

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 КРЫЛА  
АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 413 группы  
направления 01.03.02—Прикладная математика и информатика  
механико-математического факультета  
Коновалова Николая Олеговича

Научный руководитель  
к.т.н., доцент

И.А.Панкратов

Зав. кафедрой  
зав.каф., д.ф.м.н.

Ю. А. Блинков

Саратов 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>                                       | <b>3</b>  |
| <b>1 Общая структура работы .....</b>                       | <b>4</b>  |
| 1.1 Актуальность работы .....                               | 4         |
| 1.2 Цели и задачи работы .....                              | 4         |
| <b>2 Содержание выпускной квалификационной работы .....</b> | <b>5</b>  |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>                                     | <b>10</b> |

## ВВЕДЕНИЕ

Сегодня одним из важнейших показателей успешности внедрения численного моделирования в промышленность является универсальность используемых методов и широта охвата классов решаемых задач. При этом универсальность может ограничиваться спецификой численного метода, определяющейся рядом параметров, сужающих область применения математических моделей, таких как уровень разрешения, требования к скорости вычислений и затратам вычислительных ресурсов. Так, при решении задач гидро-, аэро- и газодинамики одним из наиболее распространённых является интегроинтерполяционный метод (или метод конечного объёма), область применения которого распадается на две подобласти в зависимости от характерной скорости среды:

- несжимаемые или слабосжимаемые течения (локальная скорость среды существенно меньше скорости распространения акустических возмущений, а распространение акустических волн в расчётной области можно считать мгновенным);
- сжимаемые течения.

В настоящее время особенно востребованными являются направления численного моделирования, в которых задачи обоих классов имеют место — динамика плазмы, течения с пульсирующими источниками массы, энергии и импульса, двухфазные течения и пр. Необходимость разработки всё более универсальных программ и алгоритмов является несомненным вызовом и подталкивает к сопряжению различных методов и поиску способов их интеграции в единые модели.

# **1 Общая структура работы**

## **1.1 Актуальность работы**

Получение аэродинамических характеристик тел различной формы в лабораторных условиях путем продувок в аэродинамических трубах является весьма трудоемкой и дорогостоящей задачей. На сегодняшний день все чаще для получения аэродинамических характеристик тел применяются методы вычислительной гидродинамики. Работы отечественных и зарубежных исследователей показывают, что численное моделирование турбулентных течений может давать вполне адекватные результаты.

В связи с этим актуальным становится вопрос об оценке возможности исследования расчета обтекания крыла, реализованных в свободно распространяемом пакете прикладных программ OpenFOAM.

## **1.2 Цели и задачи работы**

Цель исследования: применить в качестве инструмента для расчета обтекания крыла пакет прикладных программ OpenFOAM (Open Source Field Operation And Manipulation CFD ToolBox – пакет программ для операций и манипуляций с полями с открытым исходным кодом). Задачи исследования:

описание стандартного примера расчета обтекания крыла в пакете OpenFOAM;

моделирование расчета обтекания крыла с новыми условиями, отличными от стандартных;

сравнение и анализ полученных моделей;

распараллеливание расчёта в многопроцессорной системе

## 2 Содержание выпускной квалификационной работы

OpenFOAM (англ. Open Source Field Operation And Manipulation CFD ToolBox — «свободно распространяемый инструментарий вычислительной гидродинамики для операций с полями», скалярными и векторными). На сегодняшний день является одним из «законченных» и известных приложений, предназначенных для FVM-вычислений. Код OpenFOAM, разработан в Великобритании в компании OpenCFD, Limited, и используется многими промышленными предприятиями более 12 лет. Свое название и идеологию построения код берет от предшественника FOAM (Field Operation And Manipulation), который является закрытым и продолжает развиваться параллельно с OpenFOAM. Первоначально, программа предназначалась для прочностных расчетов и в результате многолетнего академического и промышленного развития на сегодняшний момент позволяет решать следующие задачи:

- Прочностные расчеты.
- Гидродинамика ньютоновских и неньютоновских вязких жидкостей как в несжимаемом, так и сжимаемом приближении с учётом кон-вективного теплообмена и действием сил гравитации. Для моделирования турбулентных течений возможно использование RANS-моделей, LES и DNS методов. Возможно решение дозвуковых, околозвуковых и сверхзвуковых задач.
- Задачи теплопроводности в твёрдом теле.
- Многофазные задачи, в том числе с описанием химических реакций компонент потока.
- Задачи, связанные с деформацией расчётной сетки.
- Сопряжённые задачи.
- Некоторые другие задачи, при математической постановке которых требуется решение ДУ в ЧП в условиях сложной геометрии среды.
- Распараллеливание расчёта как в кластерных, так и многопроцессорных системах.

В основе кода лежит набор библиотек, предоставляющих инструменты для решения систем дифференциальных уравнений в частных производных как в пространстве, так и во времени. Рабочим языком кода является ООП C++.

В терминах данного языка большинство математических дифференциальных и тензорных операторов в программном коде (до трансляции в исполняемый файл) уравнений может быть представлено в удобочитаемой форме, а метод дискретизации и решения для каждого оператора может быть выбран уже пользователем в процессе расчёта. Таким образом, в коде полностью инкапсулируются и разделяются понятия расчетной сетки (метод дискретизации), дискретизации основных уравнений и методов решения алгебраических уравнений. OpenFOAM поставляется с вычислительной средой включающей пре- и постпроцессор. Интерфейс (связь с) пре и постпроцессором обеспечивается утилитами OpenFOAM, таким образом гарантируя совместимость обращения с данными для всей вычислительной среды. Образцовые случаи (или примеры обучающей программы) описывают использование утилиты blockMesh - инструмента предпроцессной обработки, установки примера и запуска на счет решателя OpenFOAM и постпроцессной обработки с использованием paraFoam. Те пользователи, которые имеют доступ к постпроцессорам, разработанным другими фирмами, к инструментарию сторонних разработчиков, также поддерживаемых в OpenFOAM, имеют выбор: либо они могут следовать за примерами обучающих программ, используя paraFoam; либо обратиться к описанию использования продукта стороннего разработчика, когда требуется постпроцессная обработка. Копии всех обучающих программ доступны в директории обучающих программ из поставки OpenFOAM. Обучающие программы организованы в виде ряда директорий согласно типу течения, в которых расположены поддиректории с различными решателями. Например, все icoFoam примеры (case) хранятся в пределах подкаталога несжимаемых течений incompressible/icoFoam, где несжимаемое указывает на тип рассматриваемого течения. Если пользователь желает запустить на счет весь диапазон тестовых примеров, рекомендуется, чтобы пользователь сначала скопировал директорию tutorials обучающих программ в свой личный каталог тестовых примеров run. Решатели, поставляемые в составе OpenFOAM, находятся в каталоге  $\$FOAM\_SOLVERS$ , быстрый переход в который из командной строки осуществляется командой sol. Этот каталог подразделяется на подкаталоги в соответствии с разделом механики сплошных сред, например, несжимаемый поток, горение и анализ напряжений. Каждому ре-

шателю дано соответствующее его работе имя, например `icoFOAM` решает задачи несжимаемого, ламинарного потока. Численные схемы для операторов, в запускаемых уравнениях задаются в каталоге `system` в словаре `fvSchemes`. Словарь `fvSchemes` описывает численные схемы для операторов, например производных, которые используются в решателе. Операторы, которые обычно описываются численными схемами в `fvSchemes` - это различные производные, и интерполяций значений из одного набора точек в другой. Так сделано, чтобы не ограничивать выбор пользователя. Хотя линейная интерполяция достаточно эффективна для многих случаев, `OpenFOAM` предоставляет полную свободу выбора из широкого набора схем интерполяции для каждого интерполируемого оператора. Рассмотрим это на примере производных. Пользователь может выбрать наиболее распространенное конечно-объемное интегрирование Гаусса. Гауссово интегрирование основано на суммировании значений на гранях ячеек, которые интерполируются центров ячеек. Пользователь снова может выбрать выбор схему интерполяции, некоторые схемы специально разработаны для конкретных операторов производных, например, дивергенция конвекции. Каждый пример решателя содержит описание задачи: геометрию, входные и граничные условия, краткое описание решаемых уравнений, использованные модели и требуемые физические свойства. Выбранная область решения может быть частью исходной геометрии, например, если мы вводим симметричные плоскости. Задан метод слияния, обычно `blockMesh`; конечно же, пользователь может просто просмотреть сетку с каждым примером, расположенным в директории `polyMesh`, содержащей файлы данных, описывающих эту сетку. Эти примеры находятся совместно с обучающей программой в поддиректории обучающих средств в установке `OpenFOAM`. Они объединены решателем в совокупность поддиректорий, например, все случаи `icoFoam` находятся в поддиректории `icoFoam`. Прежде чем начать работу с каким-либо частным примером пользователь должен предварительно скопировать его в свой каталог. Рекомендуется сохранять все расчеты в директории, так как обучающие программы копируются в директорию `$FOAMRUN`. Если структура этой директории еще не создана в каталоге пользователя, ее можно создать с помощью:

```
| mkdir -p $FOAM_RUN$
```

Обучающие программы можно затем скопировать в эту директорию с помощью:

```
| cp -r $FOAM_TUTORIALS/* $FOAM_RUN$
```

Геометрия состоит из крыла, координаты которого задаются во входном файле `Airfoil.data`. Параметры сетки могут быть выбраны в файле `input.data`. Для создания нам нужно открыть терминал и перейти к его каталогу, затем напечатать `make` для компиляции и, наконец, ввести `./Airfoil`. Создается файл `blockMeshDict`, и мы можем использовать его в `OpenFoam` для создания нашей геометрии. После создания геометрии, мы модифицируем файл `blockMeshDict`, так как мы хотели бы разделить вычислительную область на две части (ламинарные и турбулентные). Единственные изменения, которые мы вносим в `blockMeshDict`, - это добавление слова `ламинарный` и `турбулентный` к части блоков, как показано ниже. В файле `blockMeshDict`, в разделе `вершин`, указан порядок точек сетки. Теперь мы можем запустить `blockMesh` для генерации сетки. Так как мы определили ламинарную и турбулентную зоны на блочной части файла `blockMeshDict`, как указано выше, сетка будет иметь две разные зоны. Когда мы запускаем `blockMesh`, он создает дополнительные файлы в каталоге `polyMesh` в виде `cellZones`, включающих ламинарные и турбулентные метки ячеек, а также дополнительный каталог внутри каталога `polymesh`, называемый `наборами`, содержащими ламинарные и турбулентные числа, определяющие ячейки.

Поскольку рассматриваемый здесь случай отличается от стандартного случая в `OpenFOAM` для аэродинамического двумерного профиля, граничные и начальные условия изменяются, как показано ниже. После запуска `blockMeshDict` сгенерированная сетка состоит из пяти частей, которые являются входом, выходом, сверху, снизу и крылом.

Скорость свободного потока и угол атаки равны  $75 \text{ [м/с]}$  и  $5$  градусов соответственно.

В каталоге `Constant` нужно изменить файл `RASProperties`, относящийся к модели турбулентности. Итак, исходные `RASProperties`

```
| RASModel          SpalartAllmaras ;  
| turbulence        on ;  
| printCoeffs      on ;
```



должны быть сохранены по умолчанию в RASModel. Начиная с того, что для каждого случая необходимо, чтобы модель RASModel была разной. Ниже приведен один пример файла RASProperties:

```
RASModel          mySpalartAllmaras;  
turbulence        on;  
printCoeffs      on;
```

Для определения ламинарной и турбулентной зон мы используется два разных подхода. Первый подход заключается в использовании функции ( $\alpha_1=0/1$ ), а другой - в использовании класса cellZone, который будет объяснен позже. Для первого подхода нужно скопировать команду

```
cp -r $WM_PROJECT_DIR/tutorials/multiphase/interFoam/laminar/damBreak/  
system/setFieldsDict
```

в каталог system.

Файл setFieldsDict, расположенный в каталоге system, задает неравномерное начальное условие.

Файл controlDict устанавливает входные параметры, необходимые для создания базы данных. В файле controlDict нам нужно изменить некоторые параметры, относящиеся к нашему решению.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе удалось смоделировать стандартный пример для расчета обтекания крыла. Были описаны все основные библиотеки и файлы примера.

Был реализован случай расчета обтекания крыла с переходом от ламинарного течения к турбулентному, с помощью применения модели Спаларта – Алмараса.

Произведено сравнение файлов для двух примеров и проанализированы модели, полученные после обработки примеров пакетом OpenFOAM.