

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 течений мелкой воды

**Автореферат бакалаврской работы**

студентки 4 курса 413 группы

направление 01.03.02 Прикладная математика и информатика

механико-математического факультета

Медведевой Лады Вячеславовны

Научный руководитель  
доцент, к. т. н.

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 характеристика работы</b> .....	<b>4</b>
1.1 Актуальность работы .....	4
1.2 Научная новизна .....	4
<b>2 Содержание бакалаврской работы</b> .....	<b>5</b>
2.1 Схема решения задачи в пакете OpenFOAM .....	5
2.2 Постановка задачи .....	6
2.3 Анализ задачи .....	8
2.3.1 Изменение разбиения расчетной сетки .....	8
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	<b>11</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Цель бакалаврской работы заключается в исследовании моделирования распространения волн на площади рельефа — течения мелкой воды в некотором водоеме с возвышением. В качестве инструмента для решения поставленной задачи был выбран пакет прикладных программ OpenFOAM.

OpenFOAM — открытая интегрируемая платформа для численного моделирования задач механики сплошных сред — от гидроаэродинамики, включая учет процессов горения, протекания химических реакций, турбулентности и тепломассообмена, до механики деформируемого твердого тела и электромагнетизма. Данная программа распространяется под лицензией GNU General Public License 3.

В OpenFOAM рассматривается решатель shallowWaterFoam — переходный решатель для невязких мелководных уравнений с вращением, находящийся в классе задач incompressible — турбулентное течение несжимаемой жидкости. Решатель — численная модель интегрирования дифференциальных уравнений в частных производных, основанная на методе конечного объема. В работе представлены исследования о том, как изменится решение и скорость вычислений, если:

- 1 увеличить расчетную сетку;
- 2 уменьшить возвышение;
- 3 применить метод декомпозиции расчетной области (метод параллельных вычислений).

# 1 Общая характеристика работы

## 1.1 Актуальность работы

Уравнения мелкой воды, являясь системой нелинейных гиперболических уравнений, аппроксимируют полную систему уравнений Эйлера, описывающую течения несжимаемой жидкости со свободной поверхностью в поле силы тяжести при пренебрежении эффектами вертикальной неоднородности горизонтального поля скорости  $U$ .

Актуальность бакалаврской работы заключается в том, что уравнения мелкой воды широко используются для расчета приливов, штормовых нагонов, цунами и других природных явлений, генерируемых длинноволновыми возмущениями уровня.

## 1.2 Научная новизна

Несколько десятилетий назад трехмерное численное моделирование в гидродинамике на основе полных нелинейных уравнений было редкостью, так как в основном ограничениями была недостаточность компьютерных ресурсов, т. е. величина памяти и производительность. В настоящее время возможности современной техники в совокупности с развитием численных методов и достижениями в области автоматизации расчетов стремительно возросли.

Научная новизна данной работы состоит в рассмотрении поставленной задачи с применением пакета прикладных программ OpenFOAM. Данная программа широко востребована как зарубежом, так и в России. Подтверждению этому свидетельствует увеличение количества работ в российских и зарубежных издательствах. Но, несмотря на это, документация программы остается на английском языке, что вызывает некоторые трудности для ее изучения.

OpenFOAM включает огромный набор утилит и позволяет решать широкий комплекс различных задач, включая моделирование химических процессов, задачи динамики твердого тела и электромагнетизма, а также финансовое прогнозирование и используется многими промышленными предприятиями более 12 лет.

## 2 Содержание бакалаврской работы

### 2.1 Схема решения задачи в пакете OpenFOAM

Рабочим языком OpenFOAM является язык C++. Данный язык выбран для удобства представления математических операторов и выражения в удобной форме до компиляции в исполняемый файл. Условно код OpenFOAM можно разделить на следующие части:

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 и визуализации результатов вычислений с помощью постпроцессора.

Рассматриваем класс задач incompressible (турбулентное течение несжимаемой жидкости). Для решения каждой задачи существует отдельная утилита решатель. Принцип работы решателя состоит из следующих этапов:

1. подготовка конфигурационных файлов с геометрией, расчетной сеткой и граничными условиями, а также файлов с начальными условиями;
2. запуск решателя, который на выходе для каждой итерации создает файл с текущими значениями.

Первый этап подготовки исходных данных для расчета течения – создание твердотельной геометрической модели, имитирующей объем, внутри которого происходит исследуемый физический процесс.

Построение расчетной сетки – это процесс разбиения расчетной области на множество отдельных ячеек. Ячейки сетки представляют собой многогранники, обычно тетраэдры, гексаэдры, призмы или пирамиды. Кромки этих ячеек образуют линии расчетной сетки, а точки, расположенные на кромках, либо в центре ячеек – узлы расчетной сетки. В результате численного решения уравнений математической модели именно в узлах расчетной сетки и определяются искомые параметры течения.

## 2.2 Постановка задачи

Жидкость несжимаема, и воздействие вертикального сдвига горизонтальной скорости является незначительным. Предположение о несжимаемости является одной из причин названия уравнений мелкой воды, так как вода является более или менее несжимаемой. Импульс и уравнения непрерывности для мелководных уравнений имеют следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \nabla \cdot (hu^T u) + f \times hu = - |g| h \nabla(h + h_0) + \tau^w - \tau^b, \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(h + h_0) + \nabla \cdot (hu) = 0, \quad (2.2)$$

где  $h$  средняя высота поверхности,  $u$  вектор скорости,  $f = (2\Omega \cdot \hat{g})\hat{g}$  сила Кориолиса (в зависимости от угловой скорости вращения Земли  $\Omega$  и нормальным вектором гравитации  $\hat{g}$ ),  $h_0$  представляет собой отклонение от высоты средней поверхности,  $\tau^w$  ветер, а  $\tau^b$  напряжение. В решателе `shallowWaterFoam`, ветер и напряжения принимаются равными нулю, а поверхность потока скорости определяется следующим образом:

$\phi_v = \frac{\phi}{h} = \{\phi = hu \cdot \hat{n}\} = u \cdot \hat{n}$ , где  $\hat{n}$  вектор нормали. Тогда уравнение (2.1) сводится к следующему виду:

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \nabla \cdot (h\phi_v u) + f \times hu = - |g| h \nabla(h + h_0). \quad (2.3)$$

Геометрия расчетной области и принятая система координат показаны в соответствии с рисунком 2.1. Границы неподвижны, жидкость втекает слева направо со скоростью 0.1 м/с.

OpenFOAM использует трехмерную декартовую систему координат. Двухмерная область в этой задаче разделена на равномерную сетку размерности 20x20 (рисунок 2.2). Файл, который содержит узлы расчетной сетки, генерируется утилитой `blockMesh`. Входные параметры для этой утилиты записаны в файле `blockMeshDict`, который расположен в папке `system`. В бакалаврской работе в главе 4 приведено описание данной утилиты для рассматриваемой задачи `shallowWaterFoam`. Код файла приведен в приложе-

нии A. В папке system находятся системные файлы (controlDict, fvSchemes, fvSolution и setFieldsDict), в которых задаются предпочтения управлением моделирования и вывод результатов. В файле controlDict считываются входные данные, относящиеся к управлению временем и чтению, а также записи данных решения. В fvSchemes указываются выбранные схемы дискретизации всех членов уравнения, а также описываются интерполяционные схемы. fvSolution управляет решением систем уравнений решателей и выбором алгоритмов, используемых в решении. В setFieldsDict задаются неоднородные поля и определенные значения физических величин для всех ячеек, ограниченных определенной геометрической фигурой. В главе 6 приведено описание системных файлов. Коды файлов приведены в приложении В.

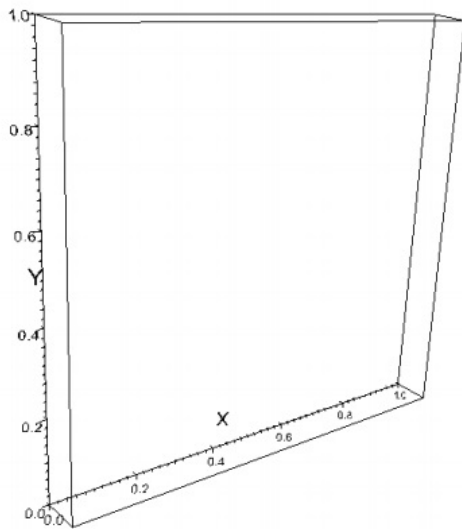


Рисунок 2.1 — Геометрия состоит из одного блока шестигранника с размерами  $1 \times 1$  метров и шириной 0.1 метр.

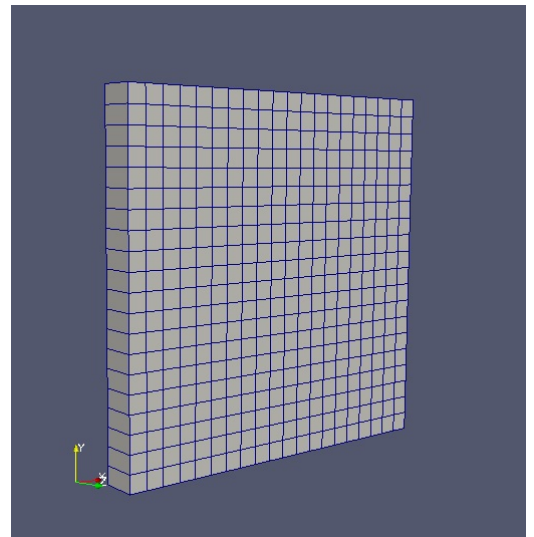


Рисунок 2.2 — Расчетная сетка.

В OpenFOAM, по умолчанию, начальные и граничные условия для всех зависимых переменных определяются в папке 0. В рассматриваемой задаче ShallowWaterFoam, папка 0 содержит четыре файла: средняя высота поверхности  $\ll h \gg$ , высота свободной поверхности  $\ll hTotal \gg$ , отклонение от средней высоты поверхности  $\ll h0 \gg$  и векторное поле вязкости  $\ll hU \gg$ . В главе

5 приведено описание данных величин, а коды представлены в приложении Б.

Кроме начальных значений для решения большинства задач с помощью OpenFOAM необходимы константы и физические свойства, которые находятся в папке constant. Для рассматриваемой задачи учитываются следующие физические величины: сила тяжести и вращение Земли, так как от этих величин зависит уравнение мелкой воды (2.3). Исходный код физических величин приведен в приложении Б.

## 2.3 Анализ задачи

### 2.3.1 Изменение разбиения расчетной сетки

Алгоритм оптимизации с помощью подробного разбиения гексаэдральной расчетной сетки можно использовать почти для любой задачи с неподвижной сеткой. Весь набор необходимых действий сводится к следующему:

1. произвести моделирование с требуемым расчетным периодом на крупной сетке;
2. разбить сетку на более мелкую, увеличив количество ячеек;
3. интерполировать результат моделирования на полученную расчетную сетку.

Данный вид оптимизации позволяет уменьшить время расчета. В таблице представлены результаты разбиения сетки:

Количество разбиений	20	25	50
Время выполнения расчетов, с	4.17	6	15

Результаты численных расчетов записываются, как упорядоченная последовательность файлов и каталогов с различными именами, соответствующими различным временным моментам, определенных в controlDict.

При 20 разбиениях и построении изолиний векторное поле вязкости изменяется в соответствии с рисунком 3.1, с рисунком 3.2 и с рисунком 3.3.



При 25 разбиениях и добавлении второго возвышения векторное поле вязкости изменяется в соответствии с рисунком 3.4, с рисунком 3.5 и с рисунком 3.6.

При 50 разбиениях векторное поле вязкости изменяется в соответствии с рисунком 3.7, с рисунком 3.8 и с рисунком 3.9.

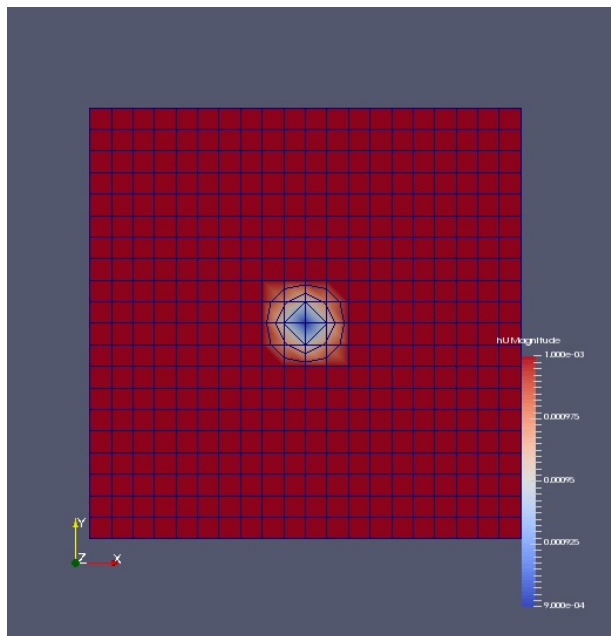


Рисунок 3.1 -  $t=0$ .

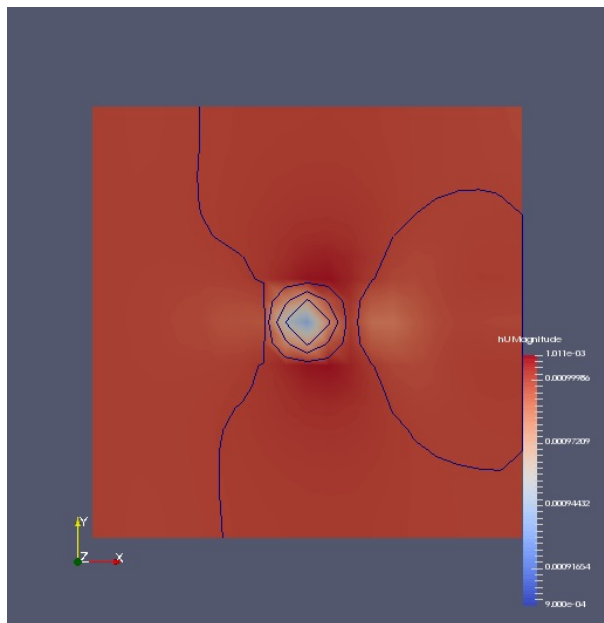


Рисунок 3.2 -  $t=16$ .

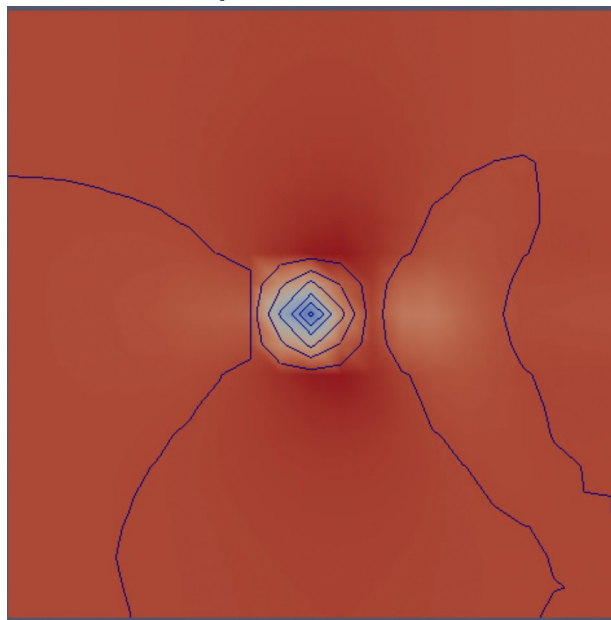


Рисунок 3.3 -  $t=100$ .

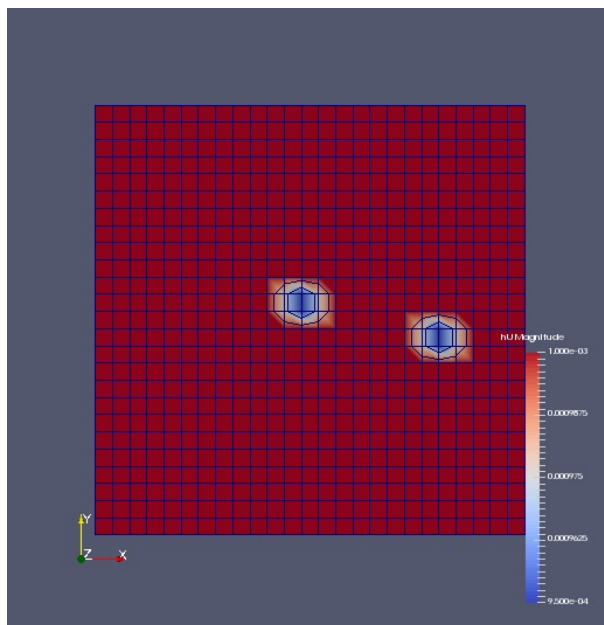


Рисунок 3.4 -  $t=0$ .

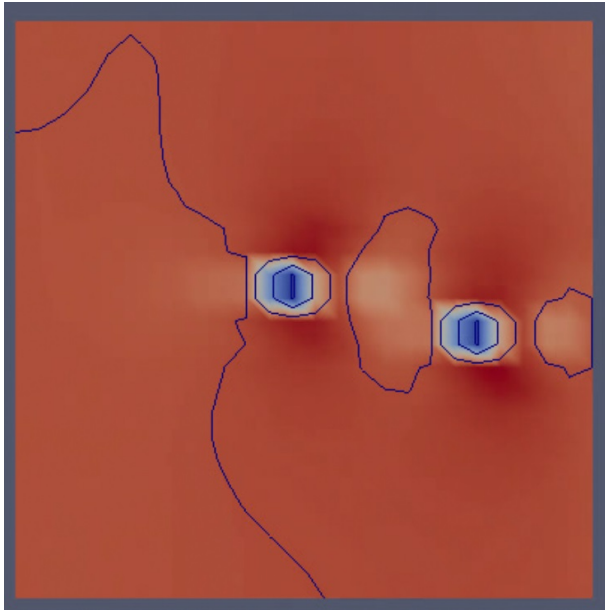


Рисунок 3.5 -  $t=16$ .

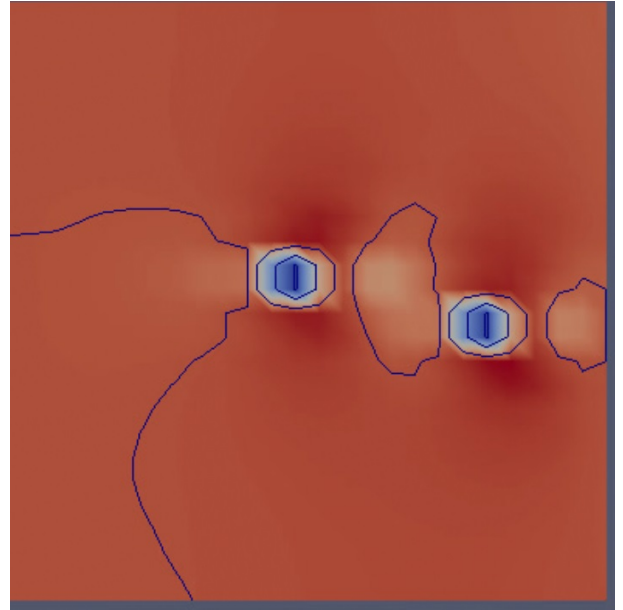


Рисунок 3.6 -  $t=100$ .

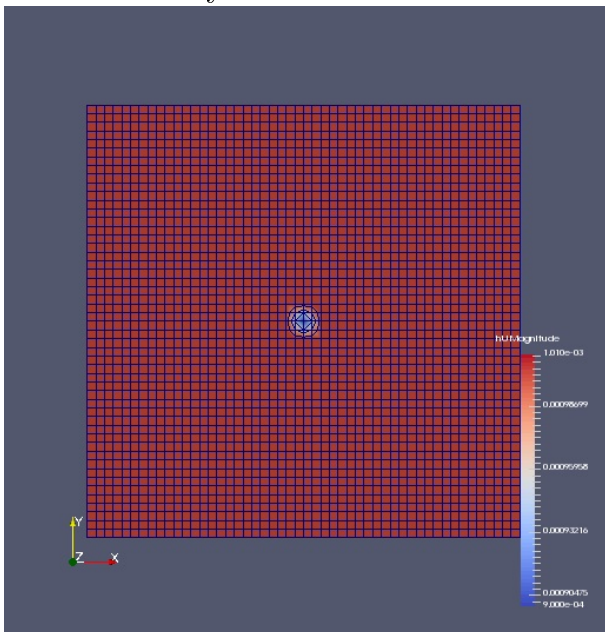


Рисунок 3.7 -  $t=0$ .

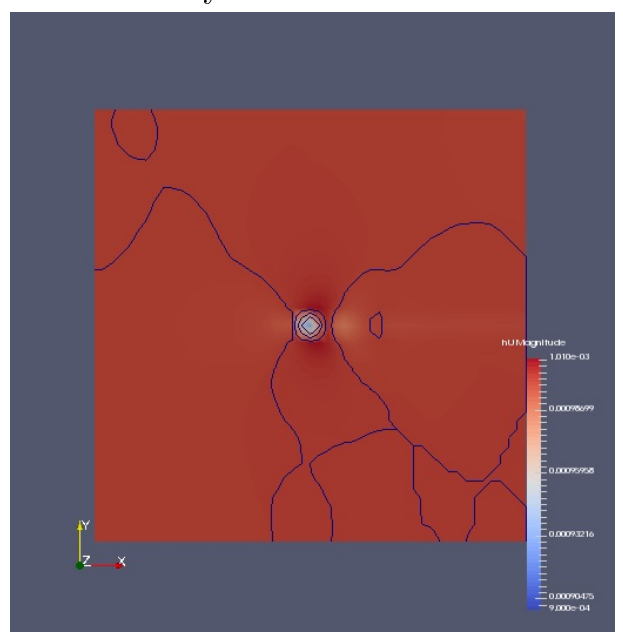


Рисунок 3.8 -  $t=16$ .

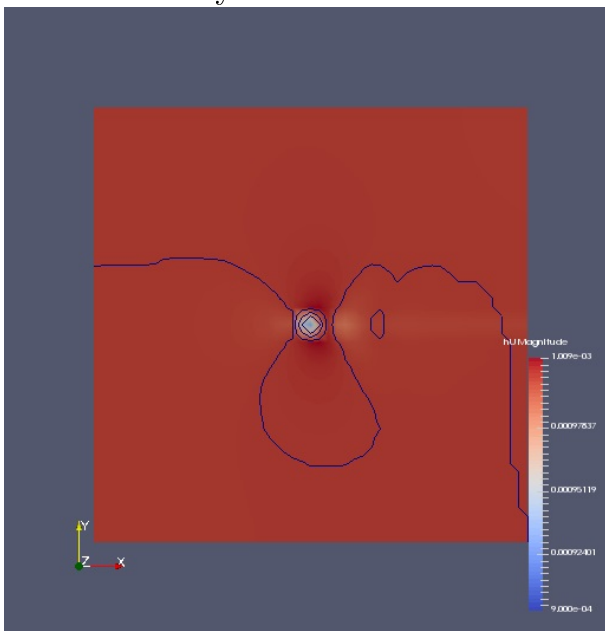


Рисунок 3.9 -  $t=100$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе бакалаврской работы была проанализирована задача ShallowWaterFoam при разбиении расчетной сетки на 20 ячеек и было произведено увеличение разбиений расчетной сетки.

OpenFOAM – перспективное и динамично развивающееся открытое программное обеспечение для моделирования задач механики сплошных сред. В его разработке и развитии принимают участие десятки организаций и сотни разработчиков по всему миру. OpenFOAM – обладает большой функциональностью и удовлетворяет всем основным требованиям, предъявляемым к современному программному обеспечению для расчета задач аэродинамики.