

# Применение СПО для решения задач аэро- и газовой динамики

Семинар 3. Создание STL формы в пакете Salome. Построение сетки вокруг формы с использованием утилиты snappyHexMesh.

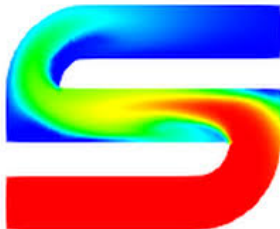
Преподаватель: Романова Дарья Игоревна

Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, Москва

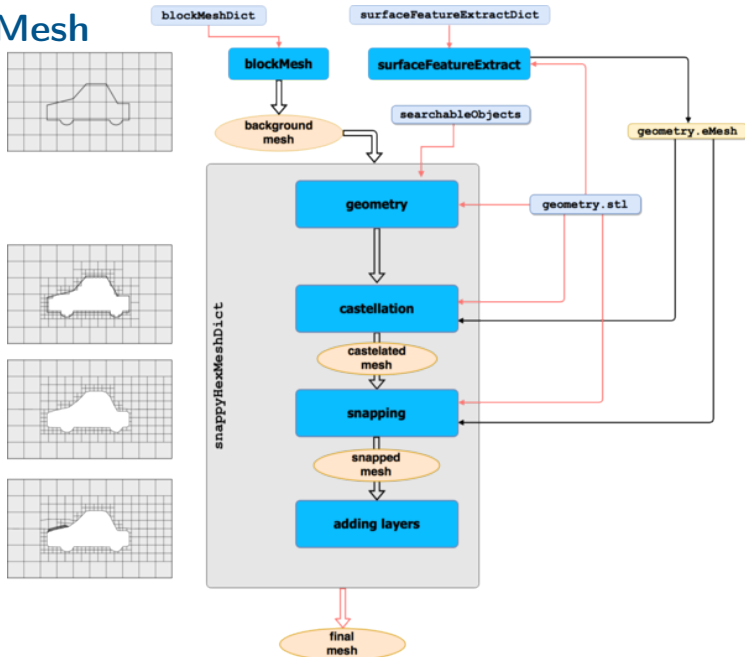
2023

# Установка пакета Salome

Выбираем нужную версию пакета Salome и скачиваем.

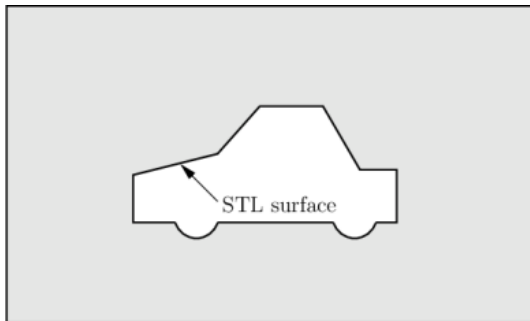


# snappyHexMesh



## snappyHexMesh

Изучим утилиту создания сетки `snappyHexMesh`, поставляемую с пакетом OpenFOAM. Утилита `snappyHexMesh` автоматически генерирует трехмерные сетки, содержащие шестигранники (hex) на основе геометрии триангулированной поверхности в формате стереолитографии (STL). Утилита позволяет дробить сетку в выделенных областях, создавать слои измельчения, мельчить сетку в соответствии с требованиями качества сетки. Все эти действия утилита `snappyHexMesh` может проводить в параллельном режиме.



## Файлы необходимые для запуска

Для запуска утилиты `snappyHexMesh` необходимы:

- ▶ файлы данных поверхности в формате STL (двоичном или ASCII), расположенные в подкаталоге `constant/triSurface` каталога кейса;
- ▶ фоновую сетку из параллелепипедов, которая определяет протяженность расчетной области и плотность сетки базового уровня (обычно генерируется с использованием `blockMesh`);
- ▶ словарь `snappyHexMeshDict` с соответствующими записями, расположенный в подкаталоге `system` каталога кейса.

## snappyHexMeshDict

Файл snappyHexMeshDict содержит в себе выключатели для контроля различных этапов создания сетки и также вложенные словари для описания этих этапов.

Ключевое слово	Описание	Пример
castellatedMesh	Создать зубчатую сетку?	true
snap	Есть ли стадия привязки к поверхности?	true
addLayers	Добавить слои у поверхности?	true
mergeTolerance	Допуск слияния как доля ограничивающей рамки исходной сетки	1e-06
debug	Управляет записью промежуточных сеток и трафаретной печатью	
	— Записывает только конечную сетку	0
	— Записывает промежуточные сетки	1
	— Записывает volScalarField с уровнем ячейки для постобработки	2
	— Записывает текущие пересечения как .obj	4

# snappyHexMeshDict

Ключевое слово	Описание
geometry	Подсловарь всей используемой геометрии поверхности
castellatedMeshControls	Подсловарь элементов управления для зубчатой сетки
snapControls	Подсловарь элементов управления для привязки к поверхности
addLayersControls	Подсловарь элементов управления для добавления слоев
meshQualityControls	Подсловарь элементов управления качеством сетки

## snappyHexMeshDict

Вся геометрия, используемая `snappyHexMesh`, указана в подсловаре `geometry` в словаре `snappyHexMeshDict`. Геометрию можно указать с помощью поверхности STL или объектов ограничивающей геометрии в `blockMesh` OpenFOAM.

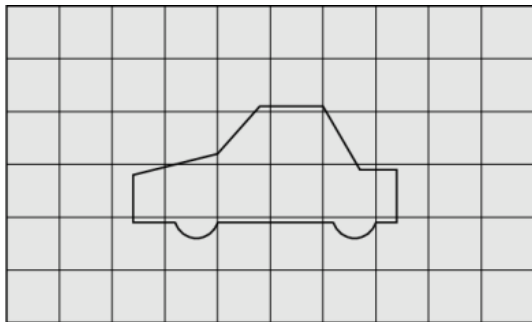
```
0 geometry{
1     surface.stl { // STL filename
2         type triSurfaceMesh;
3         regions{
4             secondSolid {                // Named region in the STL file
5                 name mySecondPatch; // User-defined patch name
6             }
7         }
8     }
9     box1x1x1 { // User defined region name
10         type      searchableBox;        // region defined by bounding box
11         min        (1.5 1 -0.5);
12         max        (3.5 2 0.5);
13     }
14 };
```



Полный список аналитических форм, например, для объектов ограничивающей геометрии можно найти в интернете: <https://www.openfoam.com/documentation/cpp-guide/html/guide-meshing-snappyhexmesh-geometry.html>

## Создание фоновой сетки

Перед выполнением `snappyHexMesh` пользователь должен создать фоновую сетку из шестигранных ячеек, которая заполняет всю область внутри внешней границы.



# Создание фоновой сетки с помощью утилиты blockMesh

Это можно сделать с помощью blockMesh. При создании фоновой сетки необходимо соблюдать следующие критерии:

- ▶ сетка должна состоять исключительно из шестигранников (желательно кубов);
- ▶ соотношение сторон ячеек должно быть приблизительно равно 1, по крайней мере вблизи поверхностей, к которым применяется последующая процедура привязки, иначе сходимость процедуры привязки будет медленной, а возможно приведёт к ошибке;
- ▶ должно быть хотя бы одно пересечение ребра ячейки с поверхностью STL, т.е. сетка из одной ячейки не подойдет.

# Измельчение сетки на пересечении с поверхностью STL

Измельчение сетки выполняется в соответствии со спецификацией, предоставленной пользователем в подсловаре `castellatedMeshControls` в `snappyHexMeshDict`.

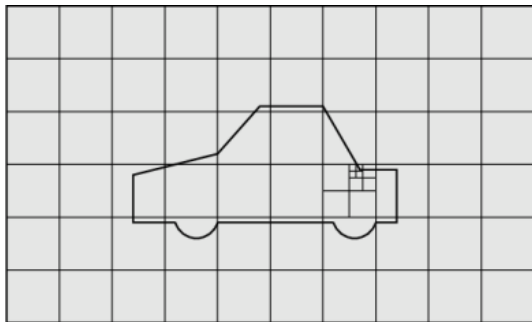
Ключевое слово	Описание	Пример
<code>locationInMesh</code>	Вектор указывающий на точку внутри сетки. Вектор должен указывать внутрь какой-либо ячейки (не на ребро или грань) как до, так и после процедуры измельчения сетки	(5 0 0)
<code>maxLocalCells</code>	Максимальное количество ячеек на процессор во время измельчения	$10^6$
<code>maxGlobalCells</code>	Общий лимит ячеек во время процедуры измельчения (т.е. перед процедурой удаления)	$2 \cdot 10^6$
<code>minRefinementCells</code>	Минимальное количество ячеек для измельчения, по достижении этой величины процесс прекращается	0

## Измельчение сетки на пересечении с поверхностью STL

Ключевое слово	Описание	Пример
<code>maxLoadUnbalance</code>	Максимальный дисбаланс нагрузки процессоров во время процедуры измельчения (значение 0 задаёт абсолютный баланс)	0.1
<code>nCellsBetweenLevels</code>	Количество буферных слоев ячеек между разными уровнями измельчения	1
<code>resolveFeatureAngle</code>	Применяет максимальный уровень измельчения к ячейкам, которые пересекаются с поверхностью STL под углом превышающим заданный	30
<code>allowFreeStandingZoneFaces</code>	Разрешить создание граней отдельно стоящих зон	false
<code>features</code>	Список особенностей для применения процедуры измельчения	
<code>refinementSurfaces</code>	Словарь поверхностей требующих процедуры измельчения	
<code>refinementRegions</code>	Словарь регионов требующих измельчения	

# Измельчение сетки на пересечении с поверхностью STL

Процесс измельчения начинается с ячеек пересекающихся с поверхностью STL, как показано на рисунке



# Измельчение сетки на пересечении с поверхностью STL

Ячейки пересекающиеся с поверхностью STL перечислены в файле `features.eMesh`. Подсловарь `features` содержит в себе имена файлов `edgeMesh`, содержащих в себе перечисления рёбер пересечения с поверхностью STL и уровень измельчения, который необходимо реализовать.

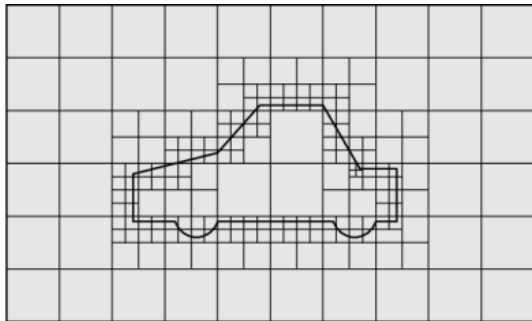
```
0 features
1 (
2     {
3         file "features.eMesh"; // file containing edge mesh
4         level 2;                // level of refinement
5     }
6 );
```

Файл `edgeMesh` может быть получен с помощью утилиты `surfaceFeatureExtract`:

```
0 surfaceFeatureExtract -includedAngle 150 surface.stl features
```

# Измельчение сетки на пересечении с поверхностью STL

Измельчённые ячейки, выбранные в соответствии с элементами, перечисленными в файле `features.eMesh`, показаны на рисунке





# Измельчение сетки на пересечении с поверхностью STL

В подсловаре `refinementSurfaces` словаря `castellatedMeshControls` объявляются все поверхности STL с указанием уровня по умолчанию для минимального и максимального измельчения. Минимальный уровень наносится обычно по всей поверхности; максимальный уровень применяется к ячейкам, которые могут видеть пересечения, образующие угол, превышающий угол, указанный в `resolveFeatureAngle`.

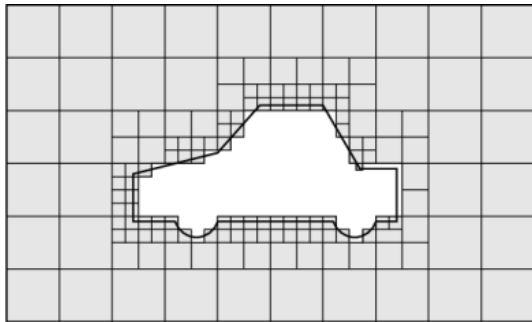
Дополнительное измельчение может быть задано для одной или нескольких конкретных областей поверхности STL. Эти области перечисляются в подсловаре `regions`. Для каждой такой области создается подсловарик с указанием уровня измельчения.

# Измельчение сетки на пересечении с поверхностью STL

```
0 refinementSurfaces
1 {
2     sphere.stl
3     {
4         level (2 2); // default (min max) refinement for whole surface
5         regions
6         {
7             secondSolid
8             {
9                 level (3 3); // optional refinement for secondSolid region
10            }
11        }
12    }
13 }
```

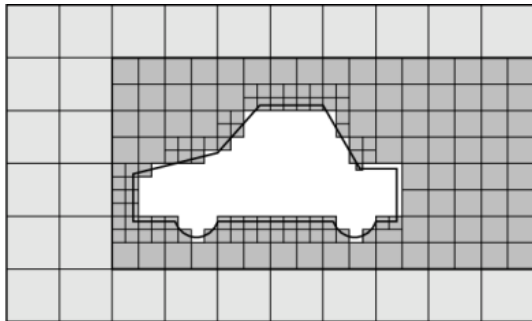
## Удаление ячеек

После окончания процедуры измельчения по подсловарям `features` и `refinementSurfaces` начинается процедура удаления ячеек. Для удаления необходима область полностью находящаяся внутри поверхности STL. Область, в которой сохраняются клетки, задаётся вектором указывающим внутрь этой области, заданным ключевым словом `locationInMesh` в `castellatedMeshControls`. Ячейки сохраняются, если, примерно, 50% и более их объема приходится на область. Остальные ячейки удаляются.



## Измельчение ячеек в регионах

Ячейки, находящиеся внутри некоторого региона могут быть дополнительно измельчены, как показано на рисунке (область закрашенная тёмным дополнительно измельчена).



## Измельчение ячеек в регионах

Регионы для дополнительного измельчения перечислены в подсловаре `refinementRegions` словаря `castellatedMeshControls`. Дополнительное измельчение может быть применено к ячейкам

- ▶ находящимся внутри некоторого объёма,
- ▶ находящимся снаружи некоторого объёма,
- ▶ находящимся на некотором расстоянии от STL поверхности.

Для регионов измельчения задаётся уровень необходимого измельчения.

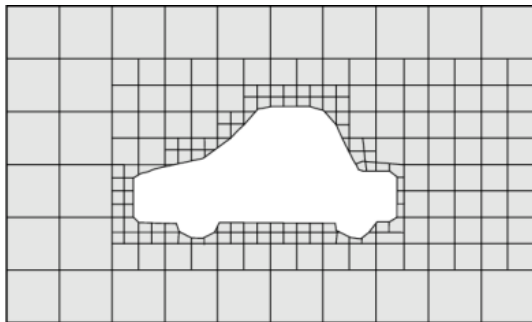
## Измельчение ячеек в регионах

```
0 refinementRegions
1 {
2     box1x1x1
3     {
4         mode inside;
5         levels ((1.0 4));           // refinement level 4 (1.0 entry ignored)
6     }
7     sphere.stl
8     {                               // refinement level 5 within 1.0 m
9         mode distance;             // refinement level 3 within 2.0 m
10        levels ((1.0 5) (2.0 3)); // levels must be ordered nearest first
11    }
12 }
```

Уровень измельчения всегда задаётся в формате ((<дистанция> <уровень>)), в случае режима измельчения внутри подобласти параметр <дистанция> игнорируется. На различном удалении от STL поверхности можно задать различный уровень измельчения, уровни перечисляются в порядке возрастания дистанции.

## Привязка к поверхности

Следующий этап процесса создания сетки включает в себя перемещение точек вершин ячеек на STL поверхность, чтобы удалить зубчатую поверхность сетки.



# Привязка к поверхности

Процесс привязки:

1. сместить вершины зубчатой границы на поверхность STL;
2. перераспределить более равномерно внутреннюю сетку в соответствии с перемещёнными вершинами;
3. найти вершины, смещение которых привело к нарушению параметров качества сетки;
4. уменьшить смещение таких вершин и перераспределить внутреннюю сетку (повторяется до тех пор, пока требования к качеству сетки не будут удовлетворены).



## Привязка к поверхности

Настройки для процедуры привязки вершин к поверхности перечислены в подсловаре `snapControls` словаря `snappyHexMeshDict`.

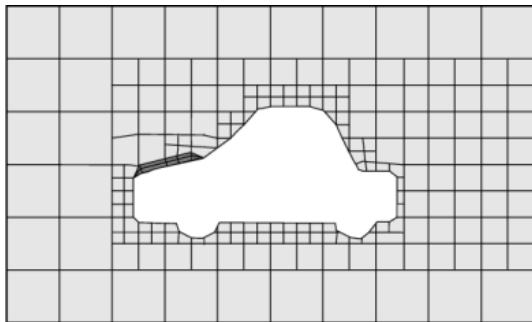
Ключевое слово	Описание	Пример
<code>nSmoothPatch</code>	Количество итераций сглаживания	3
<code>tolerance</code>	Отношение расстояния до точек от края к локальной максимальной длине края	4.0
<code>nSolveIter</code>	Количество итераций смещения внутренней сетки	30
<code>nRelaxIter</code>	Максимальное количество итераций перемещения точки с последующим смещением внутренней сетки	5
<code>nFeatureSnapIter</code>	Количество итераций создания новых ячеек с последующей привязкой вершин и смещением внутренней сетки для удовлетворения критериев качества сетки	10

## Привязка к поверхности

Ключевое слово	Описание	Пример
<code>implicitFeatureSnap</code>	Локальный поиск вершин (по геометрическим параметрам)	false
<code>explicitFeatureSnap</code>	Глобальный поиск вершин с использованием параметров <code>castellatedMeshControls</code>	true
<code>multiRegionFeatureSnap</code>	Поиск вершин между несколькими поверхностями с использованием глобального поиска	false

## Дополнительные слои сетки

Сетка полученная после этапа привязки вершин может быть подходящей для использования, однако ячейки вдоль STL поверхностей в ней могут быть распределены неравномерно. Для исправления этого недостатка существует дополнительный этап создания слоя ячеек сетки выровненных вдоль поверхности STL, как показано на рисунке.



## Дополнительные слои сетки

Процесс добавления слоя сетки включает в себя отодвигание ячеек от STL поверхности посредством сжатия и вставку дополнительных слоев ячеек следующим образом:

1. сетка отодвигается от поверхности на заданную толщину в направлении внешней нормали к поверхности;
2. перераспределение сетки для равномерности из-за перемещения;
3. проверка удовлетворения критериев качества сетки, если критерии качества не удовлетворяются, то изменяется толщина смещения сетки и заново выполняется перераспределение сетки. В случае, если удовлетворить критерии качества не представляется возможным ни при какой величине смещения слои не вставляются;
4. если критерии качества удовлетворены, вставляются дополнительные слои сетки;
5. проверка удовлетворения критериев качества сетки, если критерии качества не удовлетворяются, то слои удаляются и заново выполняется этап перераспределения сетки.

## Дополнительные слои сетки

Процедура добавления слоя использует настройки из подсловаря `addLayersControls` в словаре `snappyHexMeshDict`.

Ключевое слово	Описание	Пример
<code>layers</code>	Словарь перечисления дополнительных слоёв	
<code>relativeSizes</code>	Толщина слоя задаётся относительной величиной к неискаженному размеру ячейки вне слоя или абсолютной?	<code>true</code>
<code>expansionRatio</code>	Коэффициент расширения для слоев сетки	<code>1.0</code>
<code>finalLayerThickness</code>	Толщина самого дальнего от поверхности слоя, относительная или абсолютная в соответствии с записью <code>relativeSizes</code>	<code>1</code>
<code>firstLayerThickness</code>	Толщина ближайшего к поверхности слоя	<code>0.3</code>
<code>thickness</code>	Общая толщина всех слоев	<code>0.3</code>
<code>minThickness</code>	Минимальная общая толщина всех слоев, ниже которой дополнительные слои не добавляются	<code>0.1</code>

## Дополнительные слои сетки

Ключевое слово	Описание	Пример
nGrow	Количество связанных слоев, которые не утолщаются во время этапа перераспределения сетки	1
featureAngle	Угол пересечения грани с поверхностью, выше которого измельчение происходить не будет	60
maxFaceThicknessRatio	Максимальное отношение для поверхности грани, выше которого измельчения не происходит (полезно для деформированных ячеек)	0.5
nSmoothSurfaceNormals	Количество итераций перераспределения (сглаживания) для нормалей к поверхности	1
nSmoothThickness	Толщина слоя сглаживания (перераспределения ячеек) от поверхности STL	10
minMedialAxisAngle	Угол, используемый для захвата точек медиальной оси	90

## Дополнительные слои сетки

Ключевое слово	Описание	Пример
<code>maxThicknessToMedialRatio</code>	Уменьшение растяжения слоя при перераспределении сетки там, где отношение толщины к медиальному расстоянию велико	0.3
<code>nSmoothNormals</code>	Количество итераций перераспределения внутренних нормалей сетки	3
<code>nRelaxIter</code>	Максимальное количество итераций перераспределения сетки	3
<code>nBufferCellsNoExtrude</code>	Создание буферного слоя на границе старого и нового слоёв сетки	0
<code>nLayerIter</code>	Общее максимальное количество итераций добавления слоев	50
<code>nRelaxedIter</code>	Максимальное количество итераций, после которых используются элементы управления в подсловаре <code>relaxed</code> словаря <code>meshQuality</code>	20

## Дополнительные слои сетки

Подсловарь `layers` содержит перечисление границ, требующих добавления дополнительных слоёв сетки.

```
0 layers
1 {
2     sphere.stl_firstSolid
3     {
4         nSurfaceLayers 1;
5     }
6     maxY
7     {
8         nSurfaceLayers 1;
9     }
10 }
```



## Контроль качества сетки

Качество сетки контролируется опциями в подсловаре `meshQualityControls` в `snappyHexMeshDict`.

Ключевое слово	Описание	Пример
<code>maxNonOrtho</code>	Максимально допустимая неортогональность; 180 — отключено	65
<code>maxBoundarySkewness</code>	Максимальная скошенность грани (0 — выключено)	20
<code>maxInternalSkewness</code>	Максимальная скошенность внутренней грани (0 — выключено)	4
<code>maxConcave</code>	Максимально допустимая вогнутость грани (180 — выключено)	80
<code>minFlatness</code>	Отношение минимальной проекции площади к фактической площади (-1 — выключено)	0.5
<code>minVol</code>	Минимальный объём пирамиды (большое негативное число $-10^{30}$ — выключено)	$10^{-13}$

## Контроль качества сетки

Ключевое слово	Описание	Пример
minTetQuality	Минимальное качество тетраэдра, заданное отношением нормалей к граням из центра тетраэдра (большое негативное число $-10^{30}$ — выключено)	$10^{-13}$
minArea	Минимальная площадь грани (-1 — выключено)	-1
minTwist	Минимальный поворот грани (-1 — выключено)	0.05
minDeterminant	Минимальный определитель ячейки: 1 задаёт куб, 0 — вырожденную ячейку	0.001
minFaceWeight	от 0 до 0.5	0.05
minVolRatio	от 0 до 1	0.01
minTriangleTwist	положительное число (-1 — выключено)	-1
nSmoothScale	Количество итераций распределения ошибок	
errorReduction	Величина уменьшения смещения в точках ошибки	0.75
relaxed	Подсловарь, который может включать измененные значения для указанных выше записей ключевых слов, которые будут использоваться при превышении nRelaxedIter в процессе добавления слоя	

# Задачи

1. Изменить уровень измельчения сетки на пересечении со сферой на 3
2. Создать область измельчения сетки с уровнем 2
3. Создать дополнительный слой сетки толщиной в 3 ячейки
4. Изучить влияние качества сетки на аэродинамические коэффициенты (python3 CdCl.py)

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

# Список литературы