрешность при расчете силы сопротивления в потоке жидкости большой плотности. Она может быть применена при рассмотрении явлений обтекания тел в разреженной среде, например, на высотах более 80 км.

При использовании модели идеальной жидкости жидкость обтекающая твердое тело, считается сплошной средой, лишенной свойств вязкости и сжимаемости. Математическое исследование этой модели привело к составлению 3-х дифференциальных уравнений движения жидкости, решение которых дает возможность определения скорости и давления в любой точке потока, обтекающего тела. Модель разработана Л. Эйлером и в последующем была усовершенствована Н.Е. Жуковским.

Модель сжимаемой жидкости разработана русским ученым С. А. Чаплыгиным. На базе этой модели создана научная школа газовой динамики изучающая законы движения тел в газах с большими скоростями и при высоких температурах, при которых необходимо учитывать сжимаемость.

Модель вязкой жидкости предложена Л. Прандтлем, который разработал теорию пограничного слоя и раскрыл причину возникновения в нем силы трения.

Также существует модель плазменного состояния среды. Плазма представляет собой среду, состоящую из смеси электрически заряженных и нейтральных частиц. Среда подобная плазме имеет место при входе космических объектов в плотные слои атмосферы земли.

1.2 Физическая картина обтекания твердых тел потоком жидкости и газа

Картину, показывающую распределения траекторий вокруг обтекаемого тела называют спектром обтекания этого тела. Чтобы получить спектры опытным путем, необходимо сделать видимым движением частиц потока жидкости. Это можно достичь введением в поток жидкости подкрашенной жидкости или загустителей, а в поток воздуха струек дыма, тонких нитей или шелковинок. Если траектории частиц являются плоскими кривыми, то такой поток называется плоскопараллельным. Если траектории частиц перемещаются по трем взаимно перпендикулярным осям то такой поток называют пространственным. Выделяют следующие зоны течений

1. Тонкий слой, прилегающий к обтекаемому телу называется пограничным слоем. В нем имеют место большие градиенты скорости по толщине слоя и существенно проявляются силы вязкости и как следствие имеют место силы трения.
2. Спутный след – это сходящий с хвостовой части обтекаемого тела поток жидкости. Течение в этой зоне в основном вихревое, имеют место большие градиенты скоростей, поэтому в этом слое проявляются свойства вязкости и возникают силы трения.
3. Течения вне пограничного слоя. Градиенты скорости в этой зоне незначительные, вязкость слабая, силы трения небольшие. Для упрощения в этой зоне газ считают идеальным.

Вид спектра обтекания зависит от формы тела, скорости потока, а также от физических параметров состояния жидкости, определяющих величину

и характер проявлений таких его свойств, как вязкость и сжимаемость. В некоторых случаях одно или оба эти свойства практически не проявляются и в целях упрощения расчетов аэродинамических сил их влиянием можно пренебречь. В аэродинамике на высотах на которых осуществляются полеты ЛА (тропосфера и стратосферы) воздух считается однородной и сплошной средой и в зависимости от условий обтекания и параметров состояния среды может рассматриваться как:

1. Идеальная жидкость – это среда, не обладающая свойствами вязкости и сжимаемости.
2. Вязкая жидкость – это вязкая среда, лишенная сжимаемости.
3. Идеальный газ – это сжимаемая газовая среда лишенная вязкости, но строго подчиняющаяся уравнению состояния газа и имеющая неизменные термодинамические константы.
4. Совершенный газ – это реальная газовая среда обладающая свойствами вязкости и сжимаемости.

1.3 Введение в OpenFOAM

OpenFOAM (Open source Field Operation And Manipulation) – свободно распространяемый инструментарий вычислительной гидродинамики для операций с полями (скалярными, векторными и тензорными). На сегодня является одним из «законченных» и известных приложений, предназначенных для FVM-вычислений. В частности пакет позволяет решать задачи гидродинамики ньютоновских и неньютоновских вязких жидкостей как в несжимаемом, так и сжимаемом приближении с учётом конвективного теплообмена и действием сил гравитации. Для моделирования турбулентных течений возможно использование RANS-моделей, LES- и DNS-методов. Возможно решение дозвуковых, околосзвуковых и сверхзвуковых задач.

Отличительной особенностью OpenFOAM является его синтаксис для тензорных операций и уравнений в частных производных, который очень напоминает решение уравнения.

Пользователи могут создавать собственные объекты, такие как ограничения условий или модели турбулентности, которые будут работать с суще-

ствующими решениями без изменения или повторно набирать существующий исходный код. OpenFOAM решает эту задачу путем объединения действительных конструкторов с использованием упрощенных базовых классов как интерфейсы. В результате это дает OpenFOAM хорошие качества расширяемости.

OpenFOAM составлен большой основной библиотекой, которая предоставляет основные возможности программного обеспечения. Возможности, предоставляемые библиотекой, затем используются для разработки приложений. Приложения, написанные с использованием синтаксиса высокого уровня, введенные OpenFOAM, которое стремится воспроизводить обычное математическое примечание. Существуют две категории приложений:

- Решатели: они выполняют фактическое вычисление, чтобы решить конкретную проблему механики сплошной среды.
- Утилиты: они используются для подготовки сетки, настройка случай моделирования, обработки результатов, а также для выполнения других, кроме решения проблемы при экспертизе.

Каждое приложение предоставляет определенные возможности: например, приложение под названием blockMesh используется для генерации сетки из входного файла предоставленной пользователем, в то время как другое приложение которое называется isoFoam решает уравнения Навье-Стокса для несжимаемого ламинарного потока. Наконец, ряд сторонних пакетов используется чтобы обеспечить параллельную функциональность (например OpenMPI) и графическую пост-обработку (ParaView).

OpenFOAM предоставляет широкие возможности по настройке средств пакета под решение конкретной задачи или класса задач, однако это порождает и определенные сложности. Выбор численных методов и схем решения, а также установка значений большого количества параметров при практическом отсутствии настроек «по умолчанию» требует высокой квалификации пользователя и, зачастую, больших трудозатрат. При этом документация пакета не всегда позволяет найти ответы на возникающие вопросы. В данной работе кратко рассмотрена общая схема решения задач в пакете OpenFOAM и более подробно — особенности, связанные с моделированием обтекания профилей и приведен пример расчета обтекания цилиндра.

1.4 Моделирование обтекания двумерных профилей средствами пакета OpenFOAM

Весь процесс решения задачи вычислительной гидро- или аэродинамики в пакете OpenFOAM состоит из последовательности блоков работы препроцессора, решателя и постпроцессора. Ядро пакета непосредственно применяется на этапе решателя, а для пре- и постпроцессинга могут использоваться как средства OpenFOAM, так и внешние средства. Среди них имеется большое количество свободно распространяемых, что позволяет при совместном использовании их с OpenFOAM организовать весь процесс решения без привлечения коммерческих программных средств.

Решение любой задачи вычислительной аэродинамики в прикладном программном пакете начинается с описания геометрии расчетной области, построения сетки в ней и задания граничных условий. Перечисленные операции являются основными функциями препроцессоров. В случае областей простейшей формы допустимо использование входящей в состав OpenFOAM утилиты blockMesh. Данный препроцессор позволяет строить блочно-структурированные сетки из призм. Однако задачи моделирования обтекания профилей предъявляют высокие требования к сеткам как по разрешающей способности, так и по качеству. В силу этого применением blockMesh можно ограничиться только в задачах расчета течения в областях самой простой формы; в сколько-нибудь сложных случаях необходимо использовать более мощные препроцессоры.

При моделировании обтекания профиля всю расчетную область можно разделить на пограничный слой вблизи профиля, где наиболее проявляется влияние сил вязкости, аэродинамический след и внешний поток. Для устойчивости численных расчетов и получения достоверных результатов высокую важность имеет разрешающая способность сетки (желательно структурированной) в пограничном слое, а также для аэродинамического следа. С некоторого времени в состав самого пакета OpenFOAM входит достаточно мощный по своим возможностям препроцессор snappyHexMesh. В отличие от blockMesh, snappyHexMesh позволяет строить сетки достаточно высокого качества в областях со сложной геометрией. Принцип работы snappyHexMesh

заключается в постепенном построении на основе предварительно подготовленной крупной сетки более мелкой и привязке узлов ячеек последней к поверхностям тел, расположенных в расчетной области. Также выполняется этап добавления дополнительных слоев ячеек сетки вблизи поверхностей этих тел; snappyHexMesh использует данные о геометрии расчетной области в формате STL (StereoLithography), полученные с использованием любого программного средства, поддерживающего этот формат, включая AutoCAD, Solidworks, Unigraphics. Данные могут быть представлены как в бинарном, так и в текстовом файле. Из средств свободно распространяемого программного обеспечения, поддерживающих формат STL, можно выделить описанный выше продукт SALOME. Процесс построения сетки в snappyHexMesh начинается с разбиения ячеек, пересекающих границы тел, находящихся в области. Масштаб получаемой в итоге сетки определяется т.н. уровнем ее измельчения. При использовании областей с особыми параметрами измельчения сетки можно задать определенный уровень измельчения внутри/вне области либо различные уровни измельчения в зависимости от расстояния до ее поверхности. При моделировании обтекания профилей эта опция позволяет добиться нужного размера ячеек сетки в зоне аэродинамического следа. По завершении процесса измельчения сетки из нее удаляются ячейки, большая часть объема которых оказалась внутри тела. Для оставшихся ячеек, располагающихся вблизи границы тела, вершины смещаются на нее, после чего выполняется анализ и модификация сетки в целях улучшения ее качества (меньшая неортогональность, закрученность и т.д.).

2 Пример расчета обтекания цилиндра с помощью решателя potentialFoam

В работе рассмотрен пример обтекания цилиндра с помощью решателя potentialFoam. Этот пример демонстрирует следующие возможности OpenFOAM:

1. Неортогональные сетки;
2. Создание аналитического решения задачи в OpenFOAM.

Область решения является двумерной и представляет собой квадрат с цилиндром, расположенным в центре квадрата.

Основные уравнения:

- Уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости

$$\nabla \bullet U = 0;$$

- Уравнение давления для безвихревого движения несжимаемой жидкости

$$\nabla^2 p = 0;$$

Граничные условия:

- Вход (слева) с фиксированной скоростью $U = (1, 0, 0)m/s$;
- Выход (справа) с фиксированным давлением $p = 0$;
- Стенка (снизу) не скользит;
- Плоскость (сверху) симметрична.

Начальные условия:

- $U = 0$;
- $p = 0$;

Используется решатель potentialFoam, который предполагает, что поток является несжимаемым, устойчивым, безвихревым, невязким и игнорирует гравитацию. Стандартный пример расположен в каталоге:

```
| $FOAM_TUTORIALS/basic/potentialFoam/cylinder
```

Расчёт обтекания цилиндра можно запустить в многопроцессорном режиме, эта возможность показана в работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведён расчёт потенциального течения жидкости вокруг цилиндра. Система дифференциальных уравнений в частных производных относительно скорости и давления была решена с помощью метода конечных объемов. Расчёт проведён с помощью пакета прикладных программ OpenFOAM. Также было проведено распараллеливание задачи. Установлено, что при расчёте обтекания цилиндра дополнительные затраты времени на то, чтобы разбить сетку на несколько частей, оказались значительно выше выигрыша времени за счёт использования нескольких процессоров.