

УДК 004.457

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УТИЛИТ BLOCKMESH И SNAPPYHEXMESH ПРОГРАММНОЙ СРЕДЫ OPENFOAM

Д.И. Читалов, Д.Н. Тимофеев

Представлены особенности применения утилит генерации расчетных сеток (РС) с градуирующими и изогнутыми углами и РС, состоящих из шестигранников и разделенных шестигранников на основе геометрий триангулированной поверхности. Приведены блоки параметров, определяющих характеристики соответствующих генерируемых РС.

Ключевые слова: OpenFOAM, расчетные сетки, утилита blockMesh, утилита snappyHexMesh, открытое программное обеспечение.

Введение. PC OpenFOAM [1] представляет собой мощный и эффективный инструмент для моделирования задач механики сплошных сред (МСС), прежде всего задач, относящихся к аэро- и гидродинамике. Данная PC относится к свободно распространяемому программному обеспечению (ПО), ее исходный код находится в открытом доступе. С PC OpenFOAM связано понятие расчетного случая, который соответствует конкретной задаче МСС и представляет собой набор служебных директорий и файлов с расчетными параметрами.

Подготовка РС относится к одному из важнейших этапов численного моделирования задач МСС, от которого зависит верность и точность итогового результата. Настоящая статья посвящена особенностям подготовки РС посредством утилит «blockMesh» и «snappyHexMesh» [2, 3], которые поддерживаются в релизах PC OpenFOAM, начиная с версий 1.0 и 1.5, соответственно.

1. Построение РС посредством стандартной утилиты «blockMesh». Это одна из базовых утилит, входящих в стандартный дистрибутив PC OpenFOAM, предназначенная для формирования параметрических сеток, имеющих градуирующие и изогнутые края. Утилита считывает данные из файла «blockMeshDict» и формирует РС, записывая параметры сетки в служебные файлы «points», «faces», «cells», «boundary» директории «constant/polyMesh». Файл «blockMeshDict» с параметрами РС должен быть подготовлен перед запуском утилиты генерации сетки. Каждый из шести разделов файла «blockMeshDict» задается ключевым словом, которое соответствует определенному разделу параметров РС:

– «convertToMeters». Представляет собой коэффициент масштабирования для координат вершин. Задается в виде числа, на которое умножаются значения всех координат, приведенные в мм;

– «vertices». Список координат для каждой из вершин блока, входящего в расчетную область;

– «edges». По умолчанию каждое ребро, связывающее пару вершин, считается прямым. При этом изогнутая форма ребра задается в разделе «edges» файла. В качестве типа изогнутой формы доступно одно из следующих описаний: сплайновая кривая (ключевое слово «spline»), набор линий («polyLine»), B-сплайновая кривая («BSpline»);

– «blocks». Раздел содержит блоки-шестигранники, образующие расчетную область. Каждый шестигранник определяется ключевым словом «hex», последовательностью меток вершин, числом ячеек в каждом направлении и степенью расширения ячеек для каждого направления. Степень расширения позволяет градуировать (измельчить) РС в каждом из направлений;

– «boundary». Раздел содержит список патчей (областей), формирующих границу РС. Каждый патч определяется именем, указываемым пользователем. Параметры каждого патча задаются в словаре и содержат тип патча и список формирующих его граней блока. Тип патча выбирается из списка возможных значений: универсальный (ключевое слово «patch»), плоскость симметрии («symmetryPlane»), передняя и задняя плоскости двумерной геометрии («empty»), передняя и задняя поверхности клина для осесимметричной геометрии («wedge»), циклическая плоскость («cyclic»), стенка в турбулентных потоках («wall»), граница, разделяющая процессоры («processor»);

– «mergePatchPairs». Раздел, в котором определяется список патчей для объединения. Данные в этом разделе могут быть заданы при наличии в расчетной области нескольких блоков.

2. Построение РС посредством стандартной утилиты «snappyHexMesh». Данная утилита автоматически формирует трехмерные РС из шестигранников и разделенных шестигранников на основе геометрий триангулированной поверхности в форматах (.STL) и (.OBJ). При использовании утилиты «snappyHexMesh» РС строится для прямоугольной области, окружающей объект, описанный посредством три-поверхности.

Для запуска утилиты «snappyHexMesh» пользователю необходимо выполнить несколько шагов:

1) подготовить набор файлов три-поверхности и поместить их в поддиректорию «constant/triSurface», расположенную в директории расчетного случая. Файлы три-поверхности создаются с помощью специализированных 3D-редакторов;

2) подготовить фоновую шестигранную сетку, определяющую размер расчетной области и параметры РС на базовом уровне. Как правило, фоновая сетка создается с помощью описанной выше утилиты «blockMesh»;

3) подготовить файл «snappyHexMeshDict» с исходными параметрами РС. Список и описание разделов, входящих в данный файл и задающих свойства сетки, представлены в табл. 1;

4) подготовить файл «surfaceFeatureExtractDict», определяющий параметры разбиения расчетной области.

Таблица 1

Список и описание разделов файла «snappyHexMeshDict»

Ключевое слово	Описание параметра
castellatedMesh	Переключатель, устанавливающий опцию создания зубчатой сетки
snap	Переключатель, устанавливающий опцию выполнения этапа привязки к поверхности
doLayers	Переключатель, устанавливающий опцию добавления поверхностных слоев
mergeTolerance	Значение допуска для граничной рамки исходной сетки
geometry	Раздел, содержащий список используемых в расчетной области геометрий и параметры геометрий
castellatedMeshControls	Раздел параметров зубчатой сетки
snapControls	Раздел параметров для привязки к поверхности
addLayersControls	Раздел параметров, управляющих добавлением слоев
meshQualityControls	Раздел параметров, отвечающих за контроль качества сетки
writeFlags	Дополнительные параметры, управляющие формированием сетки

Раздел «geometry»

Вся геометрия, используемая утилитой «snappyHexMesh», подразделяется на два класса: триангулированная поверхность (в том числе распределенная) (файл с расширением .STL или .OBJ) и базовая фигура. Параметры три-поверхностей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Список и описание параметров три-поверхностей

Тип три-поверхности	Список свойств
Стандартная три-поверхность	type, name
Распред-ая три-поверхность	type, name, distributionType

Кроме того, дополнительно пользователь может выделить на три-поверхности одну или несколько областей. Каждой области соответствует отдельный раздел, который помещается в раздел три-поверхности файла «snappyHexMeshDict».

Перечень возможных типов базовых фигур и их свойства приведены в табл. 3.

Таблица 3

Список и описание параметров базовых фигур

Тип базовой фигуры	Список свойств
Box (шестигранник)	type, min, max
Sphere (сфера)	type, centre, radius
Cylinder (цилиндр)	type, point1, point2, radius
Plane (плоскость)	type, planeType, basePoint, normalVector
Plate (пластина)	type, origin, span
Комплексная фигура (состоит из любого количества любых базовых фигур)	type, mergeSubRegions (общие свойства) surface, scale, type, origin, e1, e3 (свойст- ва для каждой фигуры)

Раздел «castellatedMeshControls»

Параметры зубчатой сетки, сохраняемые в разделе «castellatedMeshControls», и их описание приведены в табл. 4.

Таблица 4

Список и описание параметров раздела «castellatedMeshControls»

Ключевое слово	Описание параметра
maxLocalCells	Наибольшее число ячеек на процессор при измельчении
maxGlobalCells	Предел ячеек при измельчении
minRefinementCells	Минимальный уровень измельчения
nCellsBetweenLevels	Число буферных промежутков между уровнями градуировки
resolveFeatureAngle	Наибольший уровень измельчения для ячеек с пересечениями, угол которых больше данного значения
locationInMesh	Вектор расположения внутри области для наложения сеточной модели
allowFreeStandingZoneFaces	Макс. уровень измельчения ячеек
features	Набор элементов, подлежащих измельчению
refinementSurfaces	Набор поверхностей, подлежащих измельчению
refinementRegions	Набор областей для измельчения

Параметры «features»

В начале процесса разбиения осуществляется выбор ячеек на основе указанных краевых признаков в рамках расчетной области. Раздел «features» в данном случае включает количество элементов для измельчения, каждый из которых определяется двумя свойствами: файлом, содержащим краевую сетку и уровнем измельчения (или диапазоном уровней). Файл, содержащий краевую сетку, и имеющий расширение «eMesh», можно извлечь из файла три-поверхности посредством утилиты «surfaceFeatureExtract». При этом извлечение осуществляется на базе файла «surfaceFeatureExtractDict» с параметрами извлечения.

Параметры «refinementSurfaces»

По итогам разбиения элементов определяются ячейки для измельчения вблизи указанных поверхностей. Записи для каждой из поверхностей хранятся в словаре «refinementSurfaces». Помимо названия самой поверхности отдельная запись содержит минимальное и максимальное значения уровня измельчения.

При необходимости одну или несколько областей три-поверхности можно закрыть от измельчения. Они указываются в специальном подразделе «regions» записи. При этом отдельная область, измельчение которой необходимо обойти, определяется названием и собственным уровнем измельчения.

Параметры «refinementRegions»

Данный раздел определяет разбиение ячеек в отдельных областях. На каждую из областей накладывається режим измельчения, который определяется одним из следующих значений: «inside» (измельчение в пределах крупномасштабной области), «outside» (измельчение вне крупномасштабной области), «distance» (измельчение с учетом расстояния до поверхности). Уровни измельчения (или дистанция уровней) определяются списком записей «levels».

Раздел «snapControls»

Данный раздел содержит параметры переноса точек вершин ячейки на геометрию поверхности для исключения ступенчатой зубчатой поверхности из РС. Список параметров и их описания приведены в табл. 5. Необязательные параметры помечены символом (*).

Таблица 5

Список и описание параметров раздела «snapControls»

Ключевое слово	Описание параметра
nSmoothPatch	Количество итераций сглаживания до определения соответствия поверхности
tolerance	Отношение расстояния между точками, притягиваемыми характерной точкой поверхности
nSolverIter	Количество итераций релаксации перемещения
nRelaxIter	Наибольшее количество итераций релаксации привязки
nFeatureSnapIter*	Количество итераций привязки края объекта
implicitFeatureSnap*	Параметр, устанавливающий определение характеристик путем отбора проб поверхности
explicitFeatureSnap*	Параметр, устанавливающий использование castellatedMeshControls::features
multiRegionFeatureSnap*	Параметр, устанавливающий определение признаков между несколькими поверхностями

Раздел «addLayersControls»

Результаты РС, полученные в процессе выполнения этапа привязки, могут удовлетворять поставленным для этого целям, но в итоге вдоль по-

граничных поверхностей могут быть созданы некоторые ячейки неправильной формы. В процессе создания РС существует дополнительный этап, в ходе которого сетка дополняется дополнительными слоями шестигранных ячеек, выровненных вдоль пограничной поверхности.

Дополнительные слои записываются в подразделе «layers», содержащий записи, определяющие каждый патч, на который предполагается накладывать слои. Кроме того, каждая запись подраздела содержит указание на количество используемых слоев поверхности. При этом используется имя патча, поскольку включение дополнительных слоев относится к имеющейся РС, а не к геометрии поверхности. Таким образом, речь идет об обращении к патчу, а не к области поверхности. Список параметров и их описания приведены в табл. 6.

Таблица 6

Список и описание параметров раздела «addLayersControls»

Ключевое слово	Описание параметра
layers	Список добавляемых слоев
finalLayerThickness	Толщина конечного слоя добавленной ячейки
expansionRatio	Коэффициент расширения для слоя
minThickness	Минимальная толщина клеточного слоя
relativeSizes	Установить относит. размеры ячеек
featureAngle	Угол обзора
nSmoothSurfaceNormals	Число сглаживающих итераций поверхностных нормалей
nSmoothNormals	Количество сглаживающих итераций напр. движ. внутренней сетки
nSmoothThickness	Толщина слоя над поверх. патчами
minMedianAxisAngle	Угол для получения точек медиальной оси
maxThicknessToMedialRatio	Максимальная толщина слоя к медиальному расстоянию
maxFaceThicknessRatio	Максимальный рост слоя на деформированных клетках
nLayerIter	Общее максимальное количество итераций добавления слоев
nRelaxedIter	Макс. кол-во итераций, после которых применимы узлы meshQuality
nRelaxIter	Макс. количество релаксационных итераций привязки
nGrow	Конвергенция для слоя
nBufferCellsNoExtrude	Величина буферной области для завершения нового слоя

Раздел «meshQualityControls»

Качество РС управляется посредством параметров раздела «meshQualityControls». Их список и описания представлены в табл. 7. Необязательные параметры помечены символом (*).

Таблица 7

Список и описание параметров раздела «meshQualityControls»

Ключевое слово	Описание параметра
relaxedMaxNonOrtho	Максимальная неортогональность для свойств relaxed
nSmoothScale	Количество итераций распространения ошибок
errorReduction	Величина уменьшения смещения в точке ошибки
maxNonOrtho	Максимальная ортогональность
maxBoundarySkewness	Максимальная асимметрия границы
maxInternalSkewness	Максимальная внутренняя асимметрия
maxConcave	Максимальная вогнутость
minVol	Минимальный объем пирамиды
minArea	Минимальная площадь грани
minTetQuality	Минимальное качество тетраэдра
minTwist	Минимальное скручивание грани
minDeterminant	Минимальная нормированная детерминанта ячейки
minFaceWeight	Минимальный вес грани
minVolRatio	Минимальное объемное соотношение соседних ячеек
minTriangleTwist	Минимальное треугольное скручивание

Раздел «writeFlags»

Данный раздел содержит набор параметров, определяющих дополнительные свойства РС. Эти параметры приведены в табл. 8.

Таблица 8

Список и описание параметров раздела «writeFlags»

Ключевое слово	Описание параметра
scalarLevels	Записать volScalarField с cellLevel для постобработки
layerSets	Записать cellSets, faceSets граней в слое
layerFields	Записать volScalarField для покрытия слоя

Параметры файла «surfaceFeatureExtractDict», определяющего параметры извлечения файла с краевой сеткой на основе утилиты «surfaceFeatureExtract», представлены в табл. 9.

Таблица 9

Список и описание параметров файла «surfaceFeatureExtractDict»

Ключевое слово	Описание параметра
*.stl	Название файла три-поверхности, из которой происходит извлечение
extractionMethod	Указание метода извлечения
includedAngle	Угол извлечения из поверхностей
writeObj	Запись функций в формат «obj» для постобработки

Заключение. Рассмотрены утилиты «blockMesh» и «snappyHexMesh», обеспечивающие генерацию двух типов РС и встроенные в свободно распространяемый пакет OpenFOAM, предназначенный для численного моделирования задач МСС. Приведено описание служебных файлов, соответствующих каждой утилите и содержащих параметры, определяющие свойства генерируемых РС. Представлены ключевые слова, соответствующие каждому параметру и их описания.

Библиографический список

1. OpenFOAM. The open source CFD toolbox [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.openfoam.com/>.
2. OpenFOAM. Tutorial Guide [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.openfoam.com/documentation/tutorial-guide/index.php/>.
3. OpenFOAM. User Guide [Электронный ресурс]. – URL: <http://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/OpenFOAMUserGuide-A4.pdf/>.

[К содержанию](#)