



*Школа-семинар  
«Основы использования  
OpenFOAM, SALOME и ParaView»*

**ПАКЕТ OPENFOAM:  
ЧИСЛЕННОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ МСС**

*М.В. Крапошин (НИЦ Курчатовский институт)*

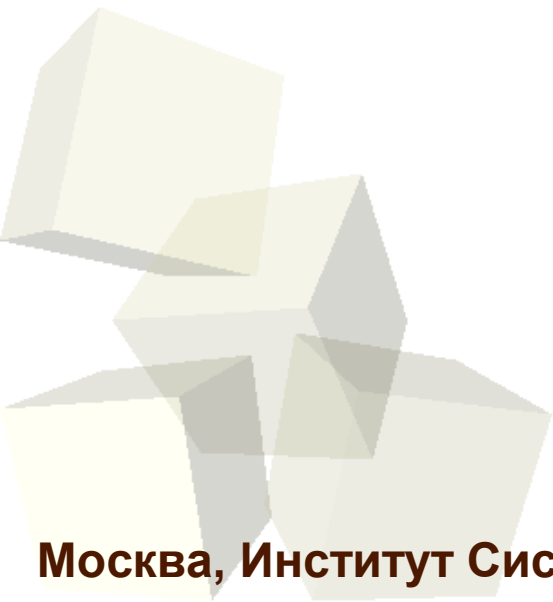
*О.И. Самоваров (Институт системного программирования РАН)*

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



## **OpenFOAM — Это:**

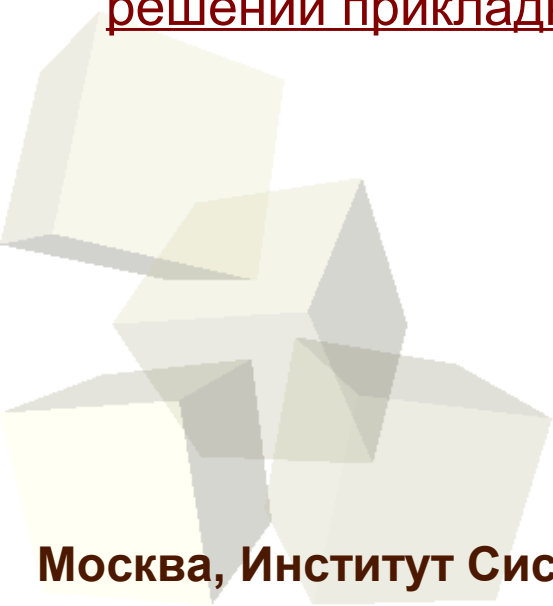
- Среда разработки и численного решения задач Механики Сплошных Сред.
- Основной язык программирования — C++
- Операционная система — любая POSIX совместимая
- Полностью модульная платформа, реализующая метод конечных объёмов для решения дифференциальных уравнений в частных производных





## **Содержание лекции**

- Основные уравнения
- 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





## Основные уравнения

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

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

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

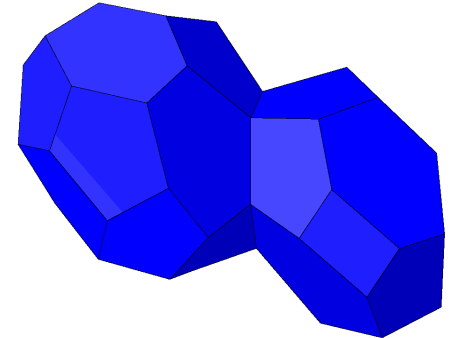
$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_S \rho \phi(\mathbf{v} - \mathbf{v}_b) \cdot \mathbf{n} dS = \int_S \Gamma \nabla \phi \cdot \mathbf{n} dS + \int_V \rho b_\phi dV$$

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



## 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

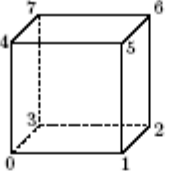
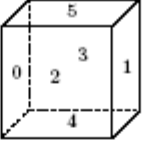
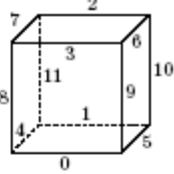
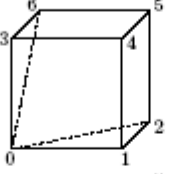
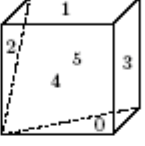
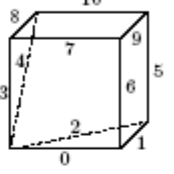
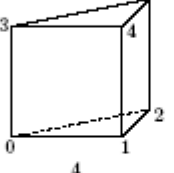
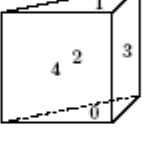
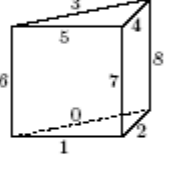
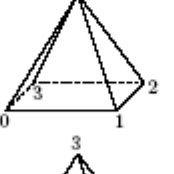
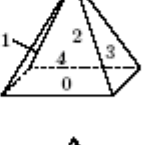
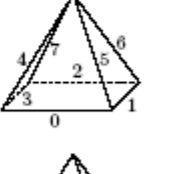
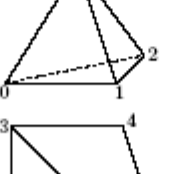
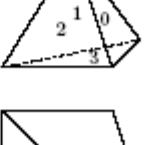
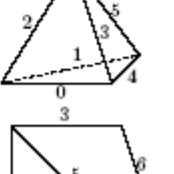
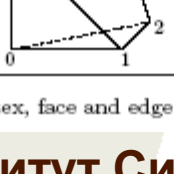
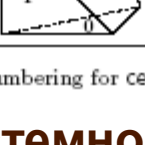
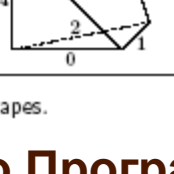


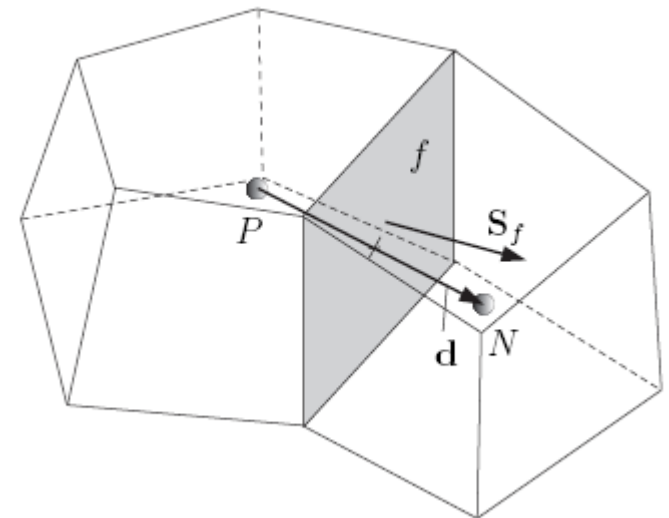
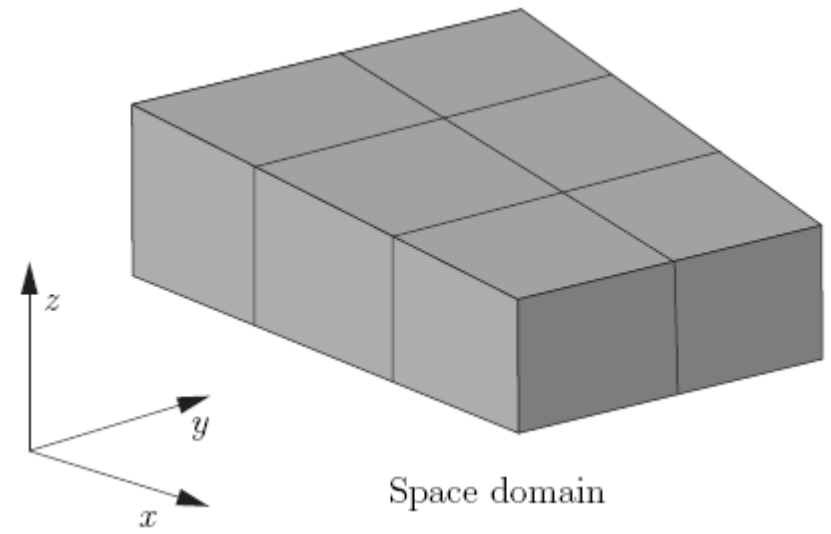
Cell type	Keyword	Vertex numbering	Face numbering	Edge numbering
Hexahedron	hex			
				
				
Wedge	wedge			
				
				
Pyramid	pyr			
Tetrahedron	tet			
Tet-wedge	tetWedge			

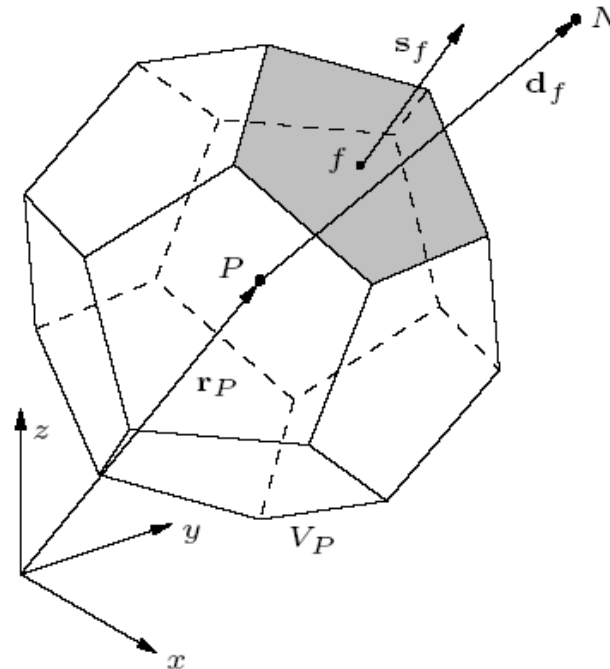
Table 5.1: Vertex, face and edge numbering for cellShapes.





# 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



## 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	<b>Простейшие задачи (потенциальное течение, транспорт скаляра)</b>
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
<b>incompressible</b>	<b>Турбулентное течение несжимаемой жидкости</b>
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 объема



## 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
	<b>Решатели из класса задач basic</b>
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
	<b>Решатели из класса задач incompressible (течения несжимаемых сред)</b>
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



## **Используемые в OpenFOAM численные методы**

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

- Дискретизация расчетной 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

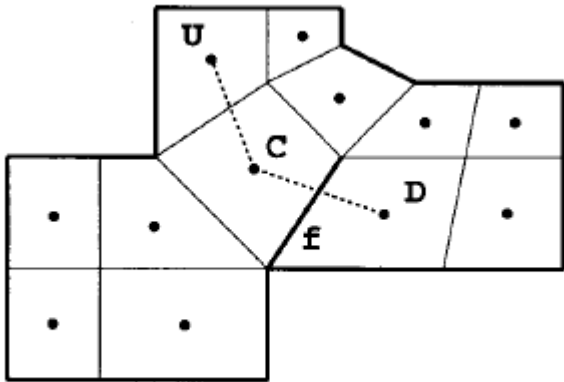


Figure 1. Unstructured quadrilateral mesh.

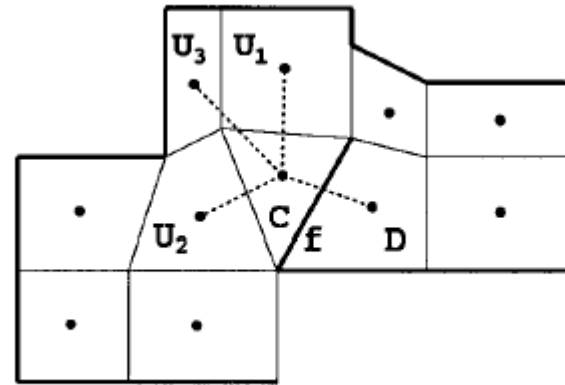


Figure 2. Arbitrarily unstructured mesh.

- 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:

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



## 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.



# 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



## **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

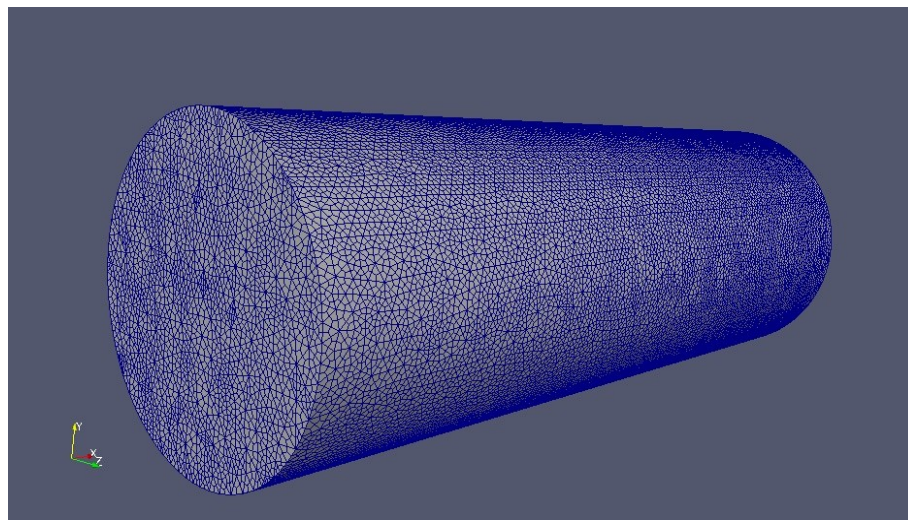
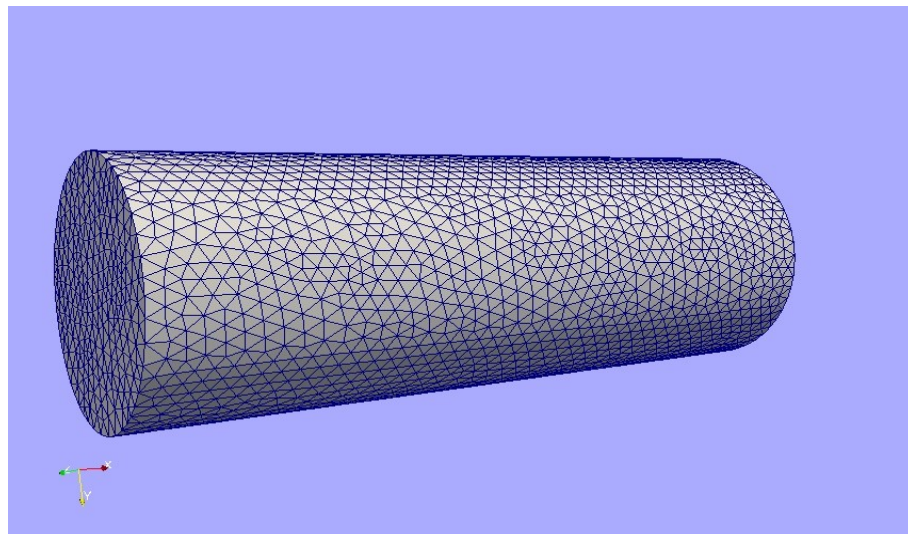
Extrude Mesh

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

snappyHex Mesh

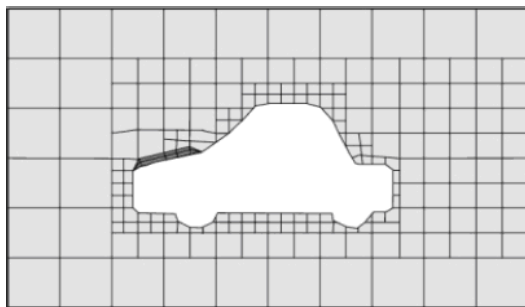
Automatic split hex mesher. Refines and snaps to surface

polyDualmesh - Создание Многогранных ячеек

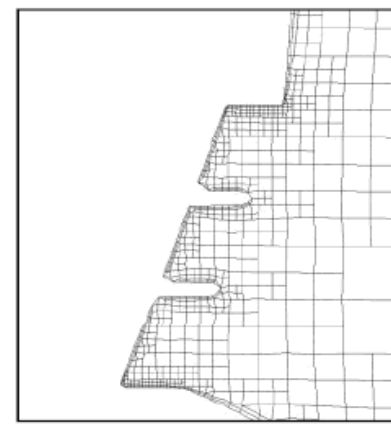
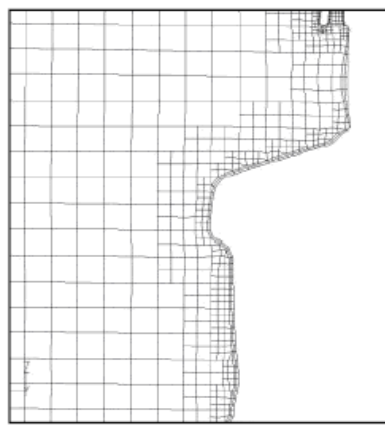
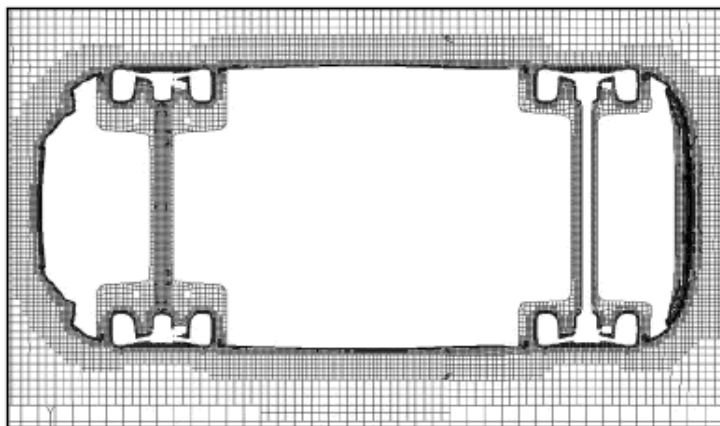
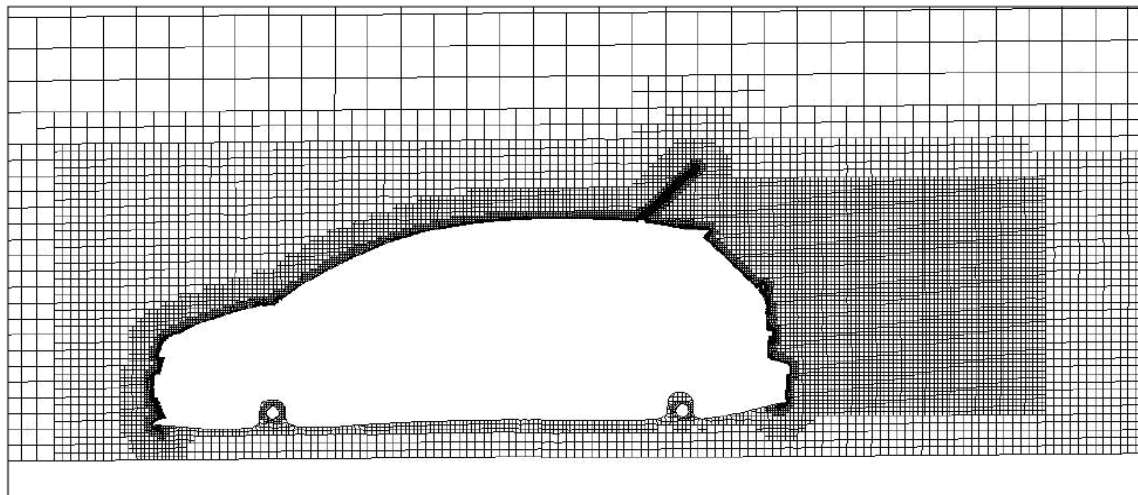




## Приложение snappyHexMesh



Пример в OpenFOAM

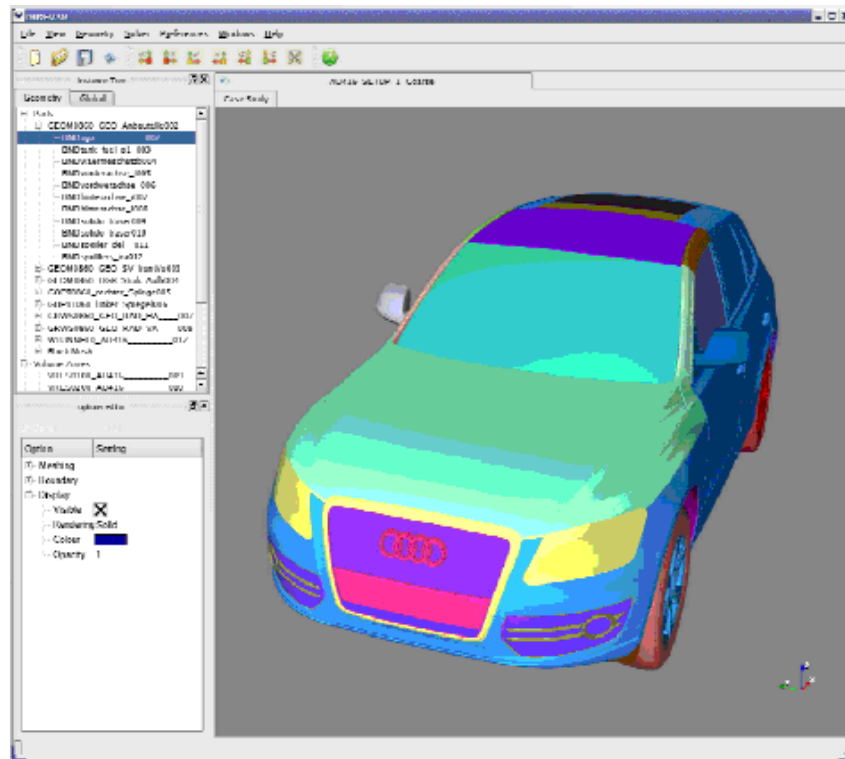


Сетка: 4.8М ячеек. Область расчета: 10L вверх по потоку, 20L — вниз,  $H=10L$ , Ширина — от  $-5L$  до  $+5L$



## **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
```





## День I, Модуль 2, Секция 3. пакет OpenFOAM: численное моделирование задач МСС

### 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
```

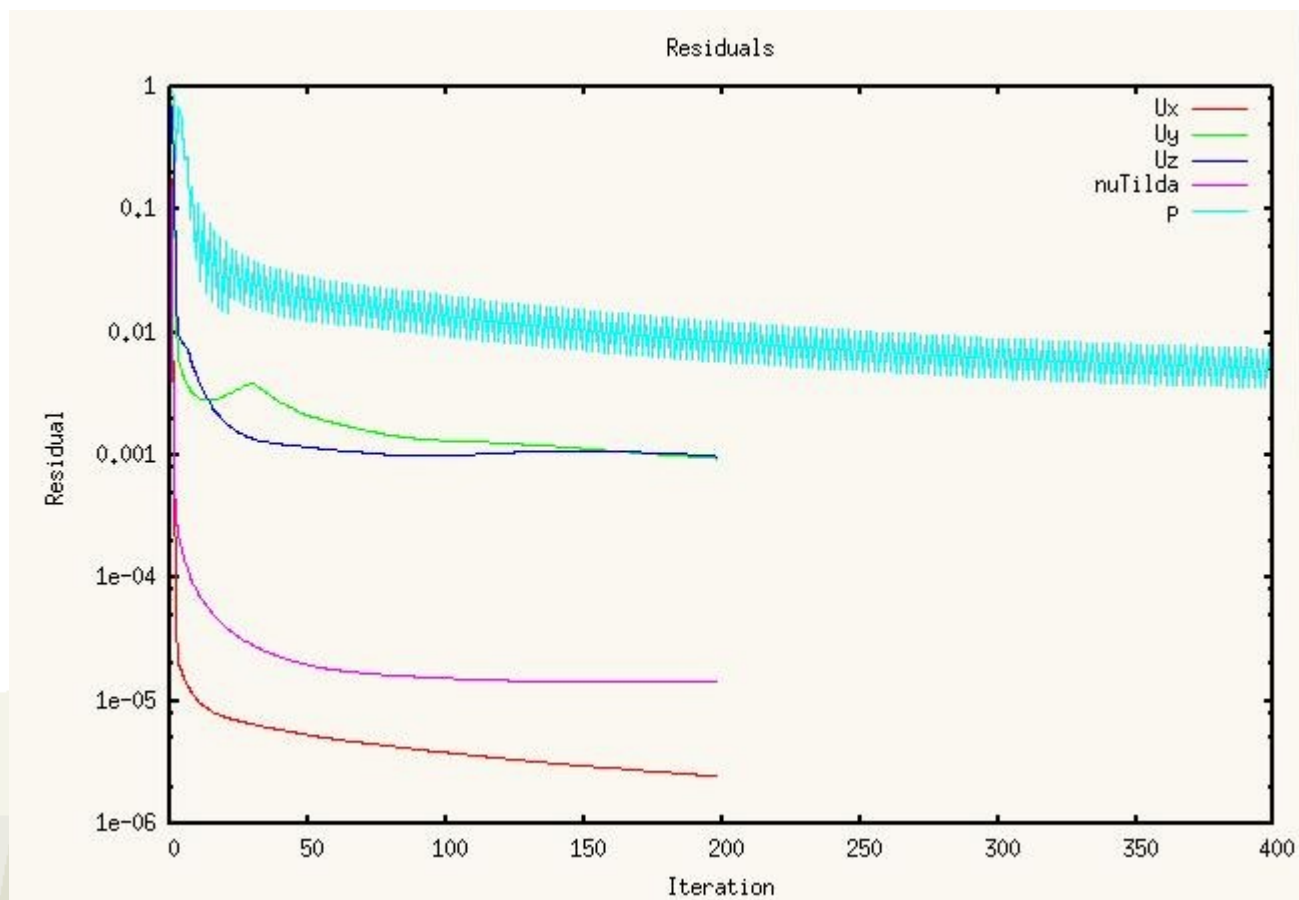
```
set yr [0:1]
set xr [0:0.01]
set key bottom right
set xlabel "Simulationtime [s]"
set ylabel "forceCoeff [-]"
set title "Plot of forceCoeffs over
simulationtime"
set gridplot
"./forceCoeffs/0.0005/forceCoeffs.dat"
using ($1):($3) with lines title
"lift_coeff",\
"./forceCoeffs/0.0005/forceCoeffs.dat"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



## День I, Модуль 2, Секция 3. пакет OpenFOAM: численное моделирование задач МСС

### Визуализация динамики показателей сходимости — GNUPLLOT(II)

Расчет выполнен решателем pisoFoam, SA модель турбулентности



Невязки для Ux, Uy, Uz, p, nuTilda

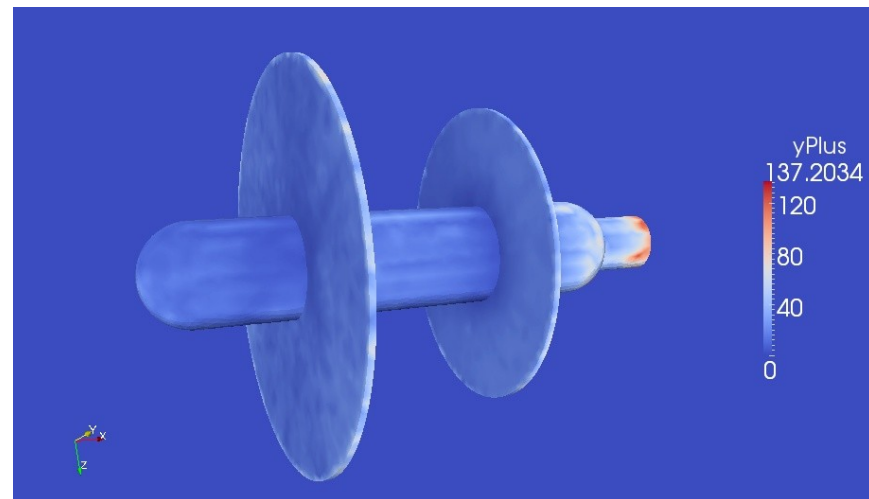
Москва, Институт Системного Программирования РАН



# День I, Модуль 2, Секция 3. 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 3. 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/decomposeParDict 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