



Школа-семинар *«ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ* *OpenFOAM, SALOME и ParaView»*

ПАКЕТ OPENFOAM: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ МСС

М.В. Крапошин (НИЦ Курчатовский институт)

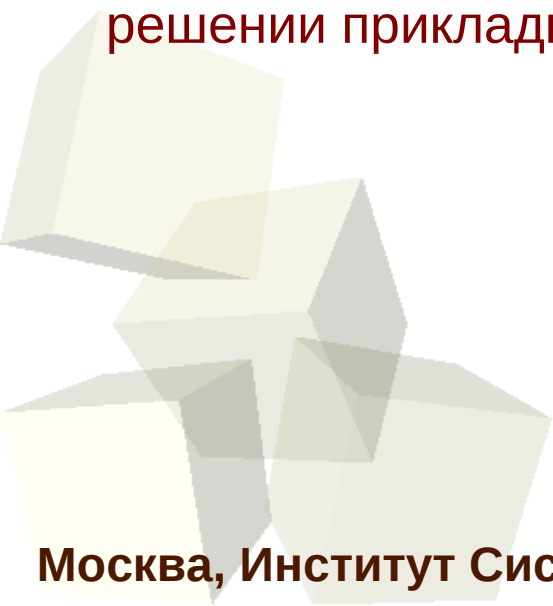
О.И. Самоваров (Институт системного программирования РАН)

С.В. Стрижак (ГОУ ВПО МГТУ им. Баумана)



OPENFOAM. СОДЕРЖАНИЕ

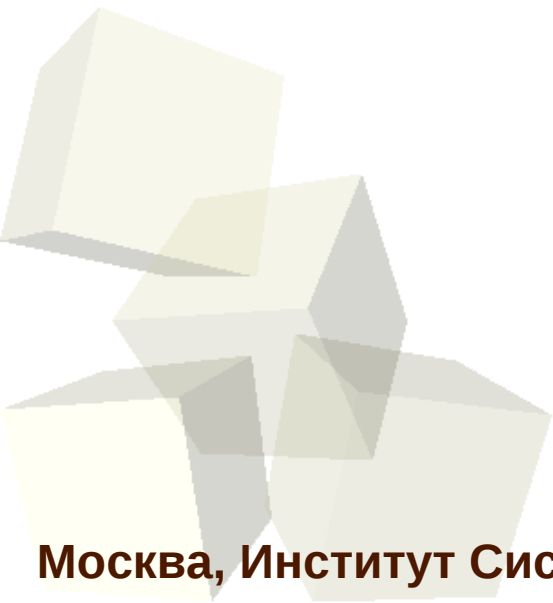
- OpenFOAM, основные уравнения ВГД
- Метод конечных объёмов
- Структура и средства OpenFOAM — выбор решателя пользователем, выбор необходимых утилит для обработки данных
- Используемые в OpenFOAM численные методы
- Моделирование турбулентности — RAS, LES, пристеночные функции
- Некоторые вопросы практического использования OpenFOAM при решении прикладных задач





OpenFOAM — Это:

- Среда разработки и численного решения задач Механики Сплошных Сред.
- Основной язык программирования — C++
- Операционная система — любая POSIX совместимая
- Полностью модульная платформа, реализующая метод конечных объёмов для решения дифференциальных уравнений в частных производных





Основные уравнения

- Основные уравнения: законы сохранения массы, импульса, скаляров и объема в интегральной форме (справедливы для любой сплошной среды – различаются только замыкающие законы):

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_S \rho(\mathbf{v} - \mathbf{v}_b) \cdot \mathbf{n} dS = 0$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{v} dV + \int_S \rho \mathbf{v}(\mathbf{v} - \mathbf{v}_b) \cdot \mathbf{n} dS = \int_S (\mathbf{T} - p\mathbf{I}) \cdot \mathbf{n} dS + \int_V \rho \mathbf{b} dV$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_S \rho \phi(\mathbf{v} - \mathbf{v}_b) \cdot \mathbf{n} dS = \int_S \Gamma \nabla \phi \cdot \mathbf{n} dS + \int_V \rho b_\phi dV$$

$$\frac{d}{dt} \int_V dV - \int_S \mathbf{v}_b \cdot \mathbf{n} dS = 0$$



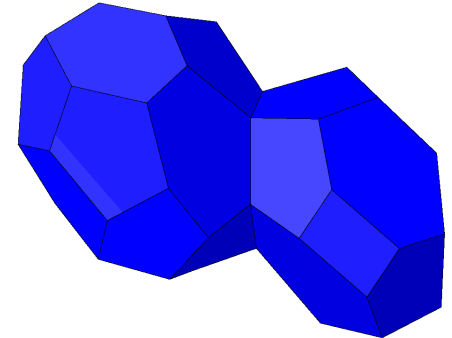
OPENFOAM. СОДЕРЖАНИЕ

- OpenFOAM, основные уравнения ВГД
- Метод конечных объёмов
- Структура и средства OpenFOAM — выбор решателя пользователем, выбор необходимых утилит для обработки данных
- Используемые в OpenFOAM численные методы
- Моделирование турбулентности — RAS, LES, пристеночные функции
- Некоторые вопросы практического использования OpenFOAM при решении прикладных задач



Метод конечных объемов, I

- Метод конечных объемов (FVM) используется для аппроксимации законов сохранения
- Вычислительная область разбивается на конечное число непересекающихся контрольных объемов произвольной многогранной формы
- **Структура данных:**
 - **Вершины**
 - **Ребра (соединяют вершины)**
 - **Грани (замкнутый многоугольник из ребер)**
 - **Ячейки (объемы ограниченные гранями)**





Метод конечных объемов, II

- В методе конечных объемов используются три уровня аппроксимации:
 - Аппроксимация интегралов по поверхности, объему и времени
 - Интерполяция в точках, отличных от расчетных (центры контрольных объёмов)
 - Численное дифференцирование (аппроксимация градиентов)
- Простейшие аппроксимации второго порядка точности (применимые для контрольного объема произвольной формы):
 - Метод средней точки для интегралов (Midpoint rule);
 - Линейная интерполяция;
 - Центральные разности (линейные функции формы).



Метод конечных объемов в OpenFOAM

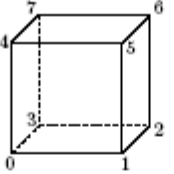
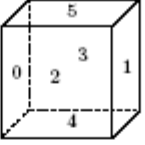
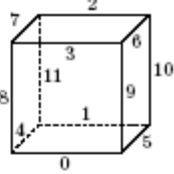
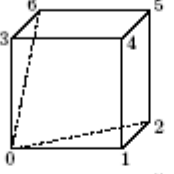
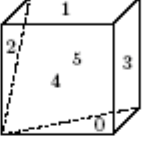
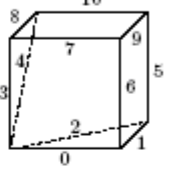
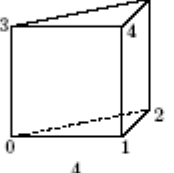
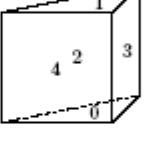
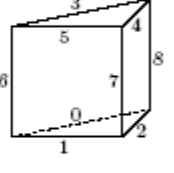
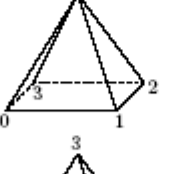
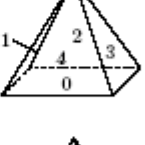
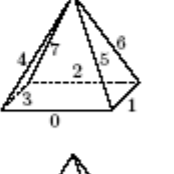
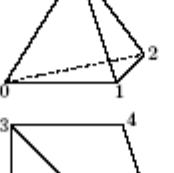
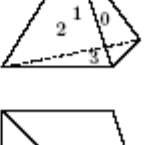
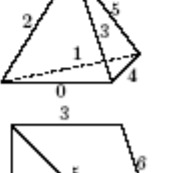
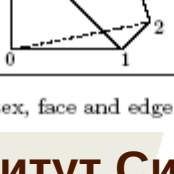
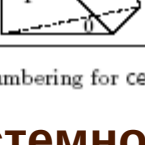
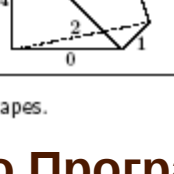


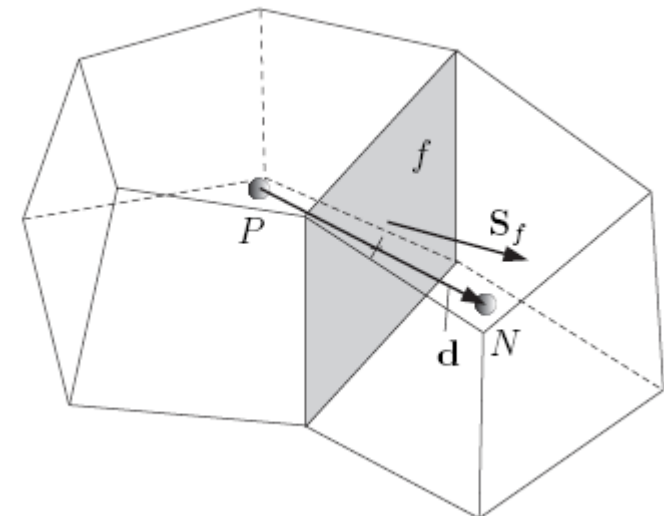
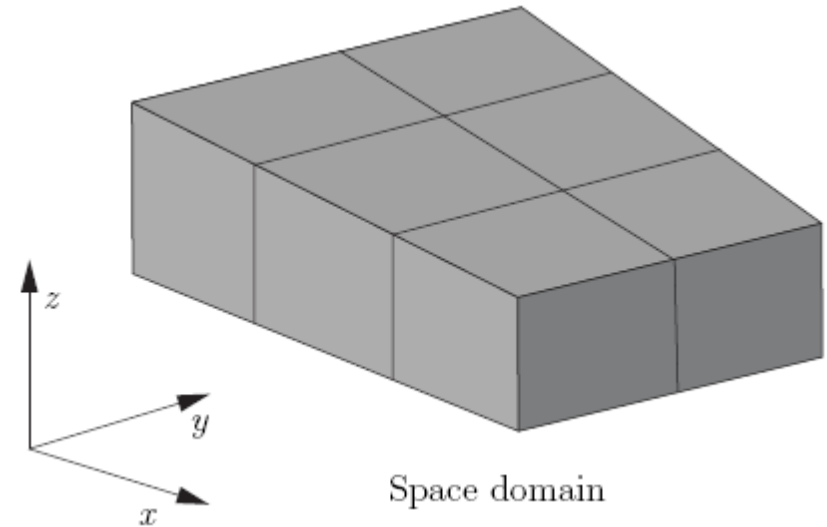
Cell type	Keyword	Vertex numbering	Face numbering	Edge numbering
Hexahedron	hex			
				
				
Wedge	wedge			
				
				
Pyramid	pyr			
Tetrahedron	tet			
Tet-wedge	tetWedge			

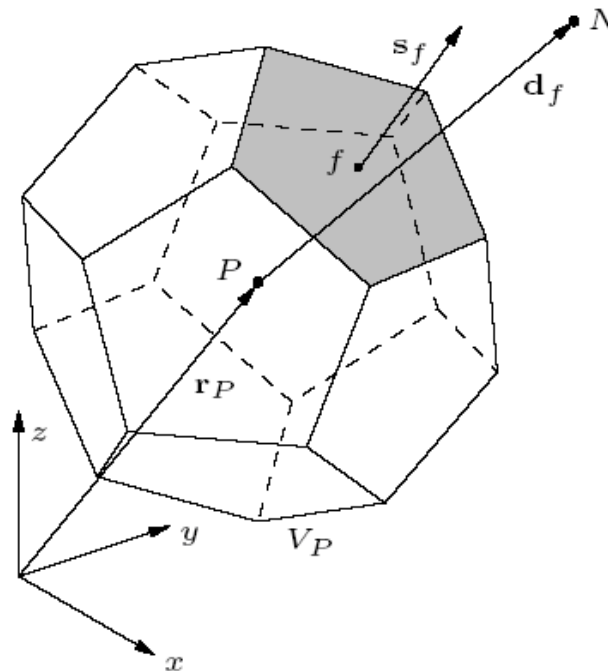
Table 5.1: Vertex, face and edge numbering for cellShapes.





Произвольный контрольный объём в OpenFOAM

Computational Cell



- This is a convex polyhedral cell boundary be a set of convex polygons
- Point P is the computational point located at cell centroid \mathbf{x}_P . The definition of the centroid reads:

$$\int_{V_P} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_P) dV = 0$$



МКО. Основы метода. Расчетная ячейка

- Объем ячейки – V_p
- Узел P располагается в центре ячейки x_p
- Для каждой ячейки существует ячейка-сосед, граничащая с каждой стороной. Соседняя ячейка – N
- Центр стороны – f . Используется теорема о среднем
- Вектор к стороне f определяется как $D_f = PN$
- Поверхностный вектор S_f равен величине площади стороны
- S_f рассчитывается с помощью интеграла
- Центр ячейки (узел P) должен находиться внутри ячейки
- Объем ячейки и площадь стороны рассчитываются путем декомпозиции на пирамиды и треугольники
- Типы сторон в сетке: внутренние и граничные
- Дискретизация базируется на интегральной форме транспортного уравнения для каждой ячейки

Литература. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М., Энергоатомиздат, 1984, 152 с.



Метод решения, I

- Конвективные потоки требуют линеаризации:

$$F_k^c = \int_{S_k} \rho \phi \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = \bar{\phi}_k \int_{S_k} \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS \approx \phi_k \dot{m}_k$$

- Отложенная коррекция (“deferred correction”) используется для упрощения применения схем высокого порядка, для неортогональных сеток и т.д.

$$F_k = F_k^l + \gamma (F_k^h - F_k^l)^{\text{old}}$$

- Градиенты аппроксимируются с помощью формулы Гаусса-Остроградского или с помощью полиномов

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right)_P \approx \frac{\sum_k \phi_k S_k^i}{\Delta V} \quad \phi_{N_k} - \phi_C \approx (\nabla \phi)_C \cdot (\mathbf{r}_{N_k} - \mathbf{r}_C)$$



Метод решения, II

- Для каждой ячейки получается одно алгебраическое уравнение, связывающее значение переменной в центре ячейки с переменными в соседних ячейках
- Для всей вычислительной области получается система линейных уравнений
- Используется связанный (*"coupled"* - все переменные образуют один вектор неизвестных) или последовательный (*"segregated"* - уравнения для каждой переменной решаются по очереди) метод решения
- В последовательном методе решения для связи скорости, давления и плотности используются алгоритмы PISO или SIMPLE
- Системы линейных уравнений решаются либо методом сопряженных градиентов, либо алгебраическим многосеточным методом



OPENFOAM. СОДЕРЖАНИЕ

- OpenFOAM, основные уравнения ВГД
- Метод конечных объёмов
- Структура и средства OpenFOAM — выбор решателя пользователем, выбор необходимых утилит для обработки данных
- Используемые в OpenFOAM численные методы
- Моделирование турбулентности — RAS, LES, пристеночные функции
- Некоторые вопросы практического использования OpenFOAM при решении прикладных задач



Иерархия средств OpenFOAM

Одно из преимуществ OpenFOAM — гибкая ориентация на пользователя:

- Продвинутому пользователю и разработчику — средства решения задач механики сплошных сред в виде классов C++.
- Инженеру — набор небольших программ (решателей и утилит), предназначенных для решения задач узкого круга (и соответственно, ограниченным набором исходных данных)





Иерархия решателей (моделей МСС) OpenFOAM

\$FOAM_APP/solvers

DNS

Прямое численное моделирование

basic

Простейшие уравнения

combustion

Задачи с горением

compressible

Сжимаемые задачи (в т.ч. с $M=1$ и $M>1$)

discreteMethods

Дискретные методы

electromagnetics

Гидро- электромагнетизм

financial

Экономические

heatTransfer

Тепло- и массо- обмен

incompressible

Несжимаемые течения

lagrangian

Течение жидкости с учетом движения отдельных частиц

multiphase

Многофазные течения

stressAnalysis

Анализ прочности

Здесь:

- 1) решатель — численная модель интегрирования дифференциальных уравнений в частных производных, основанная на методе конечного объема (в отличие от метода решения системы линейных алгебраических уравнений);
- 2) показаны имена папок с исходным кодом различных решателей, объединенных по классу задачи



Выбор решателя пользователем (I)

Основываясь на приведенной выше диаграмме пользователь должен определиться с выбором решателя. На первом этапе выбирается класс задачи, затем конкретизируется общая система уравнений — тип задачи (из одного общего класса)

Класс задачи	Описание
DNS	Прямое численное моделирование течения несжимаемой жидкости (dnsFoam)
basic	Простейшие задачи (потенциальное течение, транспорт скаляра)
combustion	Задачи с горением и химическими реакциями (например, сжиганием топлива в двигателе)
compressible	Турбулентное течение сжимаемых сред (дозвуковые, транзвуковые и сверхзвуковые)
discreteMethods	Задачи с использованием дискретных методов (например Монте-Карло) для исследования течения жидкостей
electromagnetics	Задачи магнитогидродинамики
financial	Экономические задачи (например, уравнение Блэка-Шоулза)
heatTransfer	Турбулентное течение жидкости с теплообменом и учетом плавучести
incompressible	Турбулентное течение несжимаемой жидкости
lagrangian	Течение жидкостей с примесями, представленными частицами Лагранжа
multiphase	Движение многофазных частиц, в том числе с фазовыми превращениями
stressAnalysis	Задачи анализа прочности с использованием метода конечного объёма



Выбор решателя пользователем (II) - basic

Определившись с классом задачи, можно перейти к выбору решателя. Решатели именуются следующим образом: <prefix><suffix>, где
<suffix> - всегда «Foam»
<prefix> - начинается со строчной буквы и содержит краткое название задачи и используемый метод интегрирования, например:

Имя решателя	Описание
Решатели из класса задач basic	
laplacianFoam	Решение уравнения Лапласа
potentialFoam	Течение невязкой несжимаемой жидкости в потенциальном приближении
scalarTransportFoam	Решение уравнения транспорта

Описание модели можно восстановить:

- а) по исходному коду — в папке каждого приложения имеется .C файл с таким же как и у программы именем, в котором содержится основной алгоритм действий на языке C++
- б) по комментариям — в основном файле исходного кода .C (см. п. а) имеются комментарии, содержащие описание модели и предназначение программы
- в) по руководствам (\$WM_PROJECT_DIR/doc/Guides-a4) — UserGuide.pdf, ProgrammersGuide.pdf



Выбор решателя пользователем (III) - incompressible

Имя решателя	Описание
Решатели из класса задач incompressible (течения несжимаемых сред)	
boundaryFoam	Течение одномерного турбулентного потока (для определения параметров турбулентности на границе)
channelFoam	LES-модель течения несжимаемой среды в каналах
icoFoam	Ламинарное течение несжимаемой вязкой среды
nonNewtonianIcoFoam	Течение несжимаемой вязкой не-Ньютоновской среды
pimpleDyMFoam	Турбулентное течение с деформирующейся сеткой, используется алгоритм PIMPLE (PISO-SIMPLE) связи скорости и давления
pimpleFoam	Турбулентное течение жидкости, используется алгоритм связи скорости и давления PIMPLE
pimpleFoam	Турбулентное течение жидкости, используется алгоритм связи скорости и давления PISO
porousSimpleFoam	Стационарное течение турбулентной жидкости (SIMPLE) в пористом теле
shallowWaterFoam	Движение невязкой среды в поле сил тяжести
simpleFoam	Стационарное течение турбулентной жидкости (SIMPLE)



Некоторые стандартные решатели в OpenFOAM, I

- 1) boundaryFoam – 1D решатель для создания пограничного слоя
- 2) icoFoam – решатель для несжимаемого, ламинарного потока
- 3) laplacianFoam – решение уравнение Лапласа
- 4) rhoCentralFoam - решатель для невязкого сжимаемого потока central-upwind schemes of Kurganov and Tadmor
- 5) simpleFoam - решатель для стационарного несжимаемого, турбулентного потока. Алгоритм SIMPLE.
- 6) pisoFoam – решатель для нестационарного несжимаемого турбулентного потока. Алгоритм PISO.
- 7) sonicFoam - решатель для нестационарного сжимаемого турбулентного потока.
- 8) buoyantSimpleFoam – решатель для моделирования конвективных потоков
- 9) fireFoam – решатель для моделирования турбулентного пламени
- 10) dsmcFoam DSMC= Direct Simulation Monte-Carlo – решатель для моделирования динамики разряженного газа
- 11) channelFoam – LES solver for channel only
- 12) dnsFoam – прямое численное моделирование изотропной турбулентности



Некоторые стандартные решатели в OpenFOAM, II

- 13) pimpleFoam - Large time-step transient solver for incompressible, flow using the PIMPLE (merged PISO-SIMPLE) algorithm
- 14) pimpleDymFoam - Transient solver for incompressible, flow of Newtonian fluids on a moving mesh using the PIMPLE (merged PISO-SIMPLE) algorithm
- 15) nonNewtonianicoFoam – icoFoam для неньютоновских жидкостей
- 16) MRFsimpleFOAM – решатель для вращающихся сеток
- 17) rhoPisoFoam – Transient PISO solver for compressible, laminar or turbulent flow
- 18) rhoPimpleFoam - Transient solver for laminar or turbulent flow of compressible fluids for HVAC and similar applications
- 19) rhoSimpleFoam - Steady-state SIMPLE solver for laminar or turbulent RANS flow of compressible fluids
- 20) rhoSonicFoam - Density-based compressible flow solver
- 21) sonicDymSonic - Transient solver for trans-sonic/supersonic, laminar or turbulent flow of a compressible gas with mesh motion
- 23) rhoPoroussimpleFoam - Steady-state solver for turbulent flow of compressible fluids with RANS turbulence modelling, and implicit or explicit porosity treatment
- 24) rhoReactingFoam - Density-based thermodynamics variant of the reactingFoam solver



Иерархия утилит OpenFOAM

`$FOAM_APP/utilities`

errorEstimation

Оценка погрешности численного решения уравнений

mesh

Утилиты для работы с сеткой

miscellaneous

Разнообразные утилиты, не отнесенные к другим группам

parallelProccesing

Декомпозиция и сбор расчетной области при параллельных вычислениях

postProcessing

Обработка результатов расчетов

preProcessing

Подготовка исходных данных

surface

Работа с поверхностями сеток

thermophysical

Расчет термодинамических параметров

Каждый из этих широких классов может включать в себя некоторые более узкие подклассы, как например в случае с mesh. Именование утилит производится по той же схеме, что и у решателей: в конце имени обязательно суффикс «Foam», а в начале — со строчной буквы название выполняемых операций. И также, как и в случае с решателями, описание можно найти в .C файлах



Подкласс утилит mesh в OpenFOAM

Рассмотрим имеющиеся в OpenFOAM возможности работы с расчетной сеткой

`$WM_PROJECT_DIR/utilities/mesh`

advanced

Изменение топологии сетки (например, измельчение в пограничном слое)

conversion

Преобразование сторонних форматов к формату OpenFOAM, конвертация из OpenFOAM в другие форматы

generation

Генерация сетки (blockMesh, snappyHexMesh), вытягивание 2D сетки в 3D

manipulation

Создание и удаление границ, областей сетки, работа с примитивами (ячейками, гранями, ребрами и узлами), деформация сетки



Основные утилиты



- foamInstallationTest – проверка инсталляции OF
- checkMesh -allTopology -all Geometry – проверка сетки
- mirrorMesh – построение зеркальной сетки
- makeAxialMesh -axis ... -wedge ... -
- foamLog log – скрипт, использующий grep, awk, sed, для извлечения данных из log файла.
- foamJob <solver> - утилита для контроля заданий
- yPlusRAS/yPlusLES – определение значения yPlus для RANS/ LES
- foamCalc – расчет различных параметров поля
- Mach – расчет локального числа Маха в каждый момент времени
- streamFunction – рассчитывает линии тока по значениям U
- particleTracks - generate particle tracks for lagrangian calculations.
- decomposePar – декомпозиция расчетной области
- reconstructPar – объединение расчетных областей
- fluentMeshToFoam, fluent3DMeshToFoam – трансляция сетки из формата Fluent
- Sample – построение графиков
- Gnuplot – построение графиков с помощью доп. утилиты Linux
- foamToVTK – подготовка файлов для обработки в Paraview в формате VTK
- pyFoam – построение графиков во время счета. Утилита написана на Python.
- polyDualMesh – утилита для построения сеток на базе многогранников



OPENFOAM. СОДЕРЖАНИЕ

- OpenFOAM, основные уравнения ВГД
- Метод конечных объёмов
- Структура и средства OpenFOAM — выбор решателя пользователем, выбор необходимых утилит для обработки данных
- Используемые в OpenFOAM численные методы
- Моделирование турбулентности — RAS, LES, пристеночные функции
- Некоторые вопросы практического использования OpenFOAM при решении прикладных задач



Используемые в OpenFOAM численные методы

Структура OpenFOAM является полностью модульной, каждый этап численного решения базовых уравнений выносится в отдельный модуль:

- Дискретизация расчётной области (создание сетки)
- Дискретизация уравнений по времени и пространству
- Методы решения систем линейных алгебраических уравнений
- Граничные условия (в том числе пристеночные функции)
- Модели турбулентности (Reynolds-Averaged Stresses, Large Eddy Simulation)
- Контроль качества сетки
- Контроль сходимости решения



Схемы дискретизации в OpenFOAM

Дискретизация конвективных членов:

Центральные схемы:

- Linear – central differencing (CD) (Second order, unbounded)
- Midpoint

Схемы по потоку:

- Upwind differencing (UD) (First order, bounded)
- LinearUpwind
- skewLinear
- QUICK (First/second order, bounded)

Схемы минимизации полной вариации - TVD:

- LimitedLinear
- vanLear
- MUSCL
- limitedCubic

Схемы нормализации переменных (NVD – normalized variable diagram)

- SFCD (self-filtered central differencing)
(Second order, bounded)
- Gamma & GammaV (Схемы Н.Jasak)
(First/second order, bounded)

Схемы дискретизации по времени:

- Эйлера (1и 2 порядок);
- Кранка-Никольсона (2 порядок);
- Обратная (backward);
- Ограниченная обратная

Схемы дискретизации диффузионных членов:

- Gauss linear – 2 порядок
- Gauss limited linear
- leastSquares
- Fourth – 4 порядок

Более 50 различных комбинаций
расчетных схем



Схемы дискретизации для неструктурированных сеток

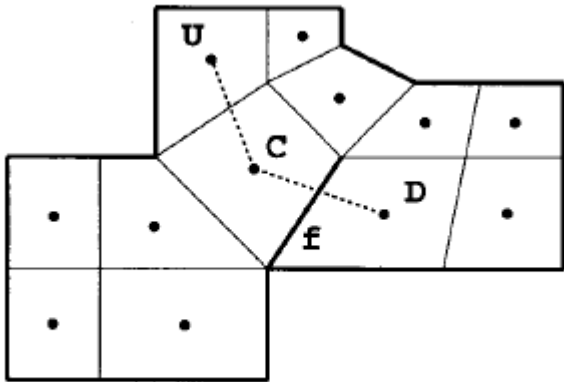


Figure 1. Unstructured quadrilateral mesh.

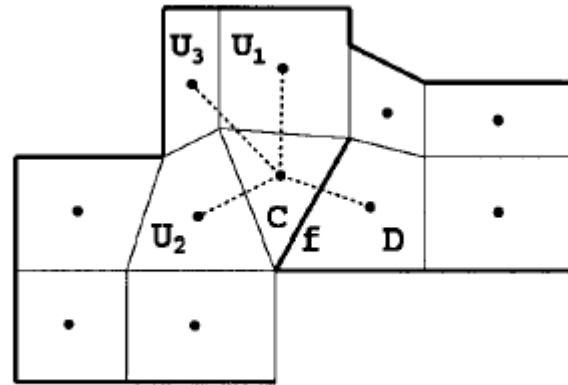


Figure 2. Arbitrarily unstructured mesh.

- Центральная схема. Второй порядок точности, но дает осцилляции
- Схемы, учитывающие транспортные свойства течения. Информация поступает из области вверх по потоку. Отсутствие осцилляций. Но могут быть внесены неточности расчета — высокая численная диффузия, 1-ый порядок точности
- Существует большое количество точных схем: TVD, NVD семейство (как выбирать значения «против потока»?)



Методы решения систем линейных алгебраических уравнений

Для симметричных матриц:

- метод сопряженных градиентов с предобуславливанием;
- алгебраический многосеточный метод – GAMG (для p).



Для несимметричных матриц:

- метод би-сопряженных градиентов с предобуславливанием - BiCG;
- метод Гаусса-Зейделя.

Возможно использование следующих предобуславливателей:

- LU — разложения;
- Методом Холецкого;
- многосеточный метод;
- и другие.



Описание метода сопряжённых градиентов

Постановка задачи

Решение систем линейных алгебраических уравнений – классическая задача вычислительных методов.

Особый интерес представляют матрицы разреженного вида, которые получаются в результате конечно-разностной, конечно-элементной или конечно-объемной аппроксимации.

Такие матрицы приходится хранить в каком-то особом формате, так как даже при аппроксимации небольших задач размерность матрицы системы становится непосильной задачей для современных параллельных компьютеров.

В рамках работы остановимся на решении СЛАУ итерационными методами, где основной операцией является умножение матрицы на вектор.

В качестве метода решения рассмотрим метод сопряжённых градиентов с диагональным предобуславливанием для ускорения сходимости системы уравнений.

В качестве аппроксимации будем рассматривать метод конечных объемов.

Будем строить следующий вычислительный алгоритм МСГ:

$$r^0 = f - Ax^0$$

$$z^0 = d^{-1}r^0$$

Далее для $k=1,2,\dots$ производятся следующие вычисления:

$$\alpha_k = \frac{(d^{-1}r^{k-1}, r^{k-1})}{(Az^{k-1}, z^{k-1})}$$

$$x^k = x^{k-1} + \alpha_k z^{k-1}$$

$$r^k = r^{k-1} - \alpha_k Az^{k-1}$$

$$\beta_k = \frac{(d^{-1}r^k, r^k)}{(d^{-1}r^{k-1}, r^{k-1})}$$

$$z^k = d^{-1}r^k + \beta_k z^{k-1}$$

Выход из итерационного процесса будем осуществлять по достижении большого количества итераций или по достижению малости относительной невязки:

$$\frac{\|r\|}{\|f\|} < \varepsilon$$



OPENFOAM. СОДЕРЖАНИЕ

- OpenFOAM, основные уравнения ВГД
- Метод конечных объёмов
- Структура и средства OpenFOAM — выбор решателя пользователем, выбор необходимых утилит для обработки данных
- Используемые в OpenFOAM численные методы
- Моделирование турбулентности — RAS, LES, пристеночные функции
- Некоторые вопросы практического использования OpenFOAM при решении прикладных задач



Модели турбулентности (RAS)

- | | |
|-------------------------|--|
| 1) kEpsilon | Standard high- Re $k - \epsilon$ model |
| 2) kOmega | Standard high- Re $k - \omega$ model |
| 3) kOmegaSST | $k - \omega$ -SST model |
| 4) RNGkEpsilon | RNG $k - \epsilon$ model |
| 5) NonlinearKEShih | Non-linear Shih $k - \epsilon$ model |
| 6) LienCubicKE | Lien cubic $k - \epsilon$ model |
| 7) qZeta | $q - \zeta$ model |
| 8) LaunderSharmaKE | Launder-Sharma low- Re $k - \epsilon$ model |
| 9) LamBremhorstKE | Lam-Bremhorst low- Re $k - \epsilon$ model |
| 10) LienCubicKELowRe | Lien cubic low- Re $k - \epsilon$ model |
| 11) LienLeschzinerLowRe | Lien-Leschziner low- Re $k - \epsilon$ model |
| 12) LRR | Launder-Reece-Rodi RSTM |
| 13) LaunderGibsonRSTM | Launder-Gibson RSTM with wall-reflection terms |
| 14) realizableKE | Realizable $k - \epsilon$ model |
| 15) SpalartAllmaras | Spalart-Allmaras 1-eqn mixing-length model |



Пристеночные функции

Для различных величин:

- nut: nutWallFunction,
- mut: muWallFunction,
- epsilon: epsilonWallFunction,
- omega: omegaWallFunction,
- k, q, R: kqRWallFunction.
- nut – nutSpalartAllmarasWallFunction.



Для температуры:

- alphas: alphasWallFunction.



Подсеточные модели LES

1) Smagorinsky	Smagorinsky model
2) Smagorinsky2	Smagorinsky model with 3-D filter
3) dynSmagorinsky	Dynamic Smagorinsky
4) scaleSimilarity	Scale similarity model
5) mixedSmagorinsky	Mixed Smagorinsky/scale similarity model
6) dynMixedSmagorinsky	Dynamic mixed Smagorinsky/scale similarity model
7) kOmegaSST	$k - \omega$ -SST scale adaptive simulation (SAS) model
8) oneEqEddy	k -equation eddy-viscosity model
9) dynOneEqEddy	Dynamic k -equation eddy-viscosity model
10) locDynOneEqEddy	Localised dynamic k -equation eddy-viscosity model
11) spectEddyVisc	Spectral eddy viscosity model
12) LRDDiffStress	LRR differential stress model
13) DeardorffDiffStress	Deardorff differential stress model
14) SpalartAllmaras	Spalart-Allmaras model
15) SpalartAllmarasDDES	Spalart-Allmaras delayed detached eddy simulation (DDES) model
16) SpalartAllmarasIDDES	Spalart-Allmaras improved DDES (IDDES) model



Методы LES-фильтрации

LES deltas

PrandtlDelta	Prandtl delta
cubeRootVolDelta	Cube root of cell volume delta
smoothDelta	Smoothing of delta

LES filters

laplaceFilter	Laplace filters
simpleFilter	Simple filter
anisotropicFilter	Anisotropic filter

Различные граничные условия для входа потока:
Random fluctuations

Литература. Волков К.Н., Емельянов В.Н.. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. – М.: Физматлит. 2008. – 368 с.



OPENFOAM. СОДЕРЖАНИЕ

- OpenFOAM, основные уравнения ВГД
- Метод конечных объёмов
- Структура и средства OpenFOAM — выбор решателя пользователем, выбор необходимых утилит для обработки данных
- Используемые в OpenFOAM численные методы
- Моделирование турбулентности — RAS, LES, пристеночные функции
- Некоторые вопросы практического использования OpenFOAM при решении прикладных задач



Некоторые аспекты решения практических задач в OpenFOAM

Решаемая в OpenFOAM задача обязательно содержит:

- Начальные и граничные условия (каталог 0)
- Расчетную сетку и физические свойства (каталог constant)
- Параметры интегрирования уравнений (каталог system)

Для исследователя важно:

- Правильно задать размерность
- Корректно задать граничные условия
- Проверить качество сетки
- Уметь анализировать процесс сходимости



ОСНОВЫ синтаксиса OpenFOAM

При постановке задачи в OpenFOAM используется основная структурная единица — словарь (dictionary).

Словарь (dictionary) — формализованное описание исходных данных в виде текстового файла состоит из:

- Заголовка
- Содержимого

Содержимое может включать в себя:

- Описание под-словарей (sub-dictionary) — фигурные скобки { }
- Списки (именованные и анонимные) — круглые скобки ()
- Ключи — имя и значение переменной
- Описание размерности (может входить в состав ключа) — квадратные скобки []
- Динамические описания — исходный код на C++, переменные
- Комментарии в стиле C++ - //, /* ... */



Главные элементы заголовка — имя словаря (object), его расположение в иерархии случая (location) и тип словаря — class.

```

/*-----*-- C++ -*-----*/
|
| =====
|  \ \      /   F i e l d      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;
    location     "constant";
    object       thermophysicalProperties;
}

// * * * * *

```



Основные единицы словаря OpenFOAM

```
mixture
{
    specie
    {
        nMoles      1;
        molWeight    28.96;
    }
    .....
}
dimensions      [0 0 0 1 0 0 0];

vertices
(
    (-5 -1 -1)
    (5 -1 -1)
    (5 1 -1)
    (-5 1 -1)
    (-5 -1 1)
    (5 -1 1)
    (5 1 1)
    (-5 1 1)
);
```

Под-словарь (sub-dictionary) выделяется фигурными скобками, ключ — включает в себя имя и значение (иногда размерность) и точку с запятой.

Размерность указывается в квадратных скобках

Списки перечисляются в круглых скобках, разделителем служит пробел



Динамические описания OpenFOAM

```
$internalField
```

Можно использовать переменные, которые содержат заданное значение или значение под-словаря

```
#include
```

Подключать текстовые файлы

```
inlet  
{
```

```
    type          codedFixedValue;  
    redirectType   swirl;
```

Или программировать пользовательские подпрограммы

```
    code
```

```
    #{
```

```
        const vector axis(1, 0, 0);  
        vectorField v = 2.0*this->patch().Cf() ^ axis;  
        v.replace(vector::X, 1.0);  
        operator==(v);
```

```
    #};
```

```
    value          $internalField;
```

```
}
```




Размерности OpenFOAM

No.	Характеристика	Единица измерения	Символ
1	Масса	килограмм	кг
2	Длина	метр	м
3	Время	секунда	с
4	Температура	Кельвин	К
5	Количество вещества	моль	моль
6	Ток	Ампер	А
7	Сила света	кандела	Кд



Примеры граничных условий, I

Название ГУ	Описание
fixedValue	ГУ 1-го рода. Необходимо задать фиксированное значение на входе. Условие Дирихле.
fixedGradient	ГУ 2-го рода. Необходимо задать градиент величины на границе.
zeroGradient	ГУ 2-го рода. Нулевой градиент на границе. Условие Неймана.
inletOutlet	действует как ГУ 1-ого рода, если массовый (объемный) поток входит в расчетную область и как ГУ 2-ого рода, если поток выходит из расчетной области. Иными словами, zeroGradient если жидкость выходит из расчетной области и фиксированное значение (inletValue) если входит
outletInlet	обратно inletOutlet Иными словами, zeroGradient если жидкость входит в расчетную область и фиксированное значение (outletValue) если выходит из нее
Mixed, symmentry plane, periodic and cyclic	Смешанное условие, условие симметрии, переодическое и циклическое условие
freestream, freestreamPressure	Условие свободного потока



Примеры граничных условий, II

Название ГУ

Описание

rotation	ГУ 1-го рода. Необходимо задать значение вращения, данные вокруг оси. Условие Дирихле.
profile1DfixedValue	ГУ 1-го рода. Необходимо задать файл с данными. Можно использовать для закрутки.
activeBaffleVelocity	Combines cyclic and wall patches so that the flow through the patch can be controlled
buoyantPressureFvPatch ScalarField	New Buoyancy pressure boundary condition now supports =pd= to =p=
uniformDensityHydrostaticPressure	Boundary condition for pressure to aid the transition from =pd= to =p=
jumpCyclic	Cyclic condition with an additional jump in value
fan	Specialisation of jumpCyclic, applying prescribed jump in pressure to simulate a fan within a mesh
Turbulent flow inlet	Mixing length and frequency



Возможности OpenFOAM для работы с сетками

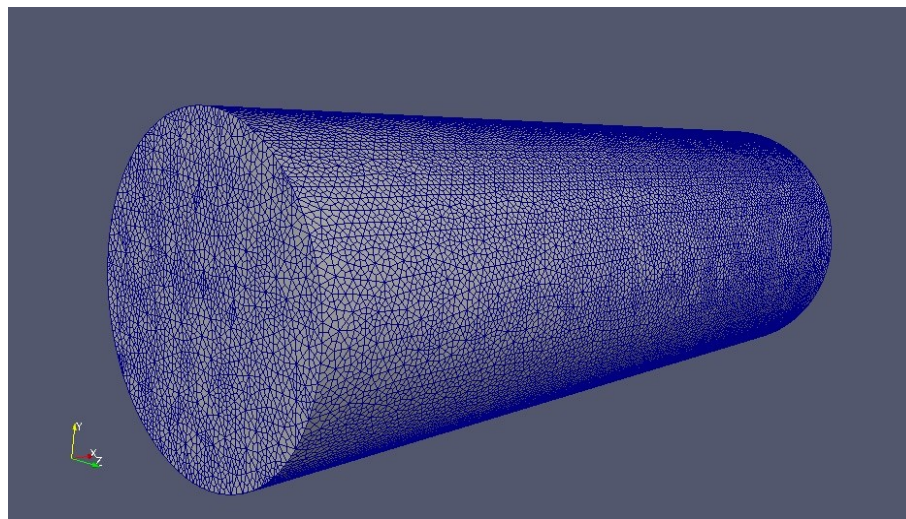
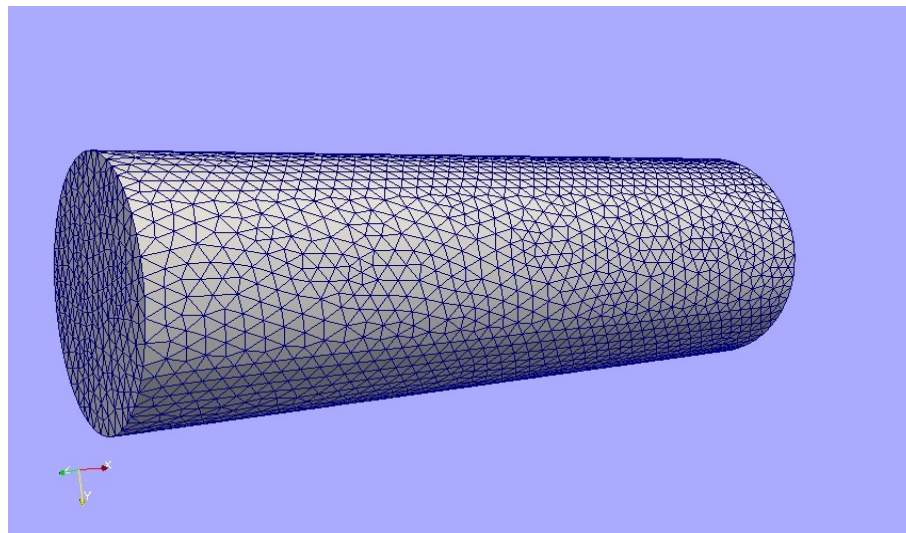
blockMesh Блочный генератор сеток

extrude2DMesh Takes 2D mesh (all faces 2 points only, no front and back faces) and creates a 3D mesh by extruding with specified thickness

Extrude Mesh Extrude mesh from existing patch (by default outwards facing normals; optional flips faces) or from patch read from file

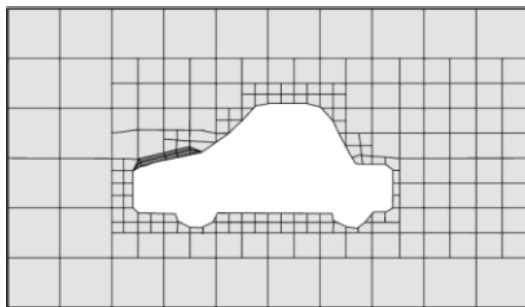
snappyHex Mesh Automatic split hex mesher. Refines and snaps to surface

polyDualmesh - Создание Многогранных ячеек

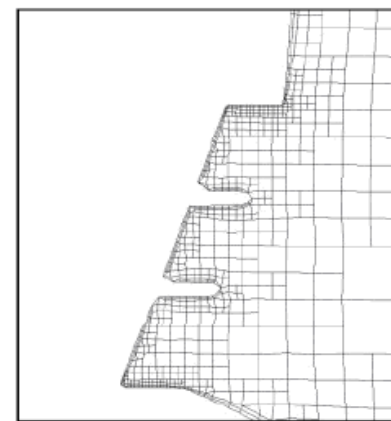
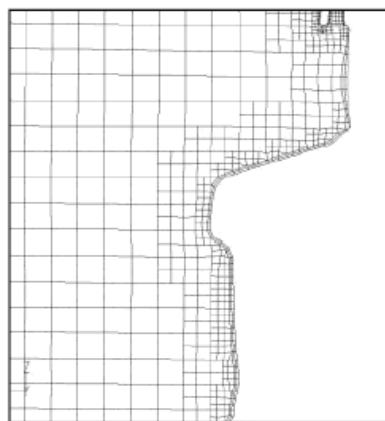
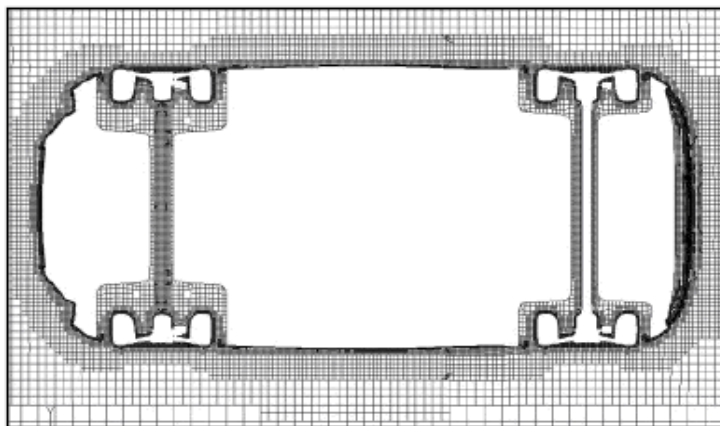
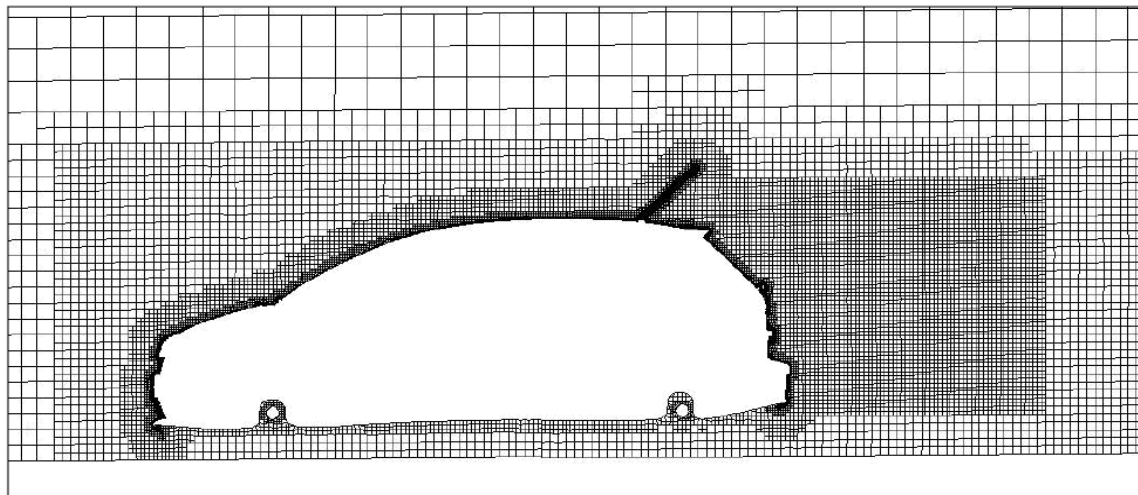




Приложение snappyHexMesh



Пример в OpenFOAM

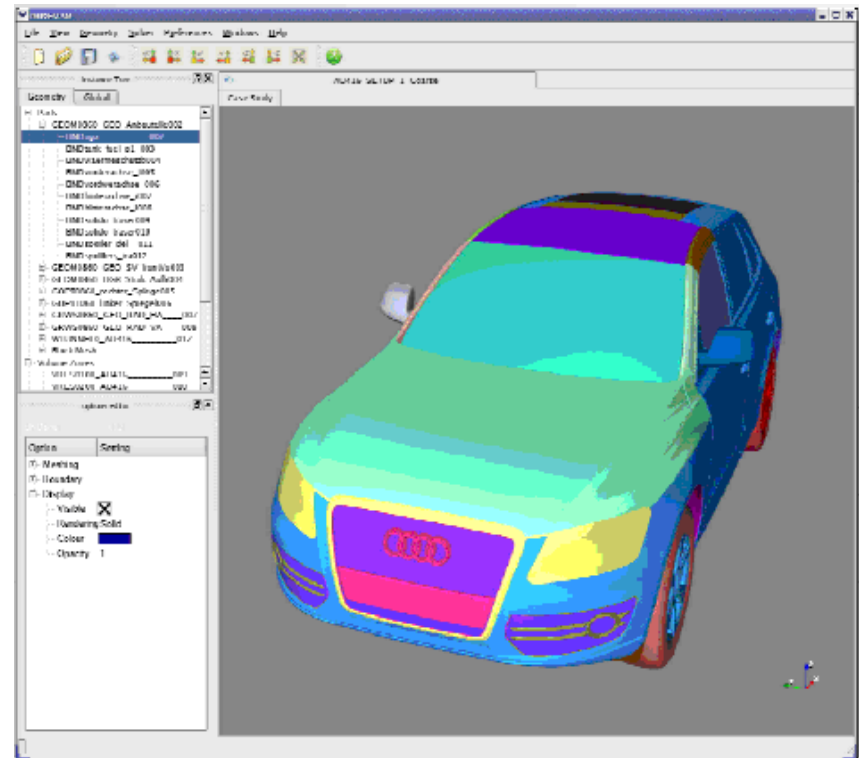


Сетка: 4.8М ячеек. Область расчета: 10L вверх по потоку, 20L — вниз, $H=10L$, Ширина — от $-5L$ до $+5L$



Коммерческий пакет ICON FOAM Pro

- 1) Многолетний контракт ICON с Audi, VW, SEAT
- 2) Разработка GUI FOAMpro
- 3) Подготовка задач
- 4) Задание начальных и граничных условий
- 5) Визуализация геометрии
- 6) Базируется на snappyHexMesh
- 7) Параллельная версия
- 8) Локальное измельчение сетки
- 9) Оптимизация качества ячеек
- 10) Модификация расчетных схем
- 11) Анализ невязок во время расчета
- 12) Grid вычисления
- 13) <http://www.iconcf.com/>





Импорт/экспорт данных — конвертеры сеток

ansysToFoam	Converts an ANSYS input mesh file, exported from I-DEAS, to OpenFOAM format
cfx4ToFoam	Converts a CFX 5 mesh into OpenFOAM format
fluent3DMeshToFoam	Converts a Fluent mesh to OpenFOAM format
fluentMeshToFoam	Converts a Fluent mesh to OpenFOAM format including multiple region and region boundary handling
foamMeshToFluent	Writes out the OpenFOAM mesh in Fluent mesh format
foamToStarMesh	Reads an OpenFOAM mesh and writes a PROSTAR (v.4) bnd/cel/vrt format
gambitToFoam	Converts a GAMBIT mesh to OpenFOAM format
gmshToFoam	Reads .msh file, written by Gmsh
ideasUnvToFoam	I-DEAS UNV format conversion
kivaToFoam	Converts a KIVA grid to OpenFOAM
netgenNeutralToFoam	Converts neutral file format as written by Netgen v. 4.4
plot3dToFoam	Plot3D mesh (ascii/formatted format) converter
polyDualMesh	Calculate the dual of polyMesh. Adheres to all feature and patch edges
sammToFoam	Converts a STAR-CD SAMM mesh to OpenFOAM format
star4ToFoam	Converts a STAR-CD (v4) PROSTAR mesh into OpenFOAM format
starToFoam	Converts a STAR-CD PROSTAR into OpenFOAM format
tetgenToFoam	Converts .ele and .node and .face files, written by tetgen



Экспорт данных — конвертеры результатов расчетов

foamDataToFluent	Translates OPENFOAM®data to Fluent format
foamToEnight	Translates OPENFOAM®data to EnSight format
foamToEnightParts	Translates OPENFOAM®data to EnSight format. An EnSight part is created for each cellZone and patch
foamToFieldview9	Write out the OPENFOAM®mesh in Version 3.0 Fieldview-UNS format (binary)
foamToGMV	Translates foam output to GMV readable files
foamToVTK	Legacy VTK file format writer
foamToTecplot	Translates OPENFOAM®data to Tecplot format



Проверка качества сетки — checkMesh (I)

```
Create time
Create polyMesh for time = 0
Time = 0
Mesh stats
points:           62054
faces:            672802
internal faces:   649206
cells:            330502
boundary patches: 3
point zones:      0
face zones:       1
cell zones:       1
Overall number of cells of each type:
hexahedra:        0
prisms:           0
wedges:           0
pyramids:         0
tet wedges:       0
tetrahedra:       330502
polyhedra:        0
Checking topology...
Boundary definition OK.
Point usage OK.
Upper triangular ordering OK.      Face vertices OK.      Number of regions: 1 (OK).
```



Проверка качества сетки — checkMesh (II)

```
Checking patch topology for multiply connected surfaces ...
Patch          Faces      Points    Surface topology
inlet          412        232      ok (non-closed singly connected)
outlet         5736       2894     ok (non-closed singly connected)
SOL            17448      8726     ok (closed singly connected)
Checking geometry...
Overall domain bounding box (-2 -0.679981 -0.679997) (2 0.68 0.68)
Mesh (non-empty, non-wedge) directions (1 1 1)
Mesh (non-empty) directions (1 1 1)
Boundary openness (-2.18538e-19 4.49199e-19 -2.47128e-19) OK.
Max cell openness = 1.65939e-16 OK.
Max aspect ratio = 11.0456 OK.
Minumum face area = 1.26182e-07.
Maximum face area = 0.00694694.
Face area magnitudes OK.
Min volume = 5.42529e-11.
Max volume = 0.000201659.  Total volume = 5.79848.
Cell volumes OK.
Mesh non-orthogonality Max: 61.0149 average: 13.3286
Non-orthogonality check OK.
Face pyramids OK.
Max skewness = 0.913121 OK.
Mesh OK.
End
```



Мониторинг показателей сходимости — стандартный вывод OpenFOAM

Time = 0.2

Courant Number mean: 0.100721 max: 13.8157

DILUPBiCG: Solving for Ux, Initial residual = 2.46858e-06, Final residual = 2.46858e-06, No Iterations 0

DILUPBiCG: Solving for Uy, Initial residual = 0.000207349, Final residual = 1.28247e-05, No Iterations 1

DILUPBiCG: Solving for Uz, Initial residual = 0.000175251, Final residual = 1.0187e-05, No Iterations 1

DICPCG: Solving for p, Initial residual = 0.00113702, Final residual = 1.11777e-05, No Iterations 25time step continuity errors : sum local = 8.16859e-09, global = -2.35699e-11, cumulative = 1.34233e-06

DICPCG: Solving for p, Initial residual = 0.000384734, Final residual = 9.696e-07, No Iterations 56time step continuity errors : sum local = 7.08705e-10, global = -5.94421e-11, cumulative = 1.34227e-06

DILUPBiCG: Solving for omega, Initial residual = 9.80641e-06, Final residual = 9.80641e-06, No Iterations 0

DILUPBiCG: Solving for k, Initial residual = 2.54185e-05, Final residual = 6.81117e-07, No Iterations 1

bounding k, min: -3.21164 max: 256.226 average: 5.59675

ExecutionTime = 11256.6 s ClockTime = 11294 sEnd



Мониторинг показателей сходимости — foamLog

```
[user1@SM3 forwardStep]$ foamLog log
```

Using:

log : log

database : /home/user1/OpenFOAM/OpenFOAM-1.6/bin/foamLog.db

awk file : ./logs/foamLog.awk

files to : ./logsExecuting: awk -f ./logs/foamLog.awk log

Generated XY files for:

executionTime

Rho

rhoE

rhoE

FinalRes

rhoElters

rhoFinalResrhoIters

rhoUx

rhoUx

FinalRes

rhoUx

lters





Визуализация динамики показателей сходимости — GNUPLOT(I)

```
set logscale y
set title "Residuals"
set ylabel 'Residual'
set xlabel 'Iteration'
plot "< cat log | grep 'Solving for Ux'
| cut -d' ' -f9 | tr -d ','" title 'Ux'
with lines,\
"< cat log | grep 'Solving for Uy' |
cut -d' ' -f9 | tr -d ','" title 'Uy'
with lines,\
"< cat log | grep 'Solving for Uz' |
cut -d' ' -f9 | tr -d ','" title 'Uz'
with lines,\
"< cat log | grep 'Solving for omega' |
cut -d' ' -f9 | tr -d ','" title
'omega'
with lines,\
"< cat log | grep 'Solving for k' | cut
-d' ' -f9 | tr -d ','" title 'k'
with lines,\
"< cat log | grep 'Solving for p' | cut
-d' ' -f9 | tr -d ','" title 'p' with
lines
pause 1
reread
```

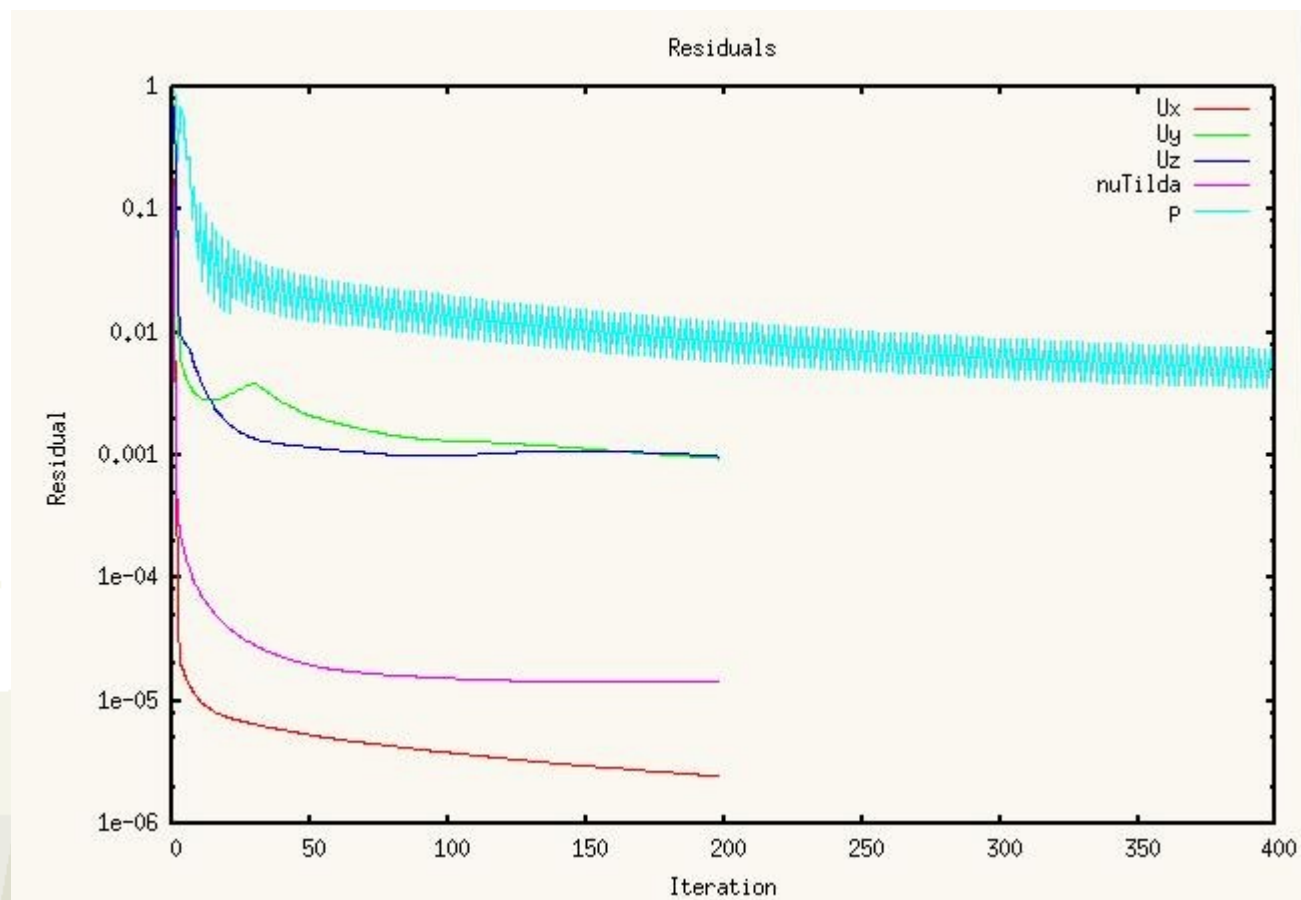
```
set yr [0:1]
set xr [0:0.01]
set key bottom right
set xlabel "Simulationtime [s]"
set ylabel "forceCoeff [-]"
set title "Plot of forceCoeffs over
simulationtime"
set gridplot
"./forceCoeffs/0.0005/forceCoeffs.dat"
using ($1):($3) with lines title
"lift_coeff",\
"./forceCoeffs/0.0005/forceCoeffs.dat"
using ($1):($2) with lines title
"drag_coeff"
pause 1
reread
```



День I, Модуль 2, Секция 4. пакет OpenFOAM: численное моделирование задач МСС

Визуализация динамики показателей сходимости — GNUPLOT(II)

Расчет выполнен решателем pisoFoam, SA модель турбулентности



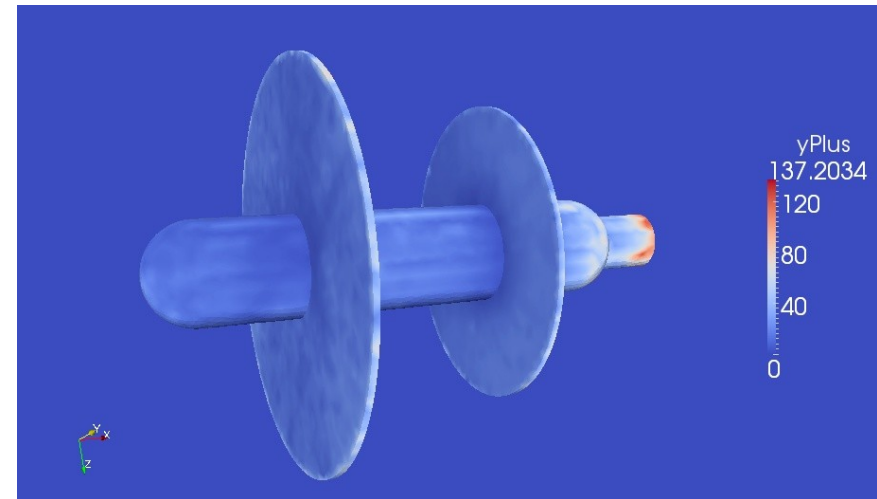
Невязки для $U_x, U_y, U_z, p, \nu_{Tilda}$



День I, Модуль 2, Секция 4. пакет OpenFOAM: численное моделирование задач МСС

Оценка значений Y^+ средствами OpenFOAM

```
Time = 0.2
Reading field U
Reading/calculating face flux field phi
Selecting incompressible transport model Newtonian
Selecting RAS turbulence model kOmegaSST
kOmegaSSTCoeffs
{
alphaK1          0.85034;
alphaK2          1;
alphaOmega1      0.5;
alphaOmega2      0.85616;
gamma1           0.5532;
gamma2           0.4403;
beta1            0.075;
beta2            0.0828;
betaStar         0.09;
a1               0.31;
c1               10;
}
Patch 2 named SOL y+ : min: 0.282185 max: 200.545 average:
19.758
Writing yPlus to field yPlus
End
```





День 1, Модуль 2, Секция 4. пакет OpenFOAM: численное моделирование задач МСС

Запуск задачи на расчет в параллельном режиме

- Копирование примера и файла

```
$cp -r pitzDaily $FOAM_RUN/pitzDailyParallel  
$cp pitzDailyExptInlet/system/decomposePartDict pitzDailyParallel/system
```

- Настройка файла system/decomposeParDict
- Выбор метода декомпозиции области
- Сформировать файл 'machines'
- Использовать утилиты decomposePar, reconstructPar

```
$ decomposePar  
[cfd1@master cavityParallel]$ more machines  
n3 cpu=8  
n4 cpu=8
```

```
$ mpirun --hostfile machines -np 16 icoFoam -parallel > log &  
$ reconstructPar
```





ЛИТЕРАТУРА

- 1) Госмен А.М. и др. Численные методы исследования течений вязкой жидкости. М.: Мир., 1972, 323 с.
- 2) Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М., Энергоатомиздат, 1984, 152 с.
- 3) Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа.— М: Дрофа, 2003. - 840 с.
- 4) Hirsch C. Numerical Computation of Internal and External Flows. Elsevier. 2007. – 696 p.
- 5) Ferziger J.H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer-Verlag, Berlin et al.: Springer, 2002. – 423p.
- 6) Бахвалов Н.С., Жидков Н.П, Кобельков Г.М. Численные методы. Издательство: Бином. Лаборатория знаний. 2008. 636 с
- 7) Волков К.Н., Емельянов В.Н.. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. – М.: Физматлит. 2008. – 368 с.
- 8) Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. Учебное пособие. СПб: БГТУ, 2001 г. 108 с
- 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. pp.620-631
- 10) Jasak, H.; Weller, H.G. and Gosman, A.D.: High resolution NVD differencing scheme for arbitrarily unstructured meshes, Int. J. Numer. Meth. Fluids, 1999, v31, pp 431-449