Министерство образования и науки РФ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Казанский (Приволжский) Федеральный Университет»

ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ

КАФЕДРА АЭРОГИДРОМЕХАНИКИ

Направление: 05-003 – механика

Специализация: Аэрогидромеханика

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(Бакалаврская работа)

ТЕМА

Исследование обтекания обратной ступени вязкой жидкостью в пакете «OpenFoam»

Работа завершена:

"___"_____ 2014 г. _____ (С.Р.Ямалиев)

Работа допущена к защите:

Научный руководитель,

доктор ф.–м. наук, профессор

"___"_____ 2014 г. _____ (А.Н.Нуриев)

Заведующий кафедрой,

доктор ф.–м. наук, профессор

"___"_____ 2014 г. _____ (А.Г.Егоров

Казань – 2014

Содержание.

1. Введение	2
2. Постановка задачи	4
3. Дискретизация области решения. Строение сетки	6
4. Численное решение	7
5. Дискретизация системы	8
6. Дискретизация граничных условий	8
7. Решение дискретной задачи	9
8. Результаты выполнения программы OpenFOAM	9
9.Заключение	13
10. Литература	14
11.Приложения	15

1.Введение.

Задачи обтекания жидкостью различных тел встречаются во многих отраслях человеческой деятельности. Вопрос изучения обтекания является очень актуальным при проектировании самолетов, кораблей, подводных лодок и т.д. До недавнего времени большинство исследований посвященных обтеканию тел носило в основном экспериментальный характер. С развитием вычислительной техники и методов вычислений появилась возможность изучать обтекание при помощи численного моделирования.

Современное состояние численного моделирования в областях аэрогидродинамики и теплофизики характеризуется широким распространением коммерческих многофункциональных CFD — пакетов прикладных программ, которые являются продуктами эволюции первоначально исследовательских комплексов и объектно-ориентированных систем программирования. Разработка универсальных коммерческих пакетов типа PHOENICS, STAR-CD, ANSYS, FLUENT, CFX, FlowVision, COSMOS FloWorks во многом связывается с прогрессом в персональных компьютерах и их широким использованием, в том числе на суперкомпьютерах в параллельных версиях. На определенном этапе развития вычислительной гидродинамики указанные пакеты, безусловно, сыграли положительную роль. Однако сейчас все заметнее сказывается их тормозящее влияние на развитие численных исследований особенно в учебной и научной сферах. Причины лежат не только в сложившемся монополизме производителей пакетов и закрытости их «ядра». Главное - «несвободность» пакетных технологий. Это признают даже основатели CFD и классики пакетных технологий, такие как D.B. Spalding. Исходя из этого, покажим возможности открытого пакета для аэрогидромехаников «OpenFoam», иследуя задачу обтекания ступени. Числовое исследование проводится для различных чисел Рейнольдса в области ламинарного течения Рассматривается модель двумерного вязкого потока, пренебрегая сжимаемостью, выделением тепла и внешних массовых сил. В первом разделе работы представлена постановка задачи, создание сетки, применения граничных условий. Общая постановка задачи о течении жидкости по ступеньке заключается в следующем: по ступеньке заданной формы движется несжимаемая вязкая жидкость. Числовой анализ выполняется, используя текущее решение, чтобы исследовать поток по обратной ступеньке для чисел Рейнольдса в области ступеньки. Отрывы и длины прикрепления потока определены для каждого числа Рейнолдса, и результаты сравнены с экспериментальными данными и числовыми исследованиями, найденными в литературе. Поток по ступеньке производит зоны рециркуляции, где жидкость

отделяется и формирует вихри. Для турбулентного течения жидкость отделяется в шаге и снова прикрепляется вниз по течению. Только единственная зона рециркуляции развивается для турбулентного течения, и пункт прикрепления, как полагают, независим от числа Рейнольдса и зависит только от отношения входной высоты к высоте выхода.

В данной работе будет представлено решение данной задачи в более полной постановке, полученное с применением альтернативной математической техники, основанной на положениях теории подобия и размерности, и асимптотических разложений.

OpenFOAM (OpenSourceFieldOperationAndManipulation) — открытая интегрируемая платформа для численного моделирования задач механики сплошных сред. Предназначена для решения задач в области механики сплошных сред[1].

В пакете OpenFOAM различные решатели позволяют моделировать:

— уравнение Лапласа и потенциальный поток;

— несжимаемые и сжимаемые течения на базе уравнений Рейнольдса и Эйлера;

— течения со свободными границами на базе метода VOF;

— турбулентные течения с моделями крупных и отсоединенных вихрей (LES,DES);

— прямое численное моделирование турбулентности (DNS);

— задачи конвекции, теплообмена и горения;

— уравнения магнитная гидродинамика;

— прямое статистическое моделирование разряженного газа методом Монте-Карло;

— тепло-сопряженные задачи.

Методы решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса и дополнительных уравнений основаны на базе метода контрольных объемов. Допускается использование многогранных ячеек с поддержкой подвижных сеток. Для получения СЛАУ используются операции интегрирования, дифференцирования, интерполяция[2].

2. Постановка задачи.

Рассматривается нестационарное вязкое течение жидкости в окрестности обратной ступеньки. Вводится декартова система координат x,y,z, причем ее начало лежит в основании ступени. Течение жидкости характеризуется одним безразмерным параметром - числом Рейнольдса, которое определяется как $Re=\frac{Ud}{\upsilon}$. Основная цель данного исследования является обеспечении надежного результата моделирования потока вокруг ромба для различного числа Рейнольдса от 100 до 1000, нахождение подъёмной силы; силы сопротивления; сравнение расчетами приведенными в [3].

Область решения.

Домен 2-мерной, состоящий из входа, обратным уступом и выходом.

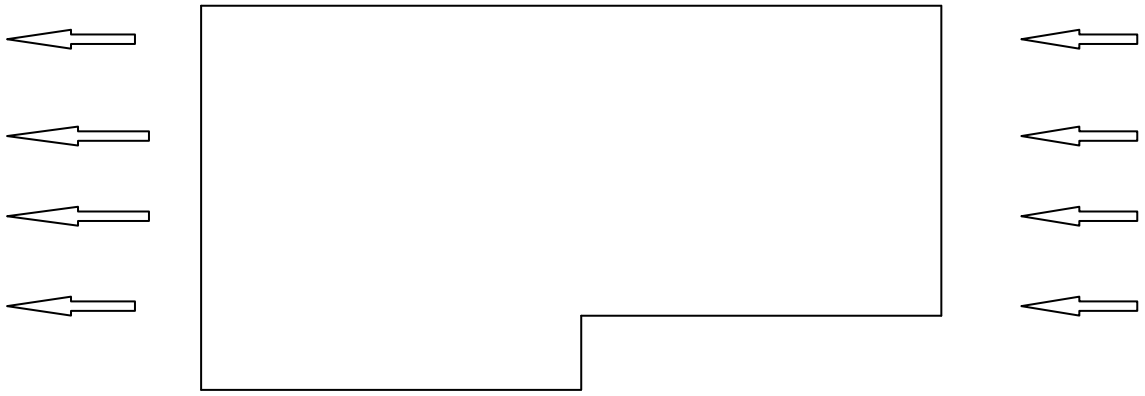
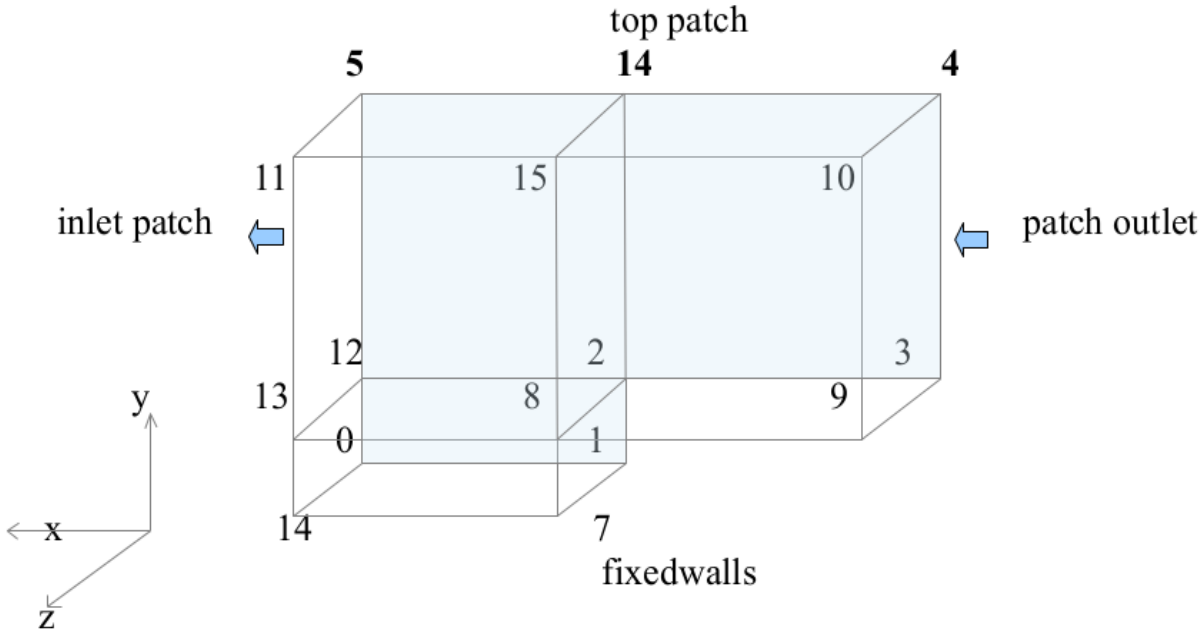


Рисунок 1. Схема потока.

Мы ожидаем, что поток в этой задаче является достаточно сложным и оптимальное решение потребует классификации сетки. Мы можем ожидать на высоких скоростях сдвиги, где будут происходить путем учета того, что решение может быть заранее любого расчета. На входе мы имеем сильный равномерный поток в направлении x и, как она проходит через ступеньку, она генерирует сдвиги на жидкости ниже, создавая вихрь в нижней половине области. В регионах с высоким усилием сдвига, следовательно, быть близко к центральной области и близко к стенам.



Размер сетки:

- по X=50;
- по Y=25;
- по Z=1;

Размер ступени:

- по X=25;
- по Y=1;
- по Z=1;

Течение жидкости по обратной ступеньке описывается системой уранений, состоящей из:

- **Уравнение неразрывности**: $\nabla \cdot \vec{U} = 0$

- **Уравнение Навье́- Стокса:** $\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + (\vec{U}\nabla)\vec{U} = \upsilon \Delta \vec{U} - \nabla(\frac{p}{\rho}) + \vec{f}$

уравнение Навье-Стокса - система дифференциальных уравнений в частных производных описывающая движение вязкой жидкости, является одним из важнейших в гидродинамике применяется в математическом моделировании многих природных явлений и технических задача. Где∇-оператор набла, Δ-оператор Лапласа, t-время, υ-коэффициент кинематической вязкости, ρ-плотность, p-

давление, f-векторное поле скоростей, - векторное поле массовых сил.

- **Граничные условия**:

на бесконечности: $\vec{U}(\vec{r},\mathrm{t}) \to U_\infty,\ p(\vec{r},\mathrm{t}) \to \mathrm{p}_\infty$

на ступеньке: $\vec{U}(\vec{r},\mathrm{t}) \to 0$

3.Дискретизация области решения. Строение сетки

Мы рассматриваем двухмерный вариант. Для построения сетки нам важны следующие факты. Для простоты можно представить, что первоначально расчетная область разбита на подобласти четырехугольной формы. В процессе адаптации эти подобласти – разбиваются на макроячейки. Объединение макроячеек называется макросеткой. Стороны макроячеек (макроребра) являются отрезками прямых (за исключением, может быть, сторон, аппроксимирующих границы исходной расчетной области - такие макроребра могут быть кусками гладких кривых). В процессе адаптации на макроребрах появляются дополнительные узлы расчетной сетки. Расчёты проводились на 2 сетках: на первов 52000 узлов, на втором 2,5 раза больше.

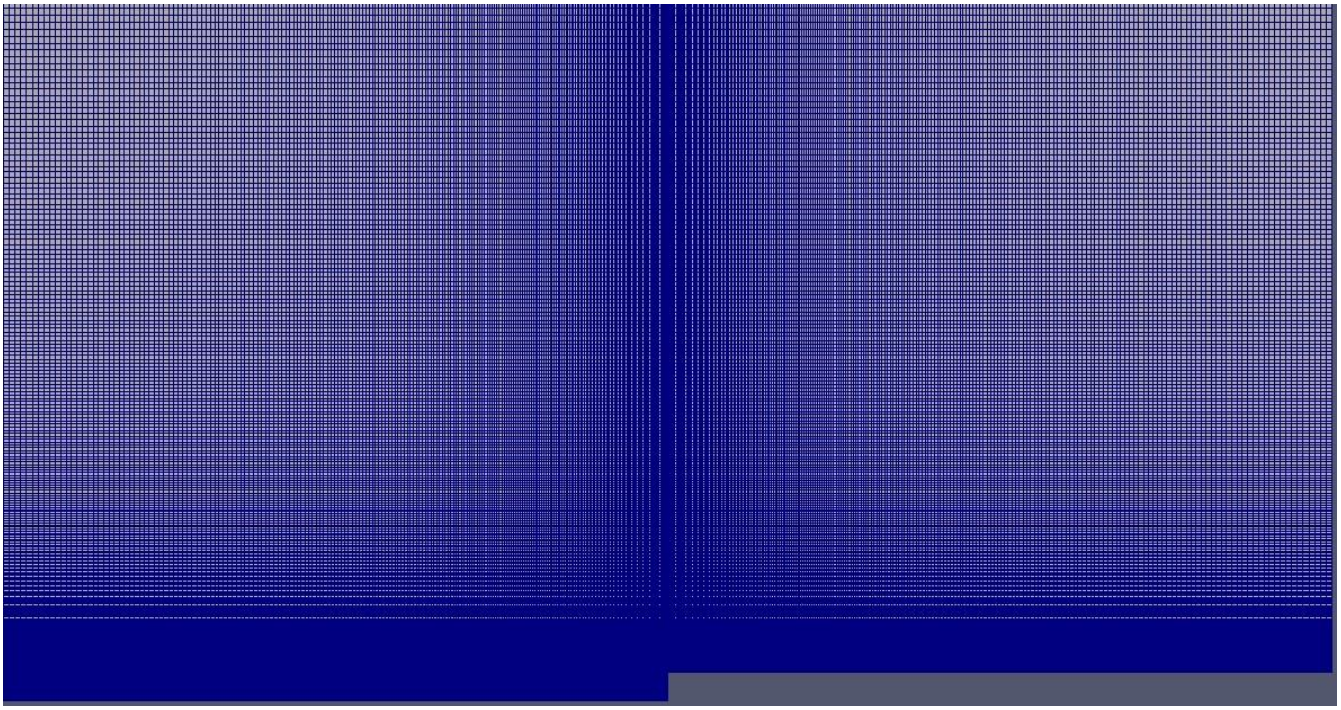


Рисунок 2. Разбиение сетки на микроячейки.

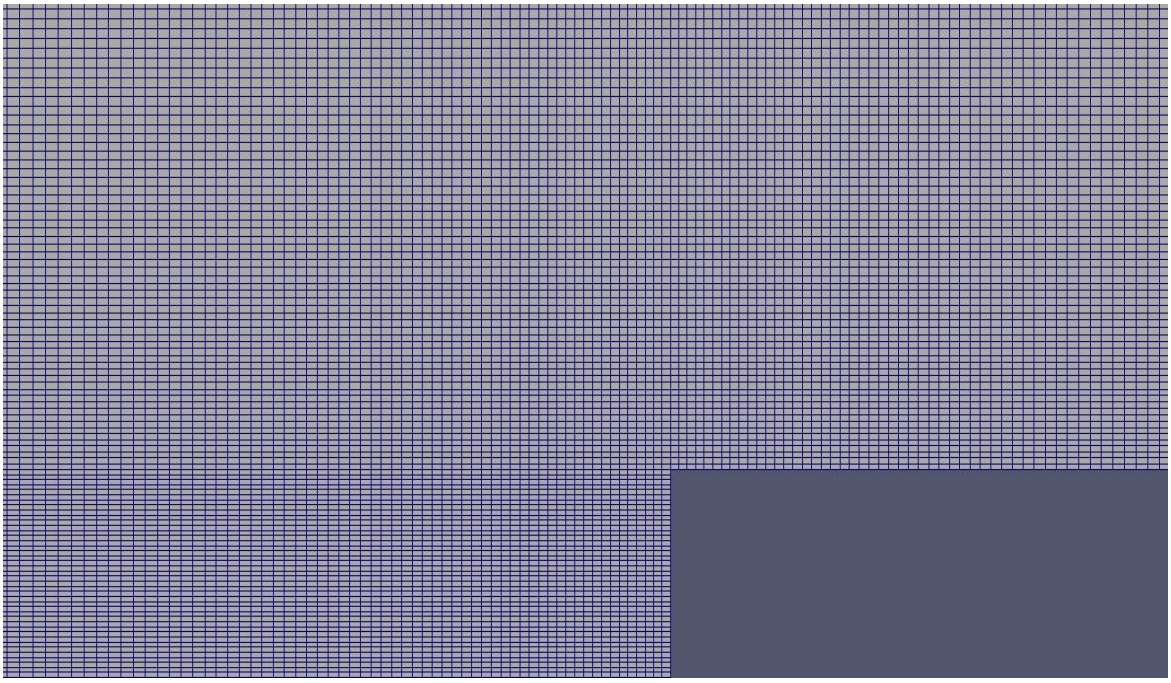


Рисунок 3.Разбиение сетки возле ступеньки.

4. Численное решение.

Дискретизация системы уравнений движения в пакете OpenFOAM проводится по методу конечных объемов (FVM)[5] в декартовой системе координат. Система уравнений в произвольной ячейке записывается в виде:

$$\int_V \frac{\partial U}{\partial t} dV + \int_V \nabla \cdot (\mathrm{UU}) dV = -\int_V \nabla p dV + \frac{2}{\mathrm{Re}} \int_V \Delta U dV$$

$$\int_V \nabla \cdot \mathrm{U} dV = 0$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial t} \right)_p V + \sum_f S_f \cdot (\mathrm{UU})_f = -\sum_f S_f p + \frac{2}{\mathrm{Re}} \sum_f S_f \cdot (\nabla \mathrm{U})_f$$

$$\sum_f S_f \cdot (\mathrm{U})_f = 0_{[5]}$$

5.Дискретизация системы

Слагаемое	Схема аппроксимации в OpenFOAM	Порядок аппроксимации
Производная по времени:	Euler	первый
Градиент давления:	Gausslinear	второй*
Конвективные слагаемые:	GaussGammaV	первый/второй
Лапласиан:	Gausslinearcorrected	второй*

(*) – порядок точности зависит от локальных характеристик сетки.

Для решения системы линейных уравнений для **p** было использован солвер PCG (предварительно сопряженных градиентов). Чтобы задать начальное приближение использовалсясолверGAMG (многосеточный метод с V циклом), со сглаживанием Гаусс-Зейделья.

Для решения системы линейных уравнений для **U**было использовался солвер PBiCG (предварительно бисопряженных градиентов), с солвером DILU (Diagonalincomplite-LU) для начальных приближений [8].

6 Дискретизация граничных условий

Входные граничные условия(patch outlet):

$$U = 1, V = 0, \frac{\partial p}{\partial n} = 0;$$

Выходные граничные услвия(patch inlet):

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0, \frac{\partial v}{\partial n} = 0, p = 0;$$

На верхней и нижней границах ставятся условия проскальзывания(top patch):

$$\frac{dU}{dx} = 0, \frac{dU}{dy} = 0, \frac{dp}{dy} = 0;$$

На границе ромба ставятся условия не протекания(fixewalls):

$$u = 0, v = 0, \frac{dp}{dn} = 0$$ [4]

7. Решение дискретной задачи

Для решения результирующей дискретной задачи используется программа icoFoam, реализующая алгоритм PISO (PressureImplicitSplittOperator). Основные этапы алгоритма:

1. Вычисление потоков F.
2. Неявное вычисление предиктора нового поля скоростей U.
3. Цикл коррекции:

3.1. Вычисление нового поля давления p.

3.2. Коррекция поля скоростей U[6].

8. Результаты выполнения программы OpenFOAM.

Течение по обратной ступеньке рассматривалось для чисел Рейнольдса 100-1000 в зависимости от времени. На рисунках показана эволюция поля завихренности со временем при Re=200, 300, 500, 1000.

Рис 4.1 Re=200, t=15

Рис 4.2 Re=200, t=32

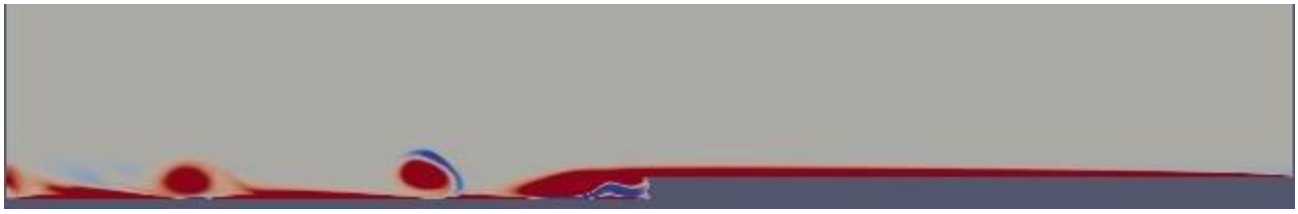


Рис 4.3 Re=200, t=56

Рис 4.4 Re=200, t=79

Рис5.1 Re=300, t=12

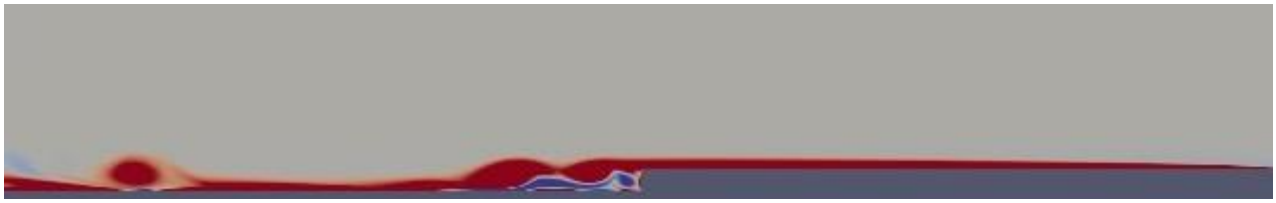


Рис 5.2 Re=300, t=27

Рис 5.3 Re=300, t=72

Рис 6.1 Re=500, t=15

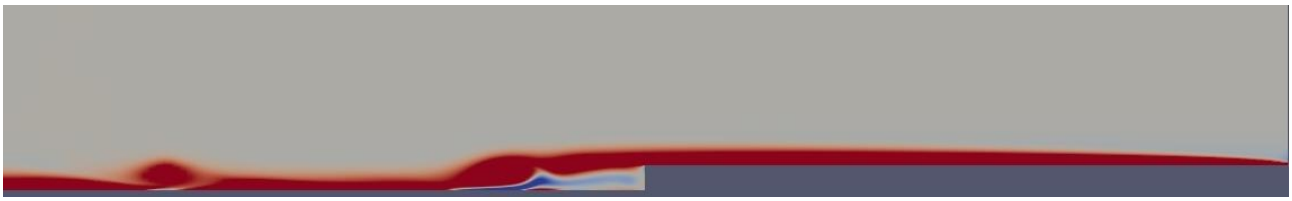


Рис 6.2 Re=500, t=42

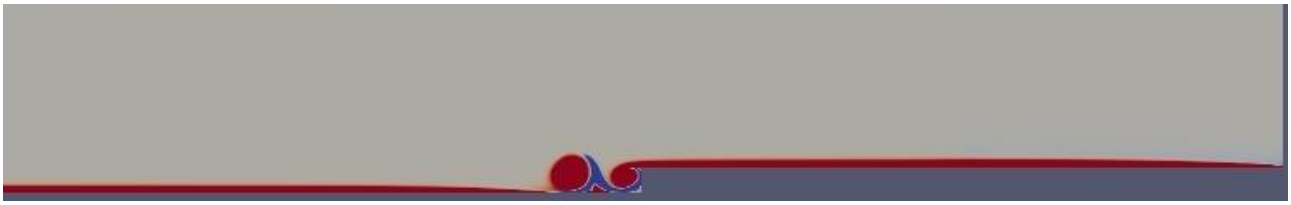


Рис 7.1 Re=1000, t=13

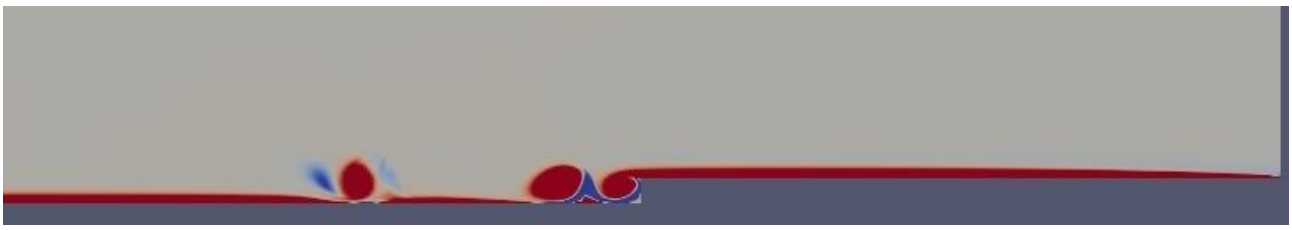


Рис 7.2 Re=1000, t=26

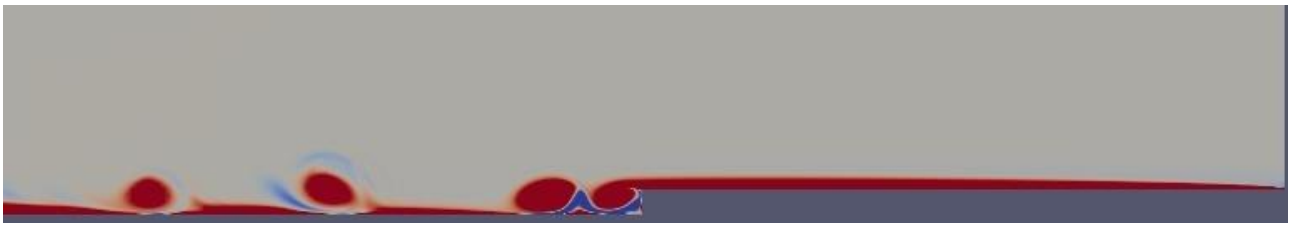


Рис7.3 Re=1000, t=39

Рис 7.4 Re=1000, t=53

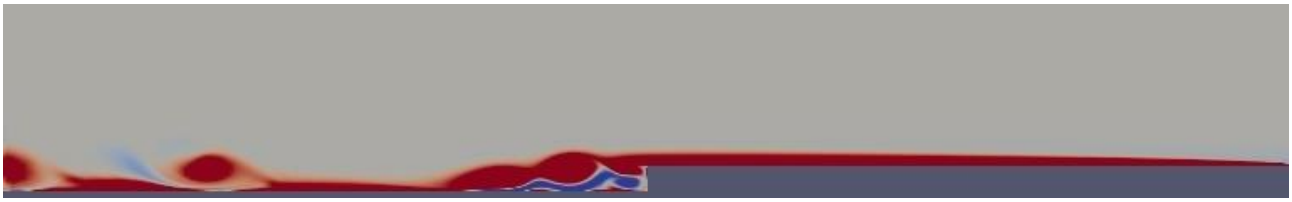


Рис 7.5 Re=1000, t=73

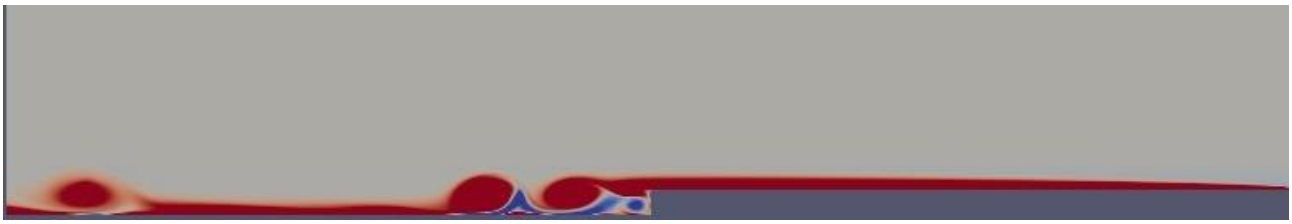


Рис 7.6 Re=1000, t=81

Рис 7.7 Re=1000, t=98

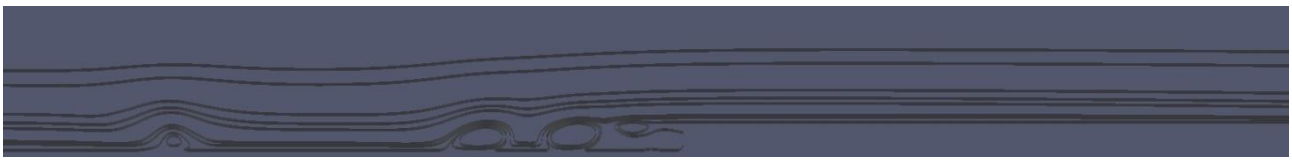


Рис 8.0. Линии тока при Re=1000, t=50

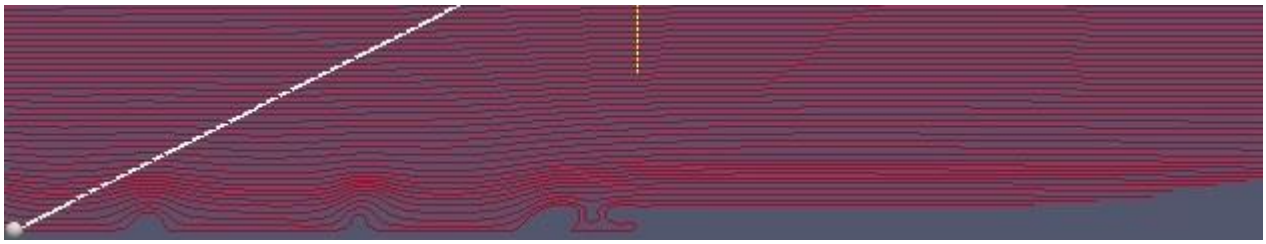


Рис 9.1 Линии тока при Re=500, t=17

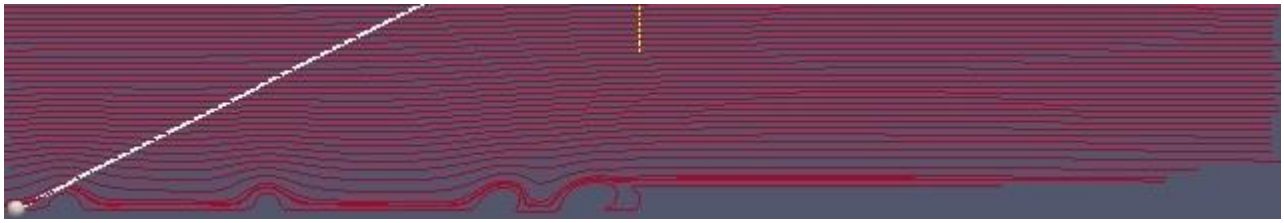


Рис 9.2. Линии тока при Re=500, t=32

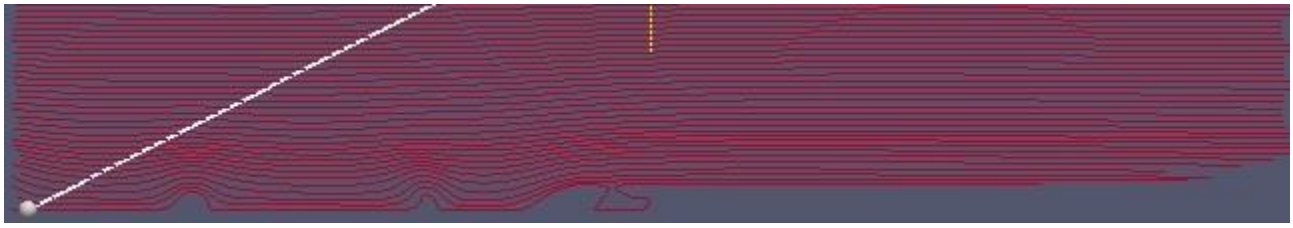


Рис 9.3. Линии тока при Re=500, t=64

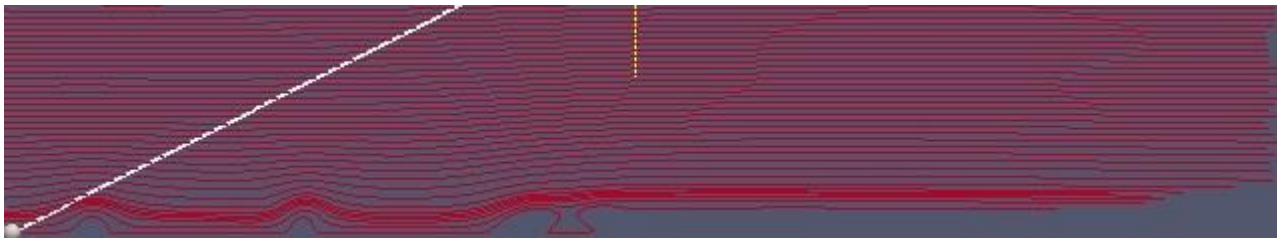


Рис 9.4. Линии тока при Re=500, t=89

9.Заключение

Предыдущие исследования углубленного анализа экспериментальных данных предоставило большинство результатов, используемых для сравнения в настоящем исследовании. Так же проведены аналогичные эксперименты и получены аналогичные результаты. Эти эксперименты дали полезные данные для сравнения и проверки численных схем. В дальнейшем мы можем подытожить отношения между положением точки разделения и числа Рейнольдса. Значения для разделения и присоединения точки, полученные в этом исследовании, сравнить достаточно хорошо с опубликованными числовыми данными. Результаты данной работы начинают отличаться от экспериментальных данных при числах Рейнольдса, где трехмерные эффекты становятся важными. Общая тенденция в ламинарном результате этого анализа несколько ниже значений отрыва и присоединения точки отрыва, чем по сравнению с другими численными исследованиями. Эту разница с нынешними результатами для ламинарного потока можно отнести к области методов и сетки, используемые для выполнения численных расчетов. Нестационарные методы итерации, большой промежуток времени, как правило, используются для ламинарного случая, потому сходимости вопросов. Исходя из вычисленных данных, видно, что данные совпадают с экспериментальными.

Литература

[1]A. Sohankar, C. Norberg and L. Davidson,Low-reynolds-number flow around a square cylinder at incidence: study of blockage, onset of vortex shedding and outlet boundary condition. International journal for numerical methods in fluids, (1998).

[2] A. Sohankar, C. Norberg and L. Davidson, `Numerical simulation of unsteady low-Reynolds number flow around a rectangular cylinder at incidence', Proc. 3rd Int. Colloq. on Bluff Body Aerodynamics and Applications, VA, 1996.

[3] T. G. Zaki, M. Sen and M. Gad-El-Hak, `Numerical and experimental investigation of flow past a freely rotational square cylinder', J. Fluids Struct., 8, 555 (1994).

[4]А.Б.Мазо, К.А.Поташев. Гидродинамика, учебное пособие для студентов нематематических факультетов, страницы 21-37. 2008.

[5] Р.Темам. Уравнение Навье-Стокса, теория и численный анализ. , страницы 41-119. 1979

[6] Аэродинамика. Учебное пособие. Под ред.В.Т.Калугина. – МГТУ имени Н.Э. Баумана, 378 стр. 2010.

[7] Девнин С.И. Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций.- Судостроение, 1983. 320 с.

[8] C.P. Green, J.E. Sader, Small amplitude oscillations of a thin beam immersed in a viscous fluid near a solid surface, Physics of Fluids 17 (2005) 073102

[9] Weller H.G., Tabor G., Jasak H., Fureby C. «A tensorial approach to computational continuum mechanics using object oriented techniques», Computers in Physics, — 1998. — vol.12, — № 6. P. 620-631

[10] Ferziger J.H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics.Springer-Verlag, 1997. — 364 p.

Приложения

Листинг текстового файла blockMesh

BlockMesh файл для определения сетки ступени

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\

| ========= | |

| \\ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |

| \\ / O peration | Version: 2.1.1 |

| \\ / A nd | Web: www.OpenFOAM.org |

| \\/ M anipulation | |

\*---------------------------------------------------------------------------*/

FoamFile

{

 version 2.0;

 format ascii;

 class dictionary;

 object blockMeshDict;

}

// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

convertToMeters 1.0;

vertices

(

 (0 0 0)//0

 (25 0 0)//1

 (25 1 0)//2

 (50 1 0)//3

 (50 25 0)//4
```

```
 (0 25 0)//5
 (0 0 1)//6
 (25 0 1)//7
 (25 1 1)//8
 (50 1 1)//9
 (50 25 1)//10
 (0 25 1)//11
 (0 1 0)//12
 (0 1 1)//13
 (25 25 0)//14
 (25 25 1)//15
);
blocks
(
 hex (0 1 2 12 6 7 8 13) (150 30 1)simpleGrading (0.2 1 1)
 hex (12 2 14 5 13 8 15 11) (150 160 1) simpleGrading (0.2 10 1)
 hex (2 3 4 14 8 9 10 15) (150 160 1) simpleGrading (5 10 1)
);
boundary
(
 top
 {
 type wall;
 faces
 (
```

```
(5 11 15 14)
(14 15 10 4)
);
}
inlet
{
type patch;
faces
(
(0 12 13 6)
(5 11 13 12)
);
}
outlet
{
type patch;
faces
(
(4 10 9 3)
);
}
fixedWalls
{
type wall;
faces
```

```
(
(2 8 7 1)
(3 2 8 9)
(1 0 6 7)
);
}
frontAndBack
{
type empty;
faces
(
);
}
mergePatchPairs
(
);
//
*****************************************************************
***** //
```

Результаты выполнения команды строении сетки (blockMesh)

Результат после запуска blockMesh файла:

Overall number of cells of each type:

hexahedra: 52500 количество ячеек

prisms: 0

wedges: 0

pyramids: 0

tet wedges: 0

tetrahedra: 0

polyhedra: 0

Checking topology...

Boundary definition OK. //Граничное определение хорошо.

Cell to face addressing OK. //Клетка, чтобы стоять перед адресацией хорошо.

Point usage OK. //Использование пункта хорошо.

Upper triangular ordering OK. //Верхний треугольный заказ хорошо.

Face vertices OK. // Вершины лица хорошо.

Number of regions: 1 (OK). //Число областей: 1 (хорошо).