

Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Эффективное использование открытых
пакетов SALOME, CalculiX, OpenFOAM
для создания расчётных сеток в задачах
МСС

Калиш С.А. (НИЦ «Курчатовский институт»)
Крапошин М.В. (НИЦ «Курчатовский институт»)
Тагиров А.М. (НИЦ «Курчатовский институт»)
Сибгатуллин И.Н. (НИИ механики МГУ им.
Ломоносова)
Стрижак С.В. (МГТУ им. Баумана)



Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

snappyHexMesh

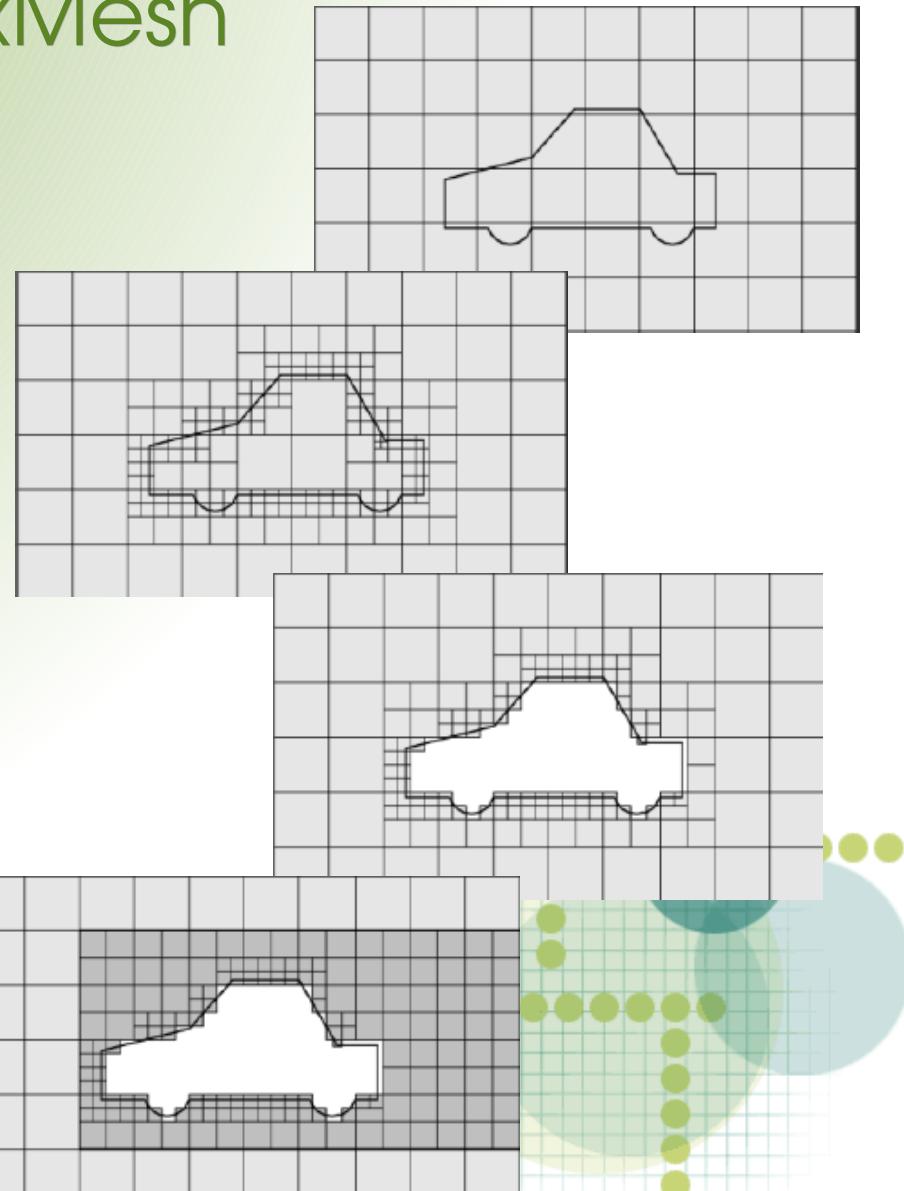
Утилита snappyHexMesh поставляемая вместе с пакетом openFOAM предназначена для автоматической генерации 3-х мерных неструктуризованных сеток с преобладанием гексаэдральных элементов.



Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Алгоритм построения сетки в snappyHexMesh

- Создается фоновая сетка
 - Проводится разбиение ребер поверхностей в соответствии с заданными параметрами улучшения сетки
 - Производится разбиение поверхностей
 - Производится удаление элементов (область в которой элементы не удаляются задается)
 - Производится дополнительное разбиение элементов в заданных особых областях
- (в результате получаем «ступенчатую» сетку)
- Вершины элементов привязываются к поверхностям
 - Добавляются поверхностьные слои ячеек



Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Построение сетки утилитой SnappyHexMesh

Для построения сетки необходимо выполнить следующие шаги:

- Подготовить файлы содержащие поверхность в формате STL, бинарном или ASCII. Файлы должны располагаться в папке */constant/triSurface*.
- Создать «фоновую» гексаэдральную сетку, которая определяет расчетную область и является базовым уровнем плотности сетки.
- Создать в папке *system* файл *snappyHexMeshDict* с соответствующими данными.
- Запустить исполнение утилиты *snappyHexMesh*



Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Подготовка «фоновой» сетки

Фоновая сетка должна удовлетворять следующим условиям:

- сетка должна состоять только из гексаэдральных элементов.
- отношение сторон элемента должно приблизительно равняться 1 хотя бы около поверхности, к которой в дальнейшем будет применена процедура привязки.
- должно быть хотя бы одно пересечение ребра ячейки с поверхностью, к которой в дальнейшем будет применена процедура привязки.

Проще всего для построения «фоновой» сетки использовать утилиту *blockMesh*



Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Файл snappyHexMeshDict

Файл включает следующие разделы:

- *geometry* – содержит описание геометрии для построения сетки
- *castellatedMeshControls* – содержит параметры разбиения области
- *snapControls* – содержит параметры привязки вершин к поверхностям
- *addLayersControls* – содержит параметры для добавления слоев гексаэдральных элементов, выровненных вдоль поверхностей.
- *meshQualityControls* – содержит параметры для добавления слоев гексаэдральных элементов, выровненных вдоль поверхностей.



Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Переключатели верхнего уровня

- *castellatedMesh* – будет или нет строится «ступенчатая» сетка.
- *snap* – будет или нет проводится привязка к поверхностям.
- *addLayers* – будут или нет добавляться дополнительные слои на поверхностях
- *debug* – управляющий параметр.
- *mergeTolerance* – точность склейки.



Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Раздел Geometry

В данном подразделе указывается вся геометрия используемая при построении сетки. Геометрия может быть задана посредством STL поверхностей или ограничивающих объемов openFOAM.

Поверхности задаются записями вида:

```
example_1.stl
{
    type triSurfaceMesh;
    name Example;
    regions
    {
        solid_0
        {
            name patch_name;
        }
    }
}
```

Если STL-поверхность содержит несколько областей, то для каждой области можно задавать свои параметры построения сетки. В разделе regions для этих областей задается имя. Если этого не сделать, то области присваивается стандартное имя вида example_solid_0



Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Раздел Geometry

Ограничивающие объёмы задаются записями вида:

```
sphere
{
    type searchableSphere;
    centre ( 0 0 0 );
    radius 0.1
}
```

Объёмы могут быть следующих типов:

- **searchableBox** – прямоугольный параллелепипед, задаются точки с наименьшими и наибольшими координатами
- **searchableCylinder** – цилиндр, необходимо задать два центра оснований и радиус цилиндра.
- **searchablePlane** – плоскость, может быть трех типов: *planeEquation*, задаются коэффициенты уравнения плоскости $ax+by+cz+d=0$; *embeddedPoints*, задаются 3 точки на плоскости; *pointAndNormal*, задается точка на плоскости и нормаль.
- **searchablePlate** – тонкая пластина, необходимо задать начальную точку и размер пластины (один из размеров обязательно должен быть равен 0).
- **searchableSphere** – сфера, необходимо задать центр сферы и ее радиус.
- **searchableSurfaceCollection** – объем заданный несколькими поверхностями.

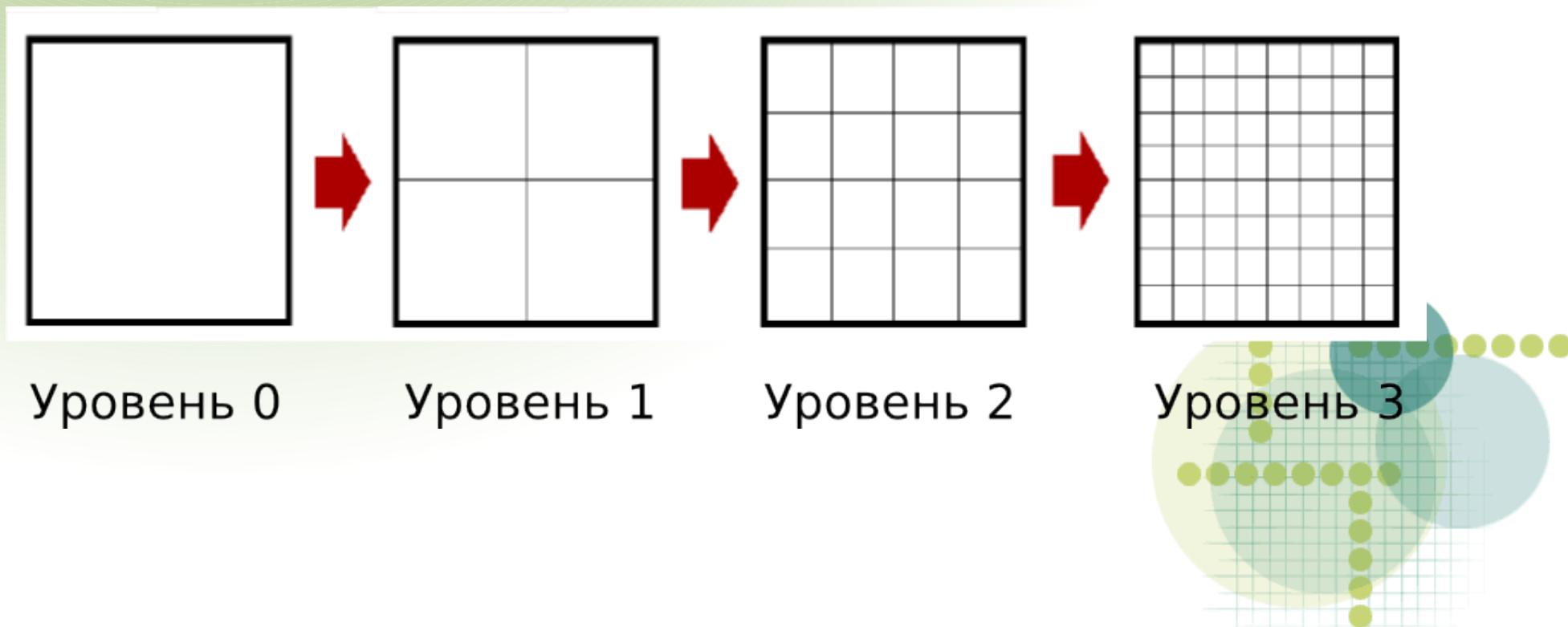


Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Раздел castellatedMeshControls

В данном разделе содержаться параметры разбиения области, которые применяются на этапе построения «ступенчатой» сетки.

Для объектов задается уровень разбиения, который определяет размер ячеек. За уровень 0 принимается размер ячеек «фоновой» сетки.



Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Раздел castellatedMeshControls

Параметры задаваемые в данном разделе:

- *locationInMesh* – вектор задающий область, которая будет разбиваться на элементы. Не должен совпадать с ребром элемента до и после улучшения сетки.
- *maxLocalCells* – максимальное число элементов на один процессор во время построения сетки (используется при параллельной работе на нескольких процессорах).
- *maxGlobalCells* – общий предел числа элементов в процессе построения сеток. Этот предел примерный и число элементов в итоговой сетке может превышать заданное здесь.
- *minRefinementCells* – если число улучшаемых ячеек больше данного параметра, то процедура улучшения прекращается. Если значение параметра 0, то не учитывается.
- *nCellsBetweenLevels* – количество слоев между различными уровнями улучшения.
- *resolveFeatureAngle* – Если угол пересечения ячеек выше значения заданного для этого параметра, то применяется максимальный заданный уровень улучшения.



Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Раздел castellatedMeshControls

- *features* – подраздел определяющий разбиение ребер. Содержит записи вида:

```
{  
    file "edges.eMesh";  
    level 3;  
}
```

Файл eMesh содержит список ребер для разбиения, level задает уровень разбиения. Ребра, содержащиеся в файле, не обязательно должны совпадать с ребрами поверхностей из раздела *geometry*.



Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Раздел castellatedMeshControls

- *refinementSurfaces* – подраздел определяющий параметры разбиения для поверхностей.

```
example
level (2 3);
regions
{
    solid_0
    {
        level (3 4);
    }
}
```

Для каждой поверхности задается два уровня разбиения. Минимальный применяется ко всей поверхности, если же угол пересечения ячеек с поверхностью больше указанного в *resolveFeatureAngle*, то применяется максимальный уровень. В разделе *regions* задается разбиение для областей поверхности.

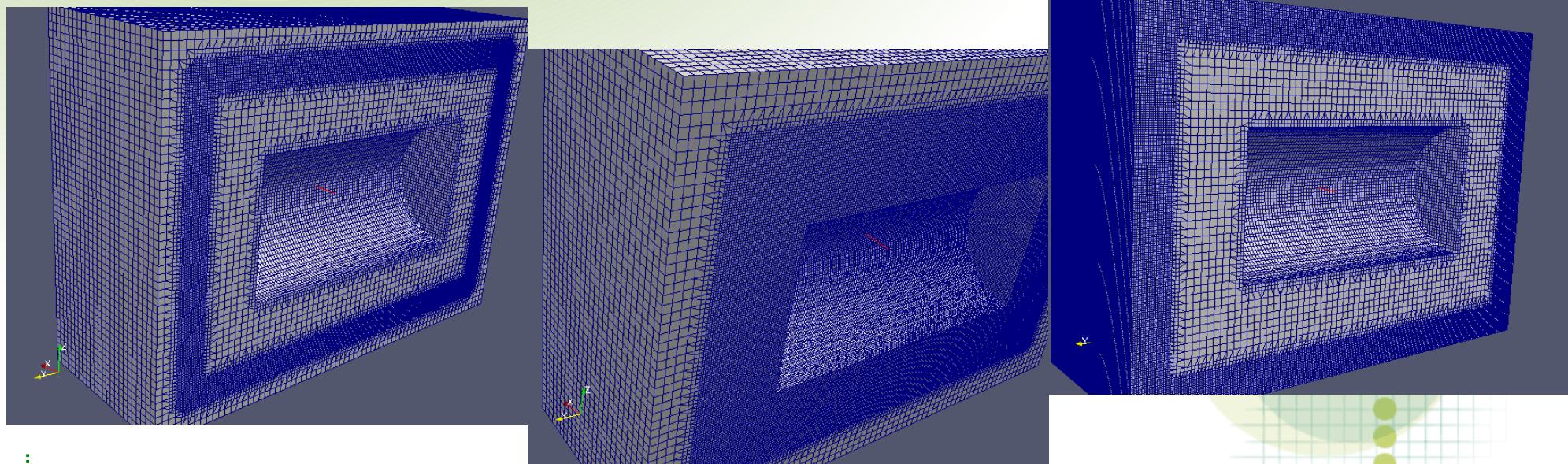


Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Раздел castellatedMeshControls

- *refinementRegions* – подраздел определяющий параметры разбиения областей сетки.
sphere
{
 mode distance;
 levels ((0.1 2) (0.2 1));
}

Параметр *mode* определяет область к которой будет применен указанный уровень разбиения: *distance* – заданное расстояние от поверхности; *inside* – внутри области ограниченной поверхностью; *outside* – снаружи области ограниченной поверхностью.

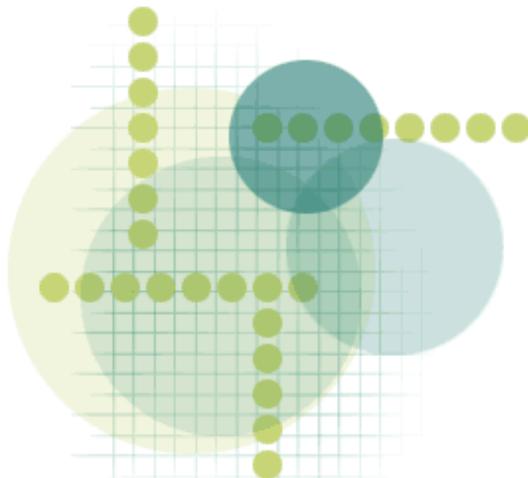


Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Раздел snapControl

Второй этап построения сетки – привязка к поверхностям.

- *nSmoothPatch* – количество итераций сглаживание перед тем, как будет найдено соответствие с поверхностью.
- *tolerance* – отношение расстояний для точек, которые будут «притянуты» к точкам поверхности или ребра, к локальному максимуму длины ребра.
- *nSolveIter* – количество итераций релаксации перемещений сетки.
- *nRelaxIter* – максимальное количества итераций релаксации привязки.
- *nFeatureSnapIter* – если указать данный параметр, то происходит более точная привязка к граням. Необходимо создать файл сетки eMesh и указать его в подразделе *features* раздела *castellatedMeshControls*.



Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Раздел addLayersControls

Третий этап построения сетки – добавление слоев гексаэдральных элементов, выровненных вдоль поверхности.

```
layers
{
    example
    {
        nSurfaceLayers 3;
    }
}
```

Параметр *nSurfaceLayers* определяет количество слоев около поверхности.

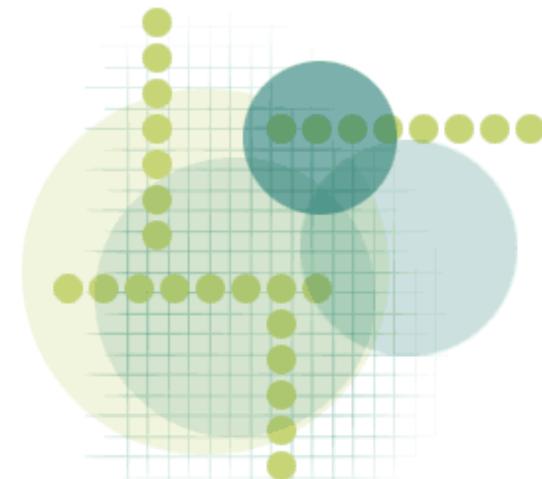
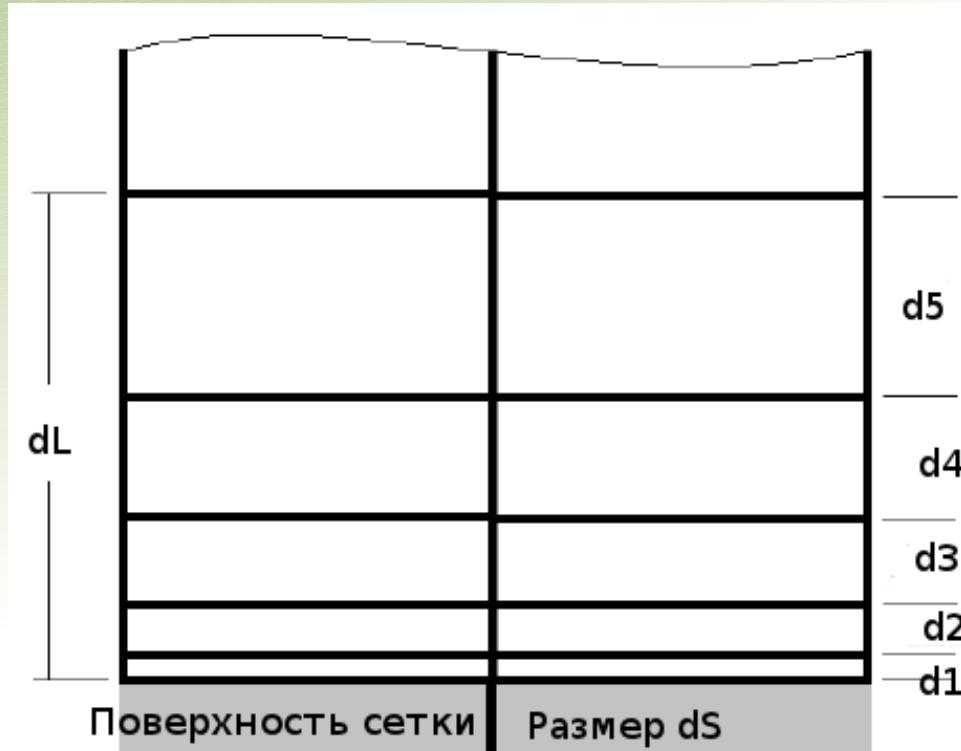
- *relativeSizes* – в случае *true* толщина последнего слоя и минимальная толщина определяются через размер ячейки соответствующего уровню разбиения поверхности, на которой строится слой. В случае *false* задаются абсолютные значения.



Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Раздел addLayersControls

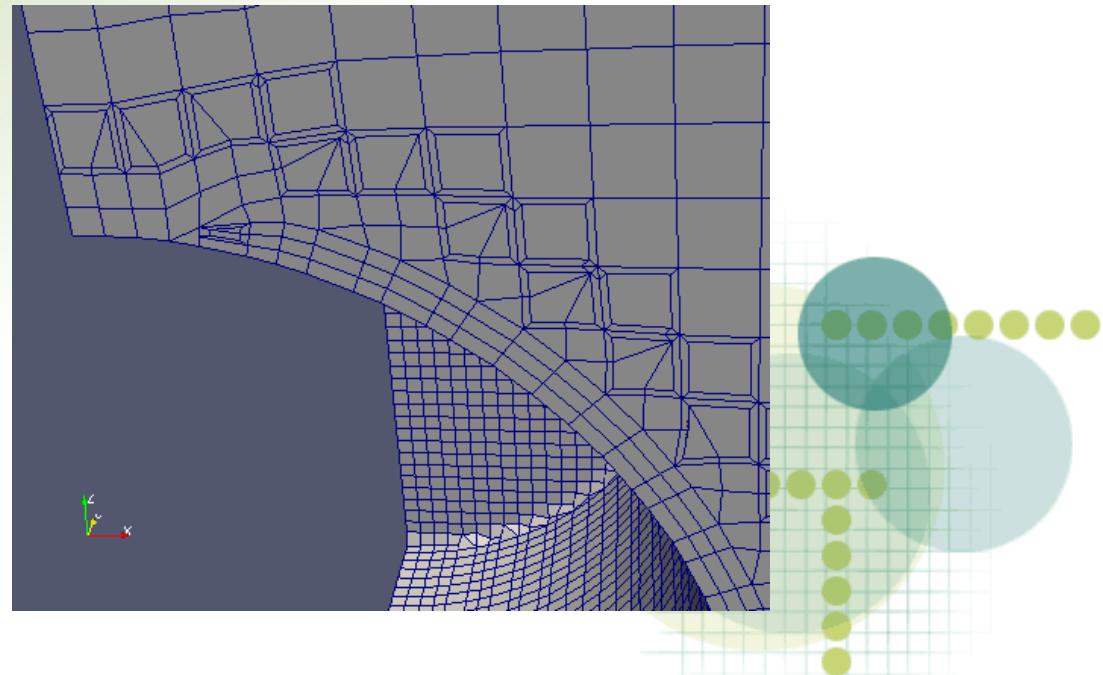
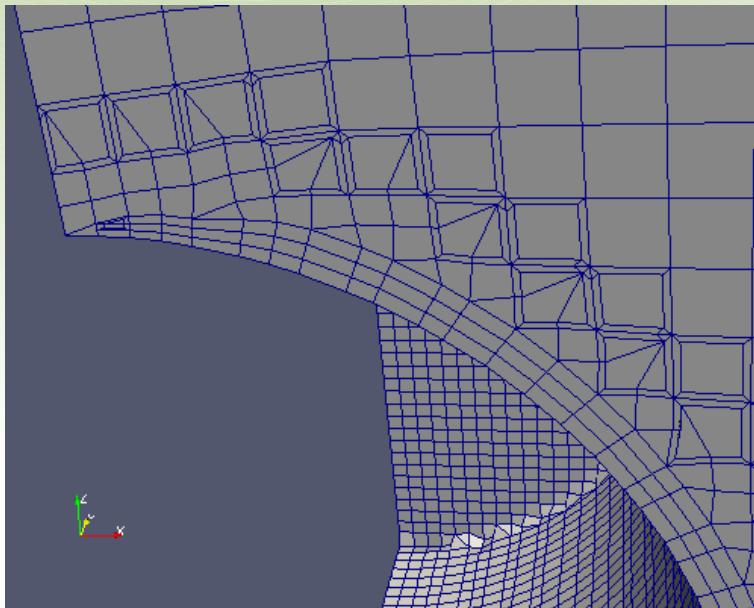
- *expansionRatio* – коэффициент увеличения толщины слоя. Равен отношению толщины слоя к толщине следующего слоя в направлении от поверхности
- *finalLayerRatio* – толщина самого дальнего от поверхности.



Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Раздел addLayersControls

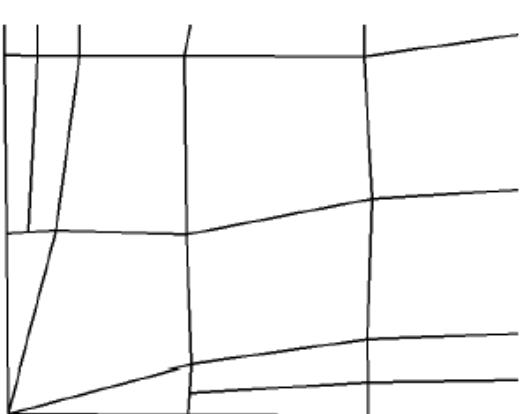
- *minThickness* – минимальная толщина слоя. Если размер, какого либо слоя, меньше, указанного в данном параметре, то слой не добавляется.
- *nGrow* – количество ячеек на которых не строится слой, если не получается их спроектировать. Данный параметр позволяет улучить сходимость добавления слоев.



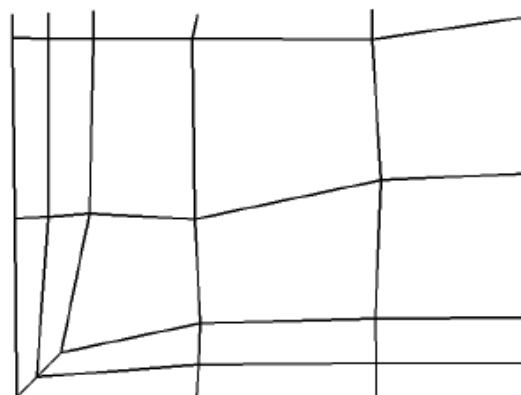
Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Раздел addLayersControls

- *featureAngle* – угол под которым проецируется крайняя ячейка.



`featureAngle 45;`



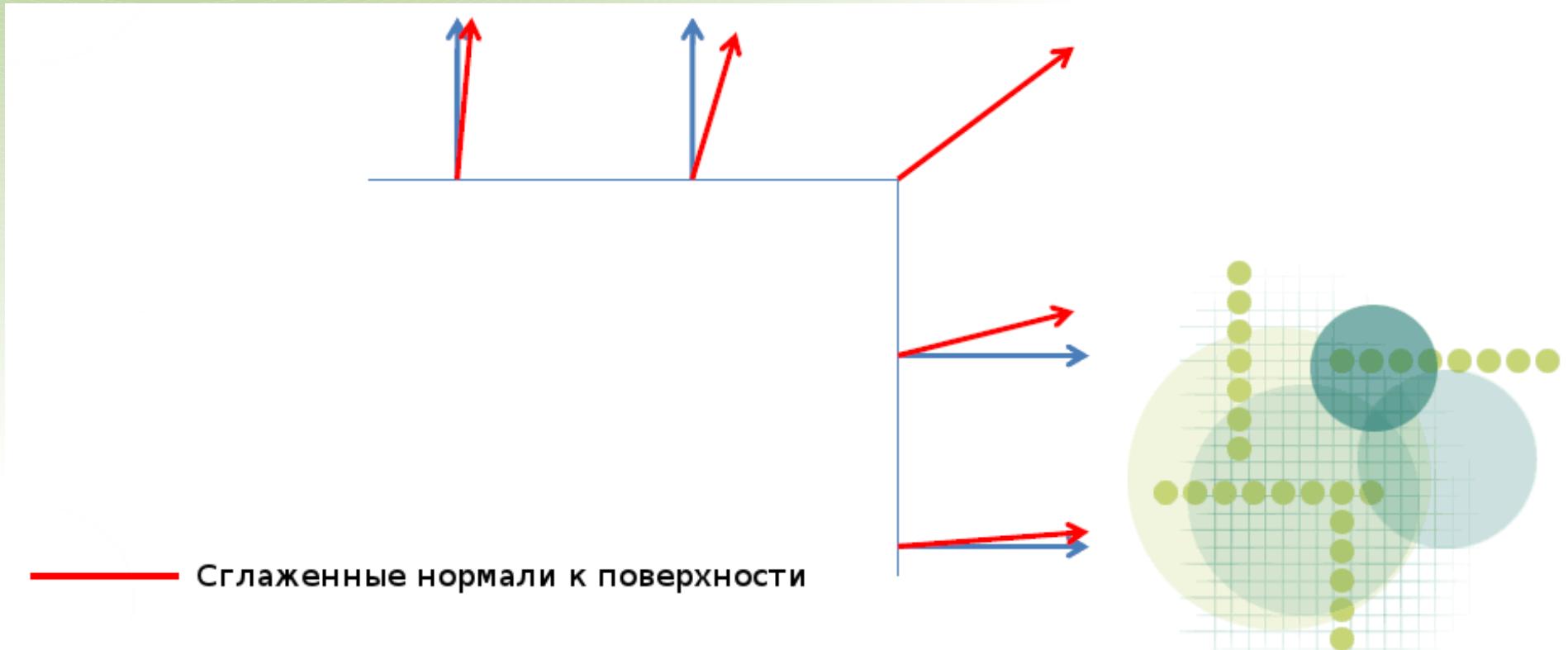
`featureAngle 180;`



Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Раздел addLayersControls

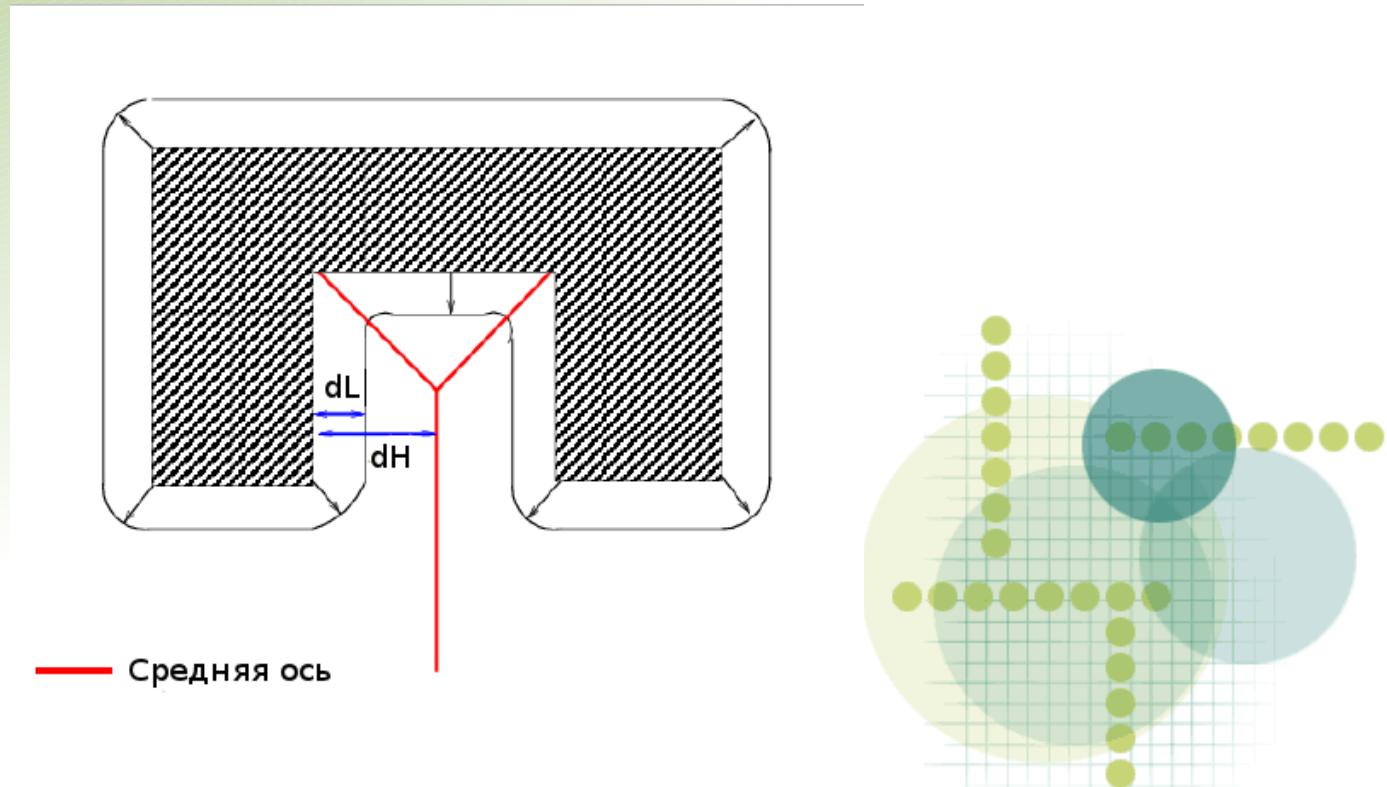
- *nRelaxIter* – максимальное количество итераций релаксации процедуры привязки.
- *nSmoothSurfaceNormals* – количество итераций сглаживания нормалей к поверхности в узлах сетки.
- *nSmoothNormals* – количество итераций сглаживание направления движения сетки.
- *nSmoothThickness* – количество итераций сглаживания толщины слоя по всей



Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Раздел addLayersControls

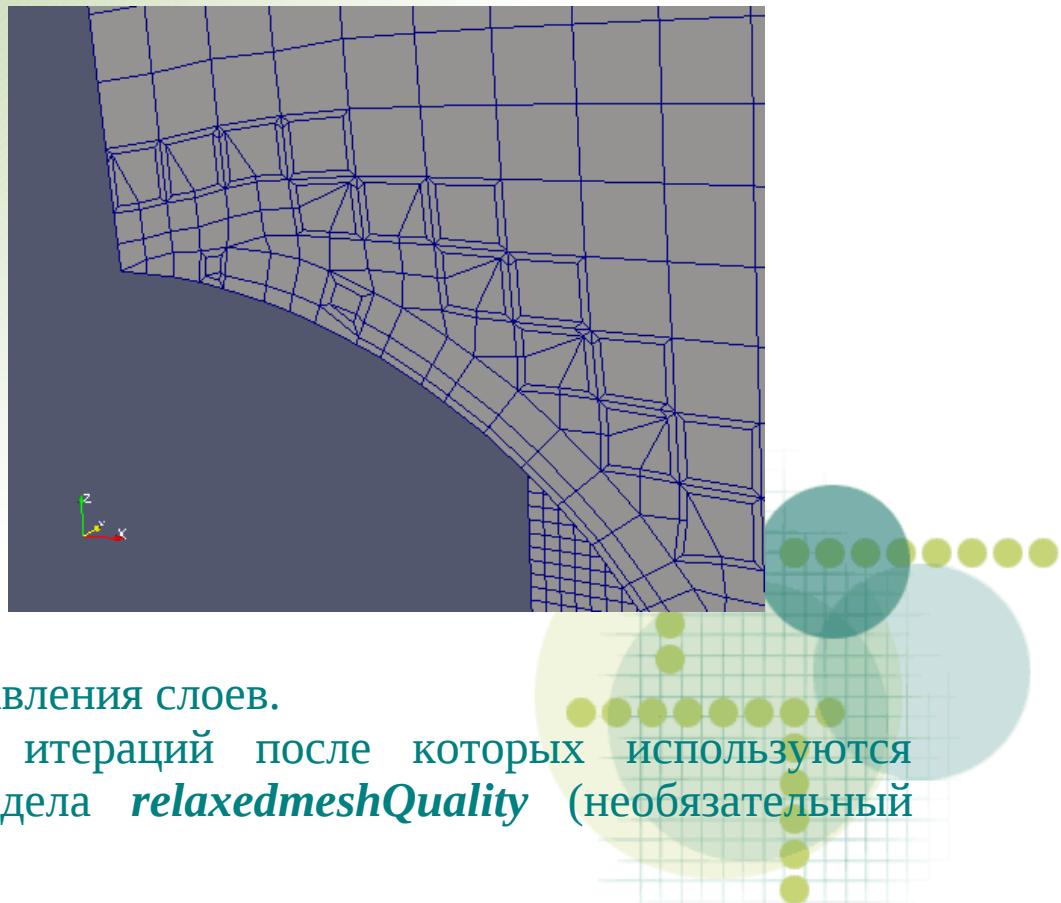
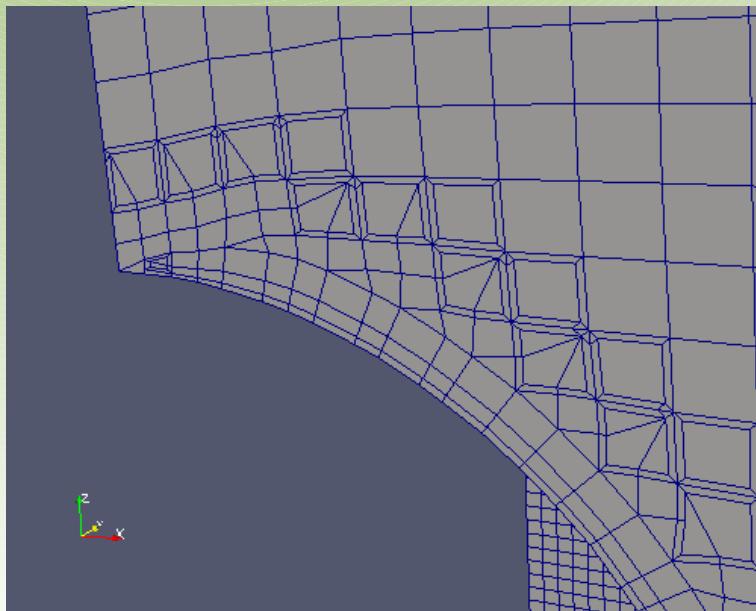
- *maxFaceThicknessRatio* – останавливает построения слоя на сильно искаженных элементах.
- *maxThicknessToMedialRatio* – если отношение толщины слоя к расстоянию до средней оси больше заданного значения , то толщина слоя уменьшается.
- *minMedianAxisAngle* – Угол, используемый для определения средних осей.



Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Раздел addLayersControls

- *nBufferCellsNoExtrude* – создает буферную зону на концах новых слоев. Слои ближе к поверхности получаются меньше последующих на указанное в этом параметре число ячеек.



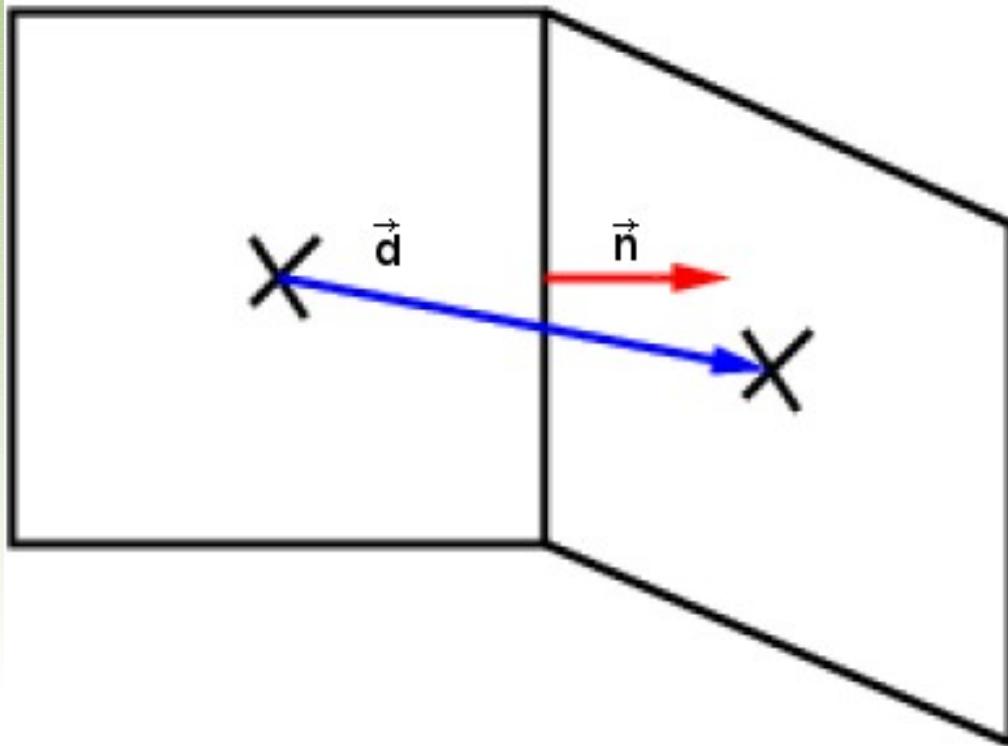
- *nLayerIter* – общее число итераций добавления слоев.
- *nRelaxedIter* – максимальное число итераций после которых используются управляемые параметры из подраздела *relaxedmeshQuality* (необязательный параметр).

Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Раздел meshQualityControls

В данном разделе задаются параметры для контроля за качеством сетки. Эти параметры используются при проверке качества сетки в процессе привязки к поверхностям и добавления слоев.

- *maxNonOrtho* – максимальная допустимая не ортогональность, = 180 отключено.
Не ортогональность – угол между линией соединяющей центры ячеек и нормалью к поверхности.

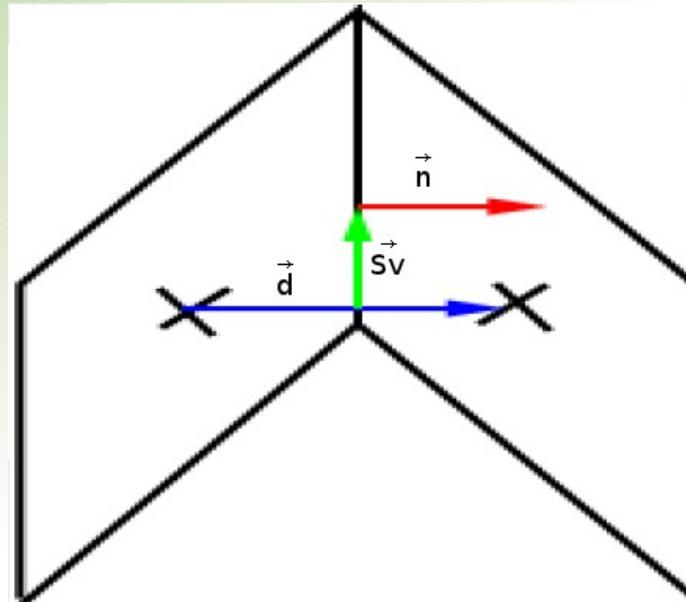


Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Раздел meshQualityControls

- *maxBoundarySkewness* – максимальная скособоченность граничных граней, <0 отключено.
- *maxInternalSkewness* – максимальная скособоченность внутренних граней, <0 отключено.

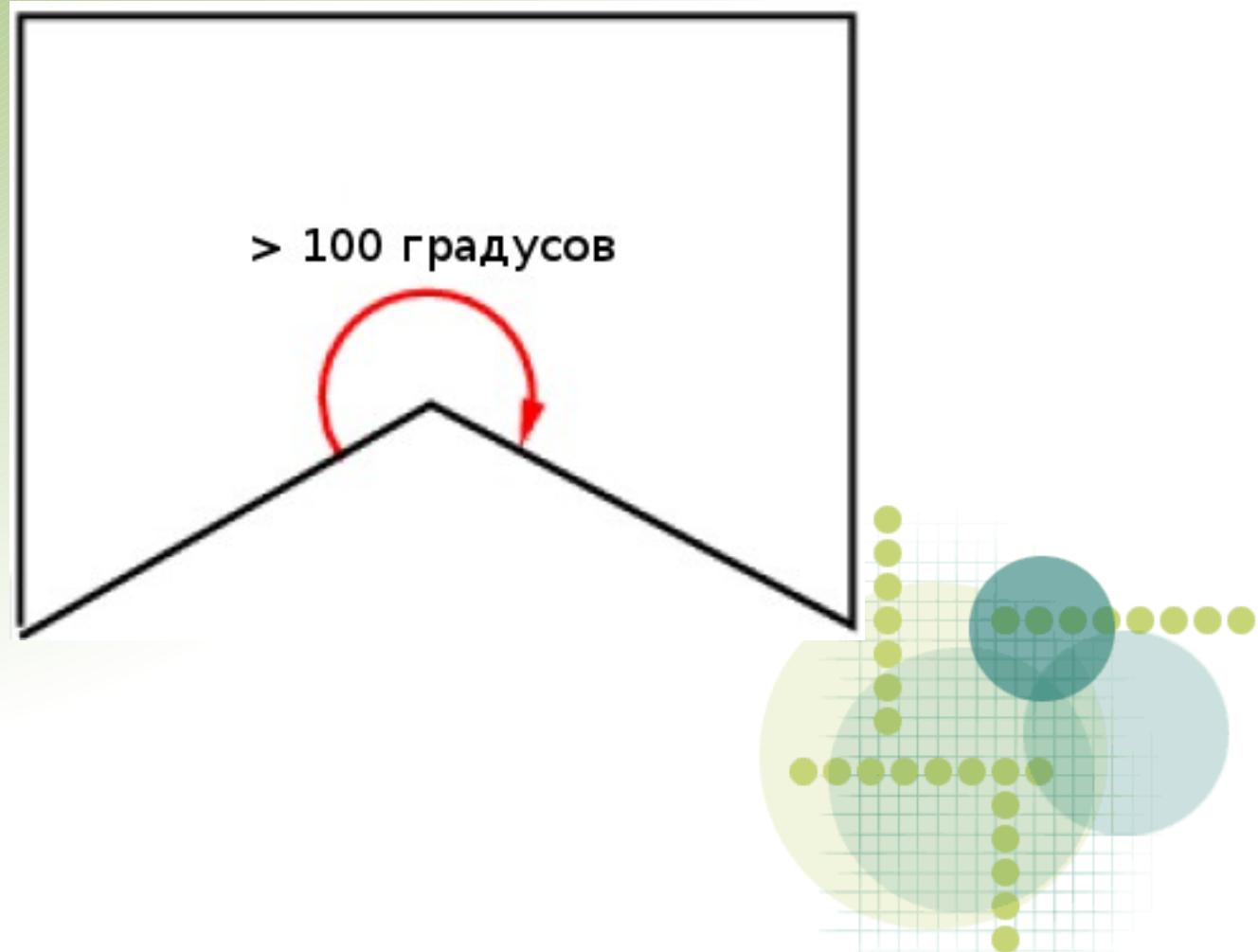
Скособоченность – вычисляется как отношение расстояния от точки пересечения линии соединяющей центры ячеек до центра грани и расстояния между центрами ячеек.



Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Раздел meshQualityControls

- *maxConcave* – максимальная допустимая вогнутость. 0 соответствует плоской грани, отрицательные числа соответствуют выпуклым поверхностям, значение 180 проверку параметра.

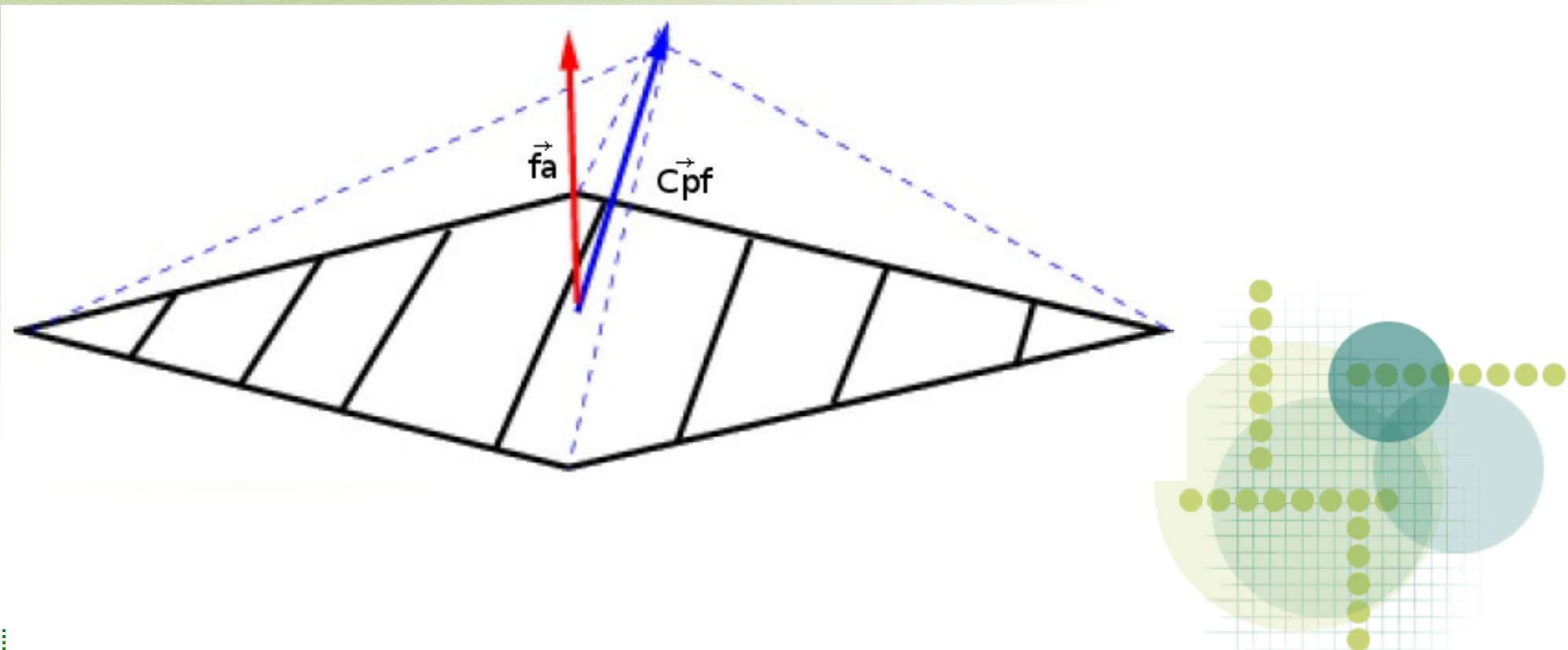


Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Раздел meshQualityControls

- *minVol* – минимальный объем пирамиды. Большое отрицательное число, например -1e30, отключает проверку параметра.
- *minArea* – минимальная площадь грани. Отрицательное значение отключает проверку параметра.

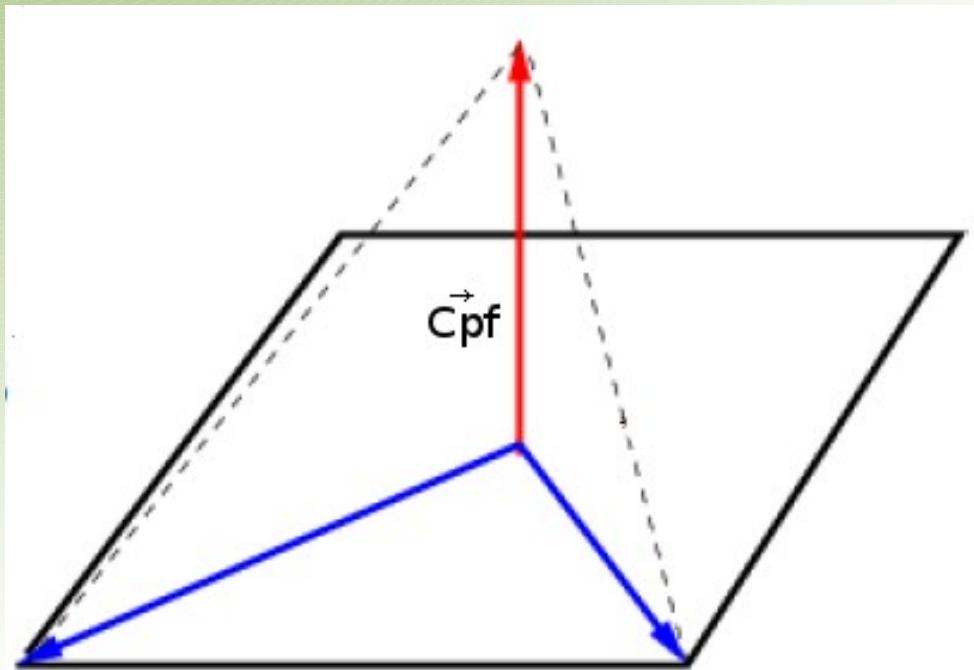
Объем пирамиды вычисляется как 1/3 скалярного произведения вектора площади грани и вектора соединяющего центр грани и центр ячейки.



Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Раздел meshQualityControls

- *minTetQuality* – для вычисления данного параметра ячейка разбивается на тетраэдры, с вершинами в вершинах грани, центре грани и центре ячейки. Необходимо задать небольшое положительное значение, для гарантии корректной работы прослеживающих процедур, например линий тока. Большое отрицательное число отключает проверку параметра.

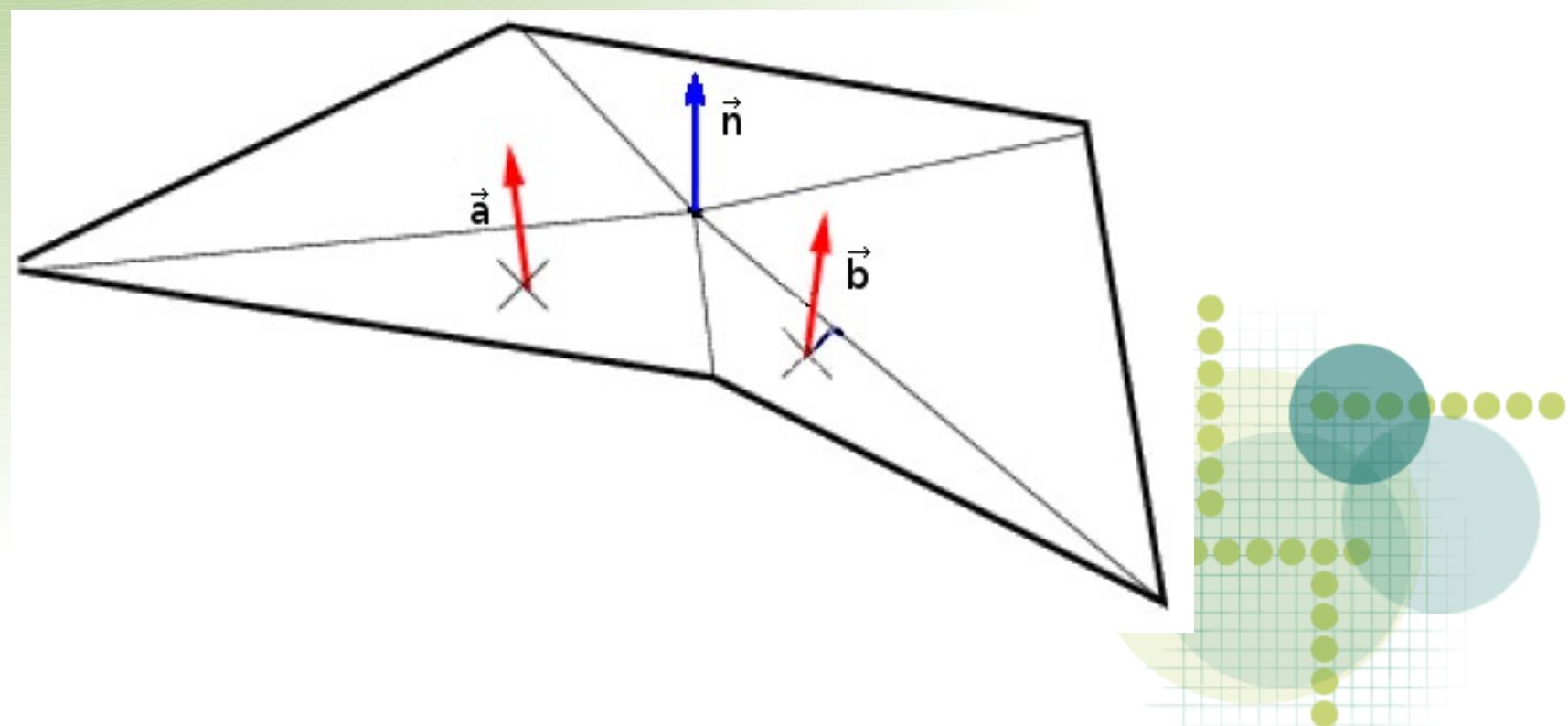


Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Раздел meshQualityControls

Для вычисления двух следующих параметров грань разбивается на треугольники с вершиной в центре грани.

- *minTwist* – минимальный изгиб грани. Вычисляется как скалярное произведение нормали к грани и нормали в центре треугольника. Значение < -1 отключает проверку параметра.
- *minTriangleTwist* – Вычисляется как скалярное произведение нормалей двух соседних треугольников. Значение должно быть больше 0 для совместимости с Fluent.



Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Раздел meshQualityControls

- *minDeterminant* – минимальный определитель элемента, вычисляется через векторы площади граней ячейки по следующей формуле:

$$F = \sum_{\text{грани}} |\vec{F}_a| \quad t_{i,j} = \sum_{\text{грани}} \frac{\vec{F}_{a_i} * \vec{F}_{a_j}}{|\vec{F}_{a_j}|}$$

$$\text{Determinant} = \left| \frac{t_{i,j}}{F} \right| / 0.03703$$



Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Раздел meshQualityControls

- *errorReduction* – коэффициент для снижения поля перемещений в точках где накапливаются ошибки.
- *nSmoothScale* – количество итераций сглаживания поля перемещений.
- *relaxed* – подраздел содержащий измененный параметры, которые будут применяться при превышении значения nRelaxedIter в процессе добавления слоя(необязательный параметр).



Построение неструктурированных сеток с помощью snappyHexMesh

Запуск в параллельном режиме

SnappyHexMesh может запускаться в параллельном режиме на нескольких процессорах. Для этого надо:

- 1) Корректно составить файл decomposeParDict. Причем метод разбиения должен быть hierarchical.
- 2) Создать «фоновую» сетку как обычно.
- 3) Запустить утилиту decomposePar.
- 4) Запустить snappyHexMesh в параллельном режиме. Возможны 2 команды:
 - foamJob -p -s snappyHexMesh {options}
 - mpirun -np n snappyHexMesh {options} -parallel
- 5) Восстановить сетку командой reconstructParMesh -mergeTol 1e-06 -constant.

