

**Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Уфимский университет науки и технологий»**

Кафедра Высокопроизводительных вычислительных технологий и систем

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
100										
90										
80										
70										
60										
50										
40										
30										
20										
10										
0										

ИЗУЧЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО ПАКЕТА OPENFOAM

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к курсовой работе по дисциплине

«Методы оптимизации»

3952.336113.000 ПЗ

Группа ПМ-453	Фамилия И.О.	Подпись	Дата	Оценка
Студент	Шамаев И.Р.			
Консультант	Михайленко К.И.			
Принял	Лукащук В.О.			

Уфа 2023

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Уфимский университет науки и технологий»

Кафедра Высокопроизводительных вычислительных технологий и систем

ЗАДАНИЕ

на курсовую работу по дисциплине

«Методы оптимизации»

Студент: Шамаев Ильдар Рустемович

Группа: ПМ-453

Консультант: Михайленко Константин Иванович

Тема курсовой работы

Сравнительный анализ применимости вычислительных сеток, созданных
утилитами BlockMesh и SnappyHexMesh

Задачи курсовой работы

1. Генерация сетки в OpenSCAD и выделение областей в Autodesk MeshMixer.
2. Изучение теоретического материала утилиты SnappyHexMesh.
3. Генерация сетки в SnappyHexMeshDict и добавление пограничного слоя.
4. Постобработка результата и сравнение скорости счета моделей.

Дата выдачи задания

"__" _____ 202_ г.

Дата окончания работы

"__" _____ 202_ г.

Консультант _____ Михайленко К.И.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Теоретическая часть.....	5
1.1. Система уравнений массы и импульса.....	5
1.2. Алгоритм PIMPLE.....	8
2. Практическая часть.....	10
2.1. Постановка задачи.....	10
2.2. Генерация сетки.....	11
2.2.1. Генерация сетки в OpenSCAD.....	11
2.2.2. Выделение областей в программе Autodesk MeshMixer.....	12
2.2.3. SnappyHexMesh.....	13
2.2.3.1. Добавления пограничного слоя.....	16
2.3. Граничные и начальные условия.....	18
2.4. Запуск приложения.....	19
2.5. Изменения в модели BlockMesh.....	20
2.6. Постобработка.....	23
Заключение.....	24
Список литературы.....	25
Приложение А	26

ВВЕДЕНИЕ

OpenFOAM — платформа для численного моделирования задач механики сплошных сред, которая позволяет решать задачи гидродинамики ньютоновских и неньютоновских вязких жидкостей, как в несжимаемом, так и сжимаемом приближении с учётом конвективного теплообмена.

Цель исследования – вычислительное моделирование динамики газопылевой среды в воздухоочистителе циклонного типа в OpenFOAM и сравнение с моделью, построенной в BlockMesh. Цель достигается путем решения следующих задач:

- 1) Исследование алгоритма PIMPLE
- 2) Генерация сетки для воздухоочистителя циклонного типа средствами OpenSCAD и изучение утилиты SnappyHexMesh
- 3) Описание начальных условий динамики газа и добавление пограничного слоя
- 4) Демонстрация результатов динамики газа

1. Теоретическая часть

1.1. Система уравнений массы и импульса

Запишем уравнения массы и импульса в эйлеровых переменных:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla_k \rho v_k = 0, \quad \rho \frac{\partial v_l}{\partial t} + \rho v_k \nabla_k v_l = \nabla_k \sigma_{kl} + \rho F_l \quad (l = 1, 2, 3). \quad (3.1)$$

Отнесенная к единице массы удельная внешняя объемная сила, имеющая размерность ускорения, часто задается в виде функции координат, в частности в виде потенциального поля:

$$\mathbf{F} = -\vec{\nabla} U \quad (F_l = -\nabla_l U), \quad (3.2)$$

частным случаем которого является поле силы тяжести. Если, например, в условиях Земли в исследуемом объеме движения среды сила тяжести меняется мало (вертикальный размер исследуемого объема h_3 много меньше радиуса Земли R):

$$h_3 \ll R \approx 6370 \text{ км}, \quad (3.3)$$

то удельная сила тяжести (действующая на единичную массу) определяется постоянным вектором, определяемым ускорением силы тяжести g :

$$\mathbf{F} = g \mathbf{e}_3, \quad g = 9,81 \text{ м/с}^2, \quad (3.4)$$

где единичный вектор \mathbf{e}_3 направлен вертикально вниз.

Помимо силы тяжести необходимо учитывать силу инерции из-за неинерциальности системы координат. Отнесенная к единице массы удельная сила инерции определяется ускорением силы инерции $\mathbf{a}_{(in)}$.

Эта сила, или определяющее ее ускорение, состоит из трансляционной (translation) силы инерции $\mathbf{a}_{(tran)}$, равной взятому с обратным знаком ускорению поступательного движения системы отсчета вместе с началом координат, и двух сил инерции, обусловленных вращением системы координат с угловой скоростью $\boldsymbol{\Omega}$, проходящей через начало координат. Этими силами инерции являются центробежная ($\mathbf{a}_{(cen)}$), равная центростремительному ускорению, взятому с обратным знаком, и кориолисова ($\mathbf{a}_{(cor)}$), равная кориолисову ускорению, взятому с обратным знаком, где индексы (cen) и (cor) образованы образованы от английских терминов centrifugal force (центробежная сила) и corioles force (кориолисова сила):

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{(in)} &= \mathbf{a}_{(tran)} + \mathbf{a}_{(cen)} + \mathbf{a}_{(cor)}, \\ \mathbf{a}_{(cen)} &= \Omega^2 \mathbf{r}, \quad \mathbf{a}_{(cor)} = -2[\Omega \times \mathbf{v}], \end{aligned} \quad (3.5)$$

где \mathbf{r} - радиус-вектор, исходящий из начала координат к рассматриваемой материальной точке; \mathbf{v} - скорость рассматриваемой материальной частицы относительно начала координат. В частности, для системы координат, связанной с Землей, следует иметь в виду, что угловая скорость вращения Земли равна $\Omega = 1/24 \text{ час}^{-1} = 0,1157 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$.

И, наконец, на среды может действовать пондеромоторная сила \mathbf{R} со стороны электромагнитного поля, зависящая от скорости материальной точки \mathbf{v} . В итоге для удельной массовой силы получим

$$\mathbf{F} = \mathbf{g}' + \mathbf{R}, \quad \mathbf{g}' = \mathbf{g} + \mathbf{a}_{(in)}. \quad (3.6)$$

Для описания электромагнитных эффектов необходимо привлекать законы и уравнения электродинамики.

Центробежная сила, как и сила тяжести, является потенциальной ($U_{(cen)} = -\Omega^2 r^2$), а поле кориолисовой силы - непотенциальным.

Рассмотрим так называемые классические модели, когда объемную силу \mathbf{F} можно считать заданной.

При течениях с достаточно большими ускорениями часто внешняя: объемная (массовая) сила значительно меньше силы инерции среды и градиентов поверхностных сил:

$$|\mathbf{F}| \ll \left| \frac{d\mathbf{v}}{dt} \right| \quad \text{или} \quad \rho |\mathbf{F}| \ll |\nabla_k \sigma_k| \quad (\mathbf{F} = \mathbf{g} - \mathbf{a}_{(in)} + \mathbf{R}). \quad (3.7)$$

Заметим, что здесь первое и второе условия эквивалентны, а именно: если выполняется первое условие, то выполняется и второе, и наоборот. При этом уравнение импульса имеет вид

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{\partial \sigma_k}{\partial x_k}. \quad (3.8)$$

Отметим, что даже в статических системах, где отсутствуют силы инерции ($d\mathbf{v}/dt = 0$), внешними массовыми силами, например силой тяжести, можно пренебречь, если размер (L) этих систем, а соответственно, и их вес много меньше других сил.

Для замыкания системы уравнений (3.1)-(3.2) необходимы уравнения состояния, в частности уравнения, определяющие тензор напряжений и называемые реологическими уравнениями (термин «реология» происходит от греческого слова «реос» (течение)). Как показывают эксперименты, тензор напряжений определяется в первую очередь тензором деформаций и тензором скоростей деформаций. Уравнения состояния, в том числе и реологические уравнения, в отличие от уравнений неразрывности и импульса, учитывают характерные механические свойства рассматриваемого тела. В общем случае в реологических уравнениях проявляются температурные (тепловые), электромагнитные и другие физико-химические процессы. В связи с этим построение реологических уравнений, помимо привлечения общих принципов математики и физики и использования результатов экспериментов, требует привлечения законов и уравнений термодинамики и электродинамики.

Рассмотрим более простые классические замкнутые модели механики сплошной среды. Соответствующие им реологические соотношения, или уравнения состояния, получаются из простых и интуитивных соображений, экспериментальных фактов и обобщения их на основе общих принципов математики и физики, без привлечения уравнений термодинамики, электродинамики, когда нет фазовых превращений (например, испарения и конденсации) и химических реакций (например, горения).

Уравнение неразрывности позволяет получить другое представление для субстанциональной производной:

$$\rho \frac{df}{dt} \equiv \rho \frac{\partial f}{\partial t} + \rho v_k \nabla_k f = \frac{\partial \rho f}{\partial t} + \nabla_k (\rho v_k f). \quad (3.9)$$

Последнее представление называется дивергентным. Дивергентное представление удобно при численном модел. Докажем это равенство, используя правило дифференцирования произведения ρ и f в частной производной по времени и произведения $\rho v_k f$ в операторе ∇_k :

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t} \rho f + \nabla_k (\rho v_k f) &= \rho \frac{\partial f}{\partial t} + f \frac{\partial \rho}{\partial t} + f \nabla_k (\rho v_k) + \rho v_k \nabla_k f = \\ &= \rho \left(\frac{\partial f}{\partial t} + v_k \nabla_k f \right) + f \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla_k (\rho v_k) \right).\end{aligned}\quad (3.9a)$$

Последнее слагаемое, согласно уравнению неразрывности, равно нулю, а следовательно, равенство (3.9) доказано.

В связи с (3.9) ускорение, определяющее отнесенную к единице объема среды силу инерции в системе координат наблюдателя, может быть представлено в дивергентном виде, содержащем только производные:

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} \equiv \rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + v_k \nabla_k \mathbf{v} \right) = \frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla_k (\rho v_k \mathbf{v}). \quad (3.10)$$

1.2. Алгоритм PIMPLE

Алгоритм PISO может игнорировать влияние потока запаздывания, потому что поле скоростей двух соседних временных шагов не сильно меняется, что требует использования меньшего временного шага для моделирования переходных процессов. При моделировании с большими временными шагами использование алгоритма PISO часто приводит к коллапсу моделирования. Чтобы решить эту проблему, OpenFOAM разработал алгоритм PIMPLE, который представляет собой гибрид алгоритма PISO и SIMPLE алгоритма.

Алгоритм PIMPLE очень похож на переходную версию SIMPLE алгоритма. Проще говоря, PIMPLE добавляет внешний цикл, аналогичный SIMPLE алгоритму, к внешнему слою на основе алгоритма PISO для восстановления уравнения импульса. Каждый раз, когда обновляется уравнение импульса, первоначально запаздывающий поток будет обновляться, поэтому алгоритм PIMPLE может лучше обрабатывать переходные вычисления с большими временными шагами. Структурная схема алгоритма выглядит следующим образом:

2. Практическая часть

2.1. Постановка задачи

Поставлена задача смоделировать воздухоочиститель, состоящий из трех основных частей: корпус воздухоочистителя, воздухоотвод, патрубок. Геометрия показана на рисунке 1. Первоначально динамика газа будет предполагаться несжимаемым и будет решаться на однородной сетке с использованием MPPICFoam решателя для ламинарного, изотермического, несжимаемого течения.

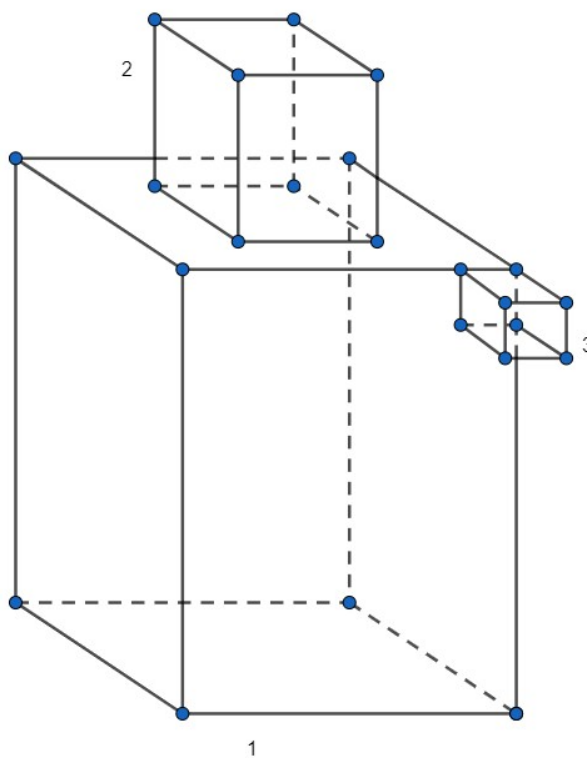


Рис. 2. Геометрия аналитической модели воздухоочистителя циклонного типа.

2.2. Генерация сетки

2.2.1 Генерация сетки в OpenSCAD

Стоить модель будем в программе OpenSCAD. Она представляет собой 3D-редактор параметрических моделей. Программа занимает крайне мало места на жестком диске, при этом обладает обширным функционалом, позволяющим создавать сложные и многогранные модели.

Начнем описание нашей модели с 2 цилиндров и 1 параллелепипед, как показано на рисунке 2.

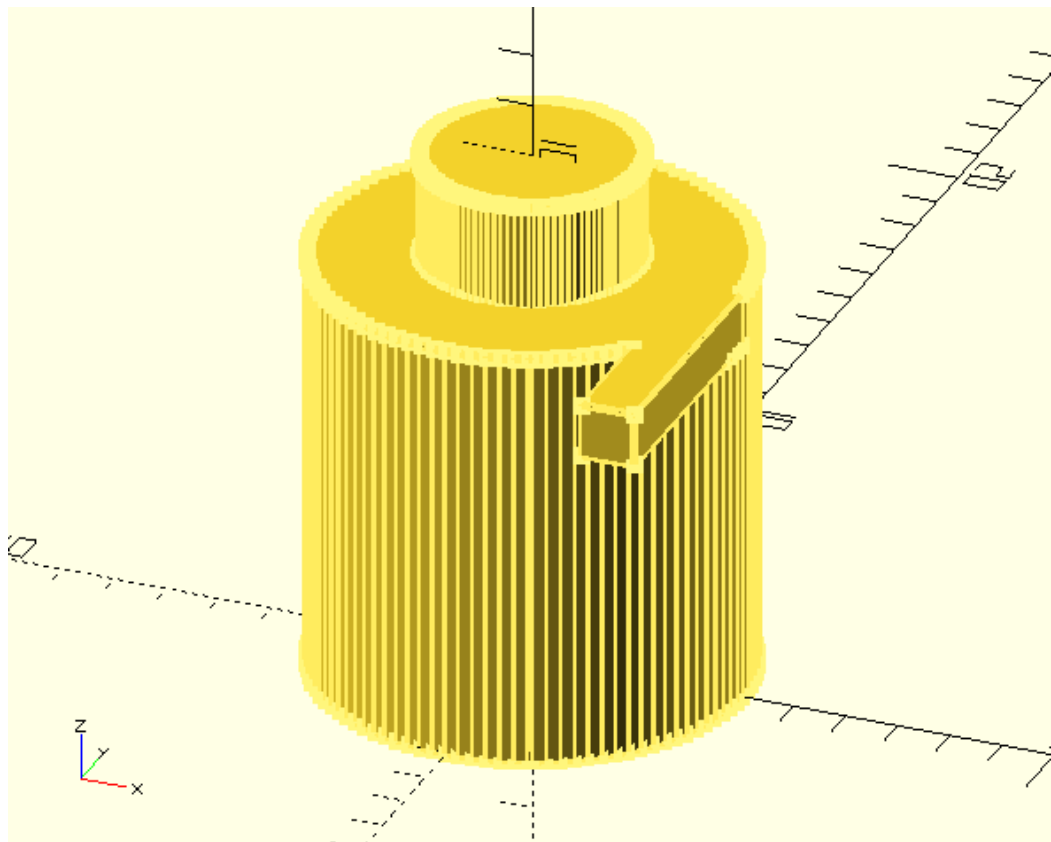


Рис. 3. Геометрия воздухоочистителя циклонного типа в программе OpenSCAD

Верхний цилиндр представляет собой воздухоотвод, через который несжимаемый поток выходит. Нижний цилиндр – корпус. Желтый параллелепипед – партубок, через который поток поступает в модель. Геометрия модели подобрана таким образом, чтобы она совпадала с моделью, построенной в blockMesh. После рендеринга модели сохраняем ее в кодировке ASCII в файл формата STL.

2.2.2 Выделение областей в программе Autodesk MeshMixer

После того как мы сохранили модель в формате STL необходимо выделить 3 главные области, с которыми в последствии мы будем работать: inlet – грань, через которую в модель будет поступать несжимаемый поток, outlet – грань, через которую из модели будет выходить поток и wall – стены модели. Выделим области с помощью программы Autodesk MeshMixer. Это — профессиональное программное обеспечение, основная функциональность которой сосредоточена на дополнительной настройке уже имеющейся 3D-модели. Реализация показана на рисунке 3. После того как области выделены, сохраняем их в формате STL.

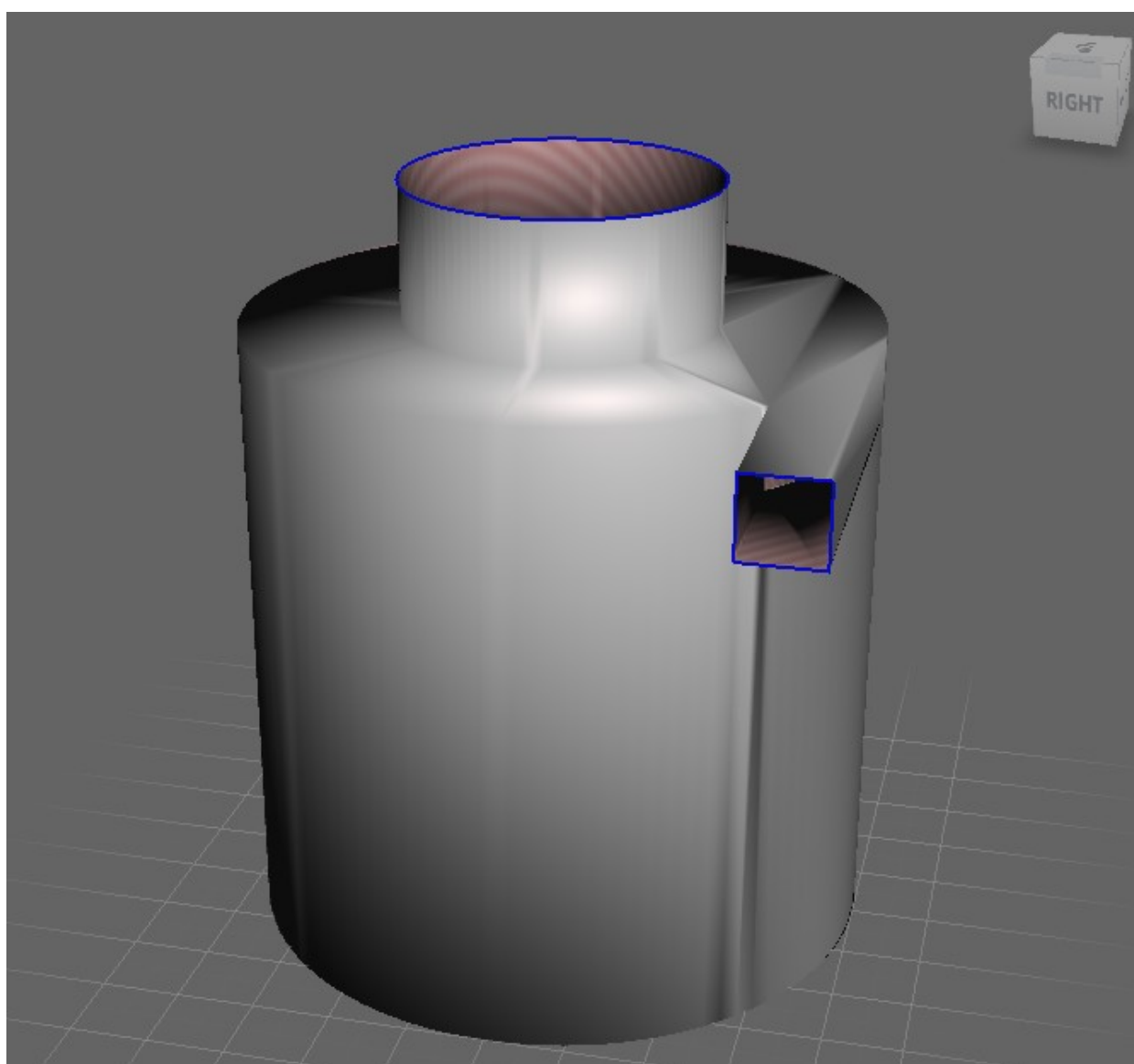


Рис. 4. Выделение областей в программе Autodesk MeshMixer

2.2.3 SnappyHexMesh

SnappyHexMesh - это полностью параллельный генератор сетки с разделением, который гарантирует минимальное качество сетки. Управляемый с помощью словарей OpenFOAM, он особенно хорошо подходит для пакетной работы.

Ключевые функции:

- 1) Начинается с любой чистой шестигранной сетки (структурированной или неструктурированной).
- 2) Считывает геометрию в триангулированных форматах, например, в stl, obj, vtk.
- 3) Нет ограничений на количество входных поверхностей.
- 4) Может использовать простую аналитически определенную геометрию, например, прямоугольник, сферу, конус.
- 5) Генерирует призматические слои.
- 6) Хорошо масштабируется при параллельном соединении.

Конфигурация:

Элементы управления сеткой устанавливаются в snappyHexMeshDict, расположенном в системном каталоге case. Он состоит из пяти основных разделов, описанных следующим образом:

- geometry: спецификация входных поверхностей
- castellatedMeshControls: начиная с любой чистой шестигранной сетки, уточняйте и, при необходимости, балансируйте нагрузку при параллельной работе. Уточнение задается как в соответствии с поверхностями, объемами, так и с зазорами

- snap Controls: гарантированное качество сетки при преобразовании в геометрические поверхности и элементы
- addLayersControls: призматические слои вставляются путем сжатия существующей сетки и создания заполнения с учетом тех же ограничений качества сетки
- meshQualityControls: настройки качества сетки, применяемые на этапах привязки и добавления слоя

Следующим шагом будет добавление файлов, в которых выделены три области: inlet, outlet, wall в каталог OpenFoam, в котором будем реализовывать модель.

После этого пропишем условия для модели в SnappyHexMeshDict. В geometry добавим поля Wall.stl (type triSurfaceMesh), Inlet.stl (type triSurfaceMesh), Outlet.stl (type triSurfaceMesh). Стандартный тип “triSurfaceMesh” считывает копию каждой поверхности на каждый процессор при параллельной работе.

Первая стадия - уточнение базовой сетки. Обработка поверхности - характерные линии, близость и кривизна. Уточнение объема - замкнутые поверхности, геометрические формы. Рисунок 5. Здесь уточняется начальная блочная сетка на основе настроек уточнения поверхности и объема во вложенном словаре castellatedMeshControls

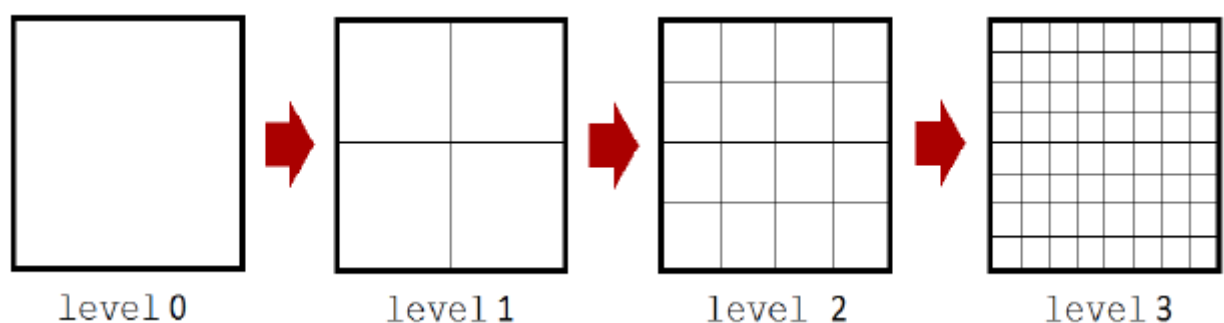


Рис. 5. Пример уточнения начальной блочной сетки

Вторая стадия называется привязкой, когда грани патчей проецируются вниз на геометрию поверхности. Этот этап управляется настройками во вложенном

словаре snap Controls. Укажем количество итераций предварительного сглаживания точек патча перед выполнением проекции на поверхность, количество итераций внутреннего сглаживания, примененных к привязанному полю смещения и коэффициент масштабирования максимальной длины кромки для притяжения к поверхности. Указав параметры, проверим сетку модели, запустив snappyHexMesh. Реализация показана на рисунке 6 и рисунке 7.

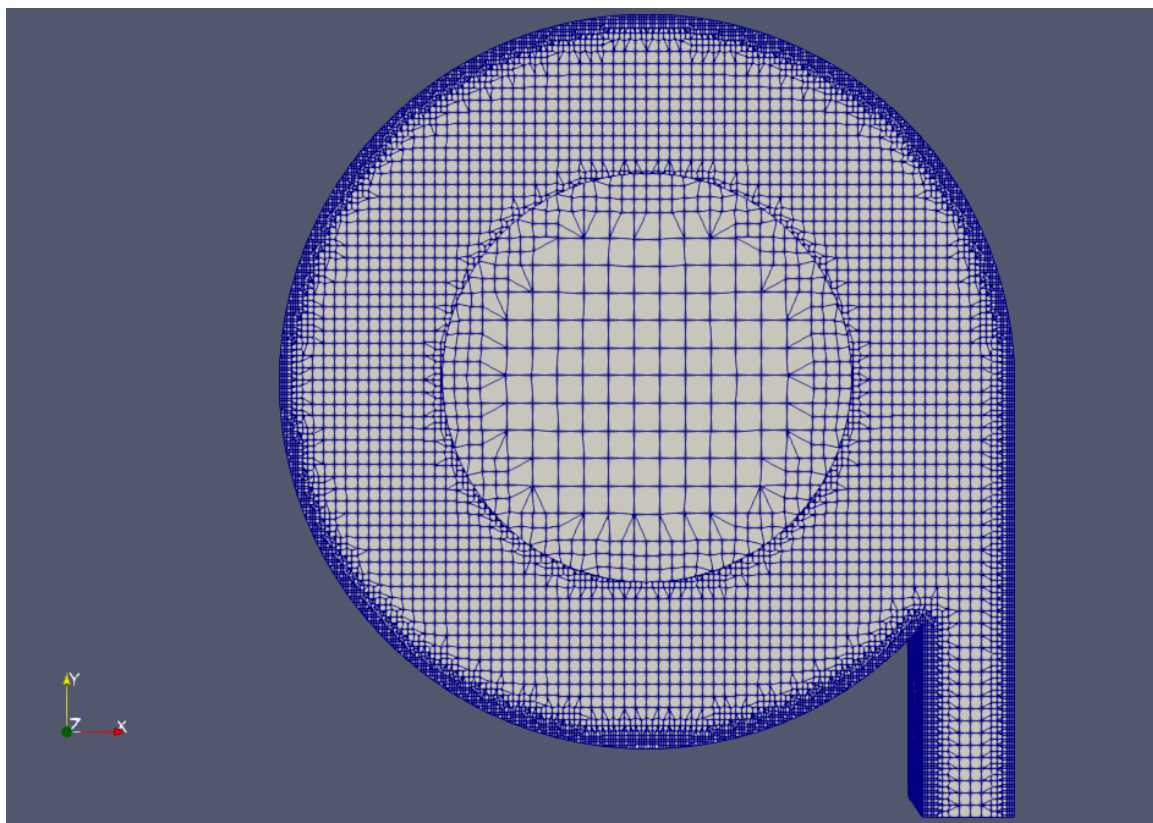


Рис. 6. Генерация сетки вид “сверху”

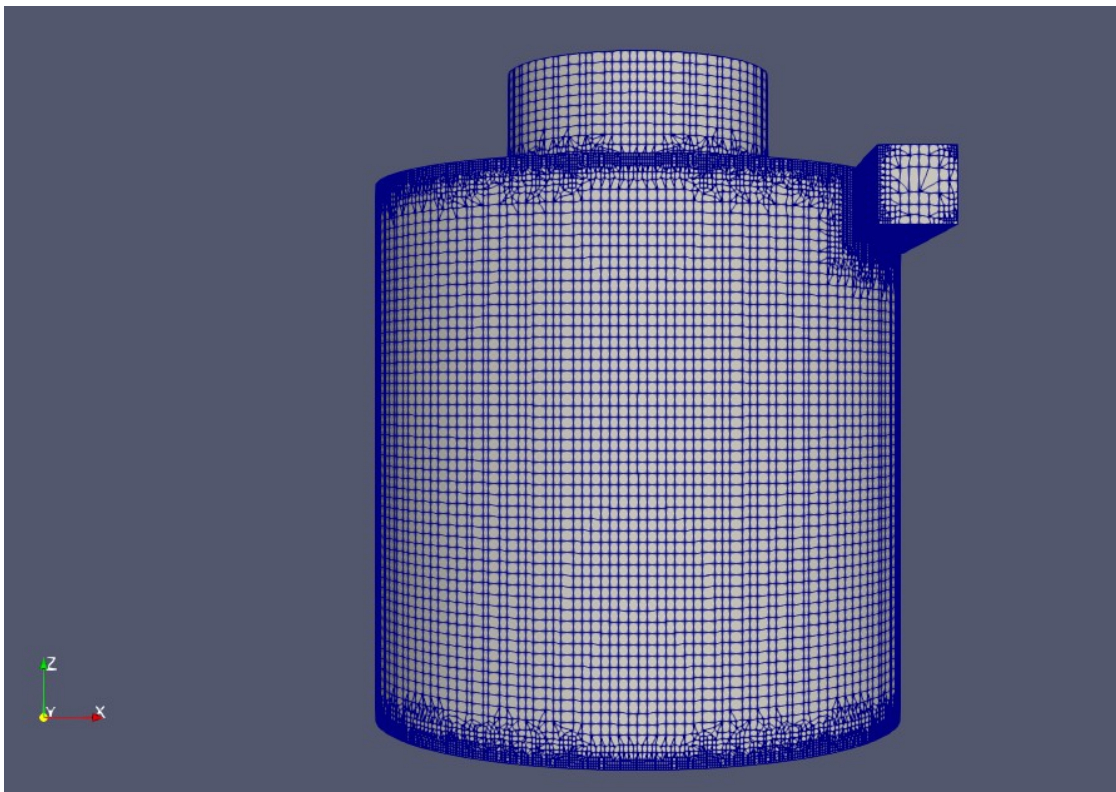


Рис. 7. Генерация сетки вид “спереди”

2.2.3.1 Добавление пограничного слоя

Заключительный этап создания сетки - добавление слоя, когда слой ячеек добавляется к указанному набору граничных участков, как показано на рисунке 8. Этот этап управляется настройками во вложенном словаре `addLayersControls`

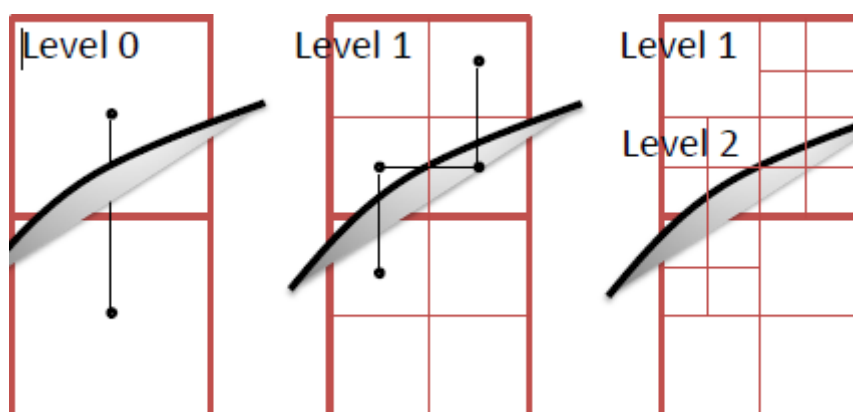


Рис. 8. Усовершенствования поверхностной сетки

Укажем дополнительные усовершенствования функций: локальная кривизна и уточнение угла наклона объекта, как показано на рисунке 9.

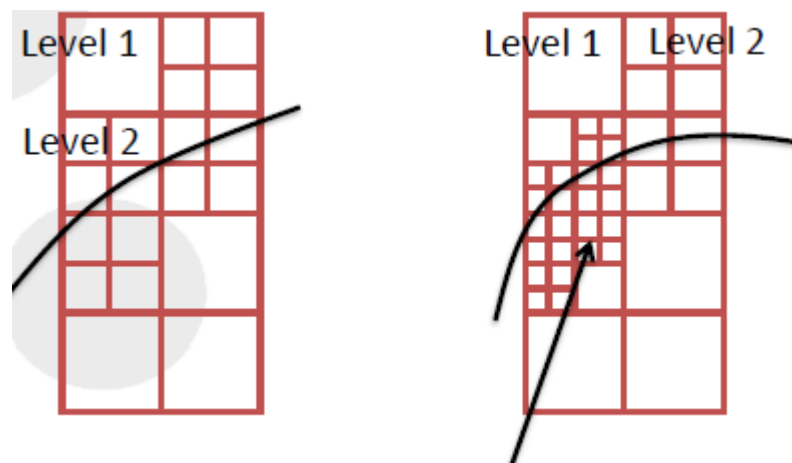


Рис. 9. Уточнение локальной кривизны

Указав параметры, проверим сетку модели, запустив snappyHexMesh. Реализация показана на рисунке 10 и рисунке 11.

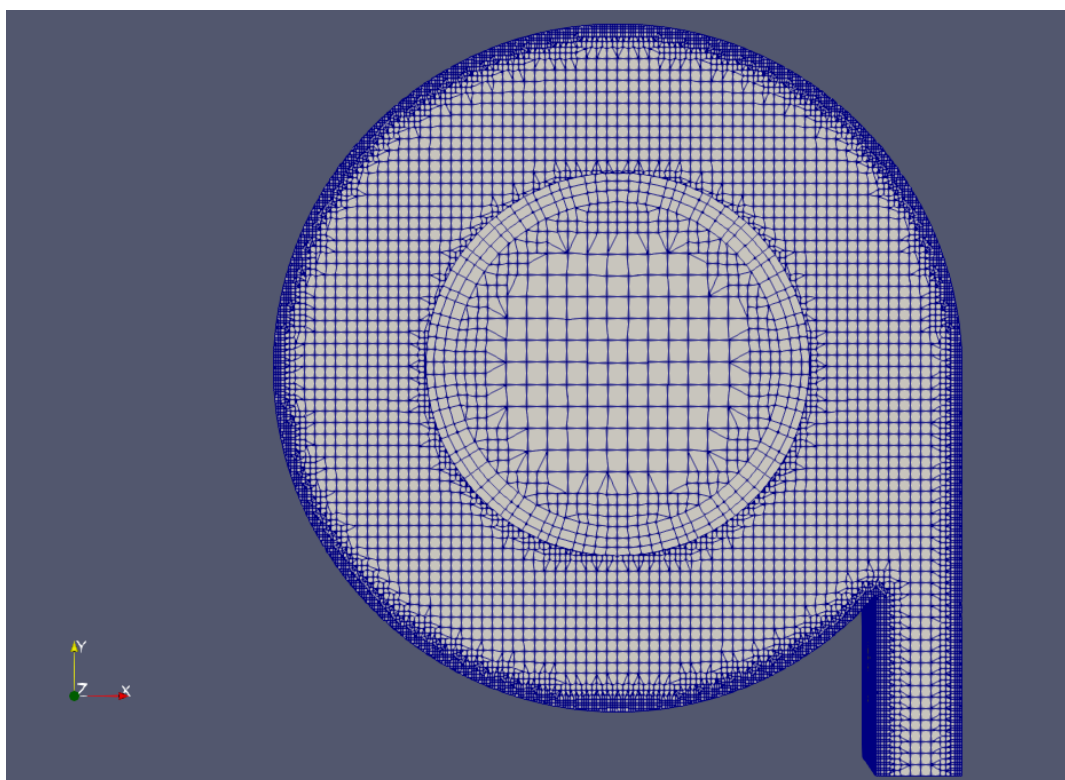


Рис. 10. Генерация сетки вид “сверху”

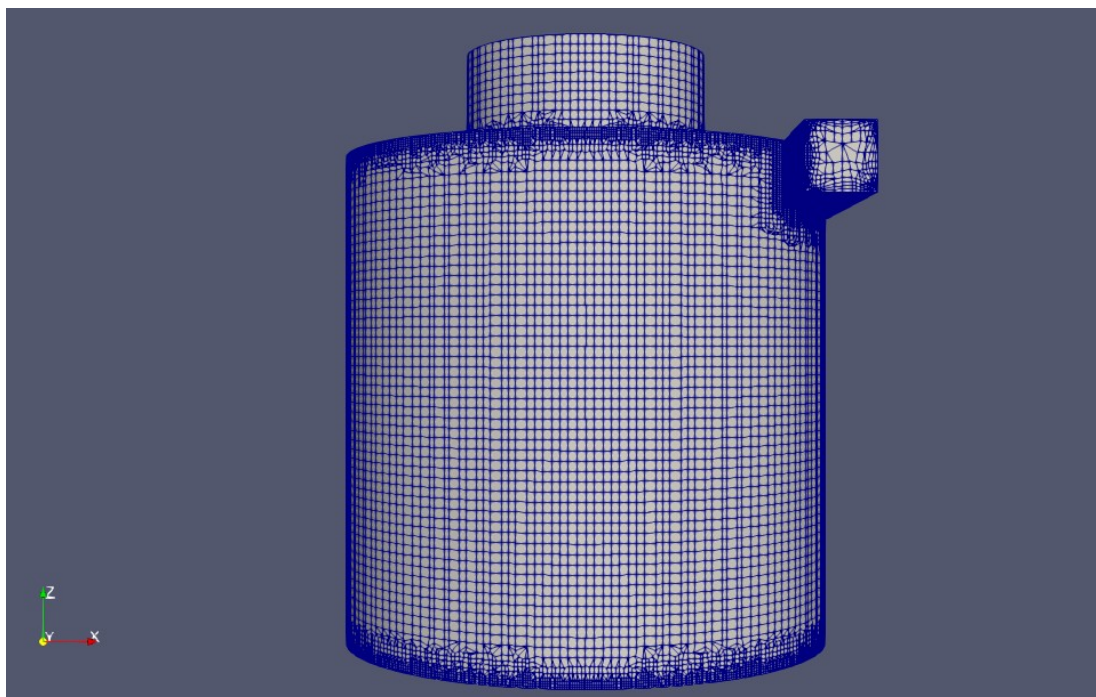


Рис. 11. Генерация сетки вид “спереди”

2.3. Граничные и начальные условия

После завершения генерации сетки, перейдем к указанию граничных и начальных условий для данного случая. Дело настроено так, что отсчет времени исполнения программы начинается с $t = 0$ секунд, поэтому исходные полевые данные хранятся в 0 подкаталоге. Этот подкаталог содержит 2 файла, p и U , по одному на каждое давление (p) и скорость (U) поля, начальные значения и граничные условия которых должны быть заданы.

В файлах полевых данных есть 2 основные записи:

Размеры:	Указывает размеры поля.
Внутреннее поле:	Данные внутреннего поля, которые могут быть однородными, описываемый одним значением; или неоднородный, где должны быть указаны все значения поля.
Граничное поле:	Данные граничного поля, включающие граничные условия и данные для всех граничных участков.

В файле давления (p) укажем величину давления на входе и выходе равным нулю. В файле скорости (U) укажем величину скорости равной 20 м/с на входе и 0 м/с на выходе.

2.4. Запуск приложения

Как и любой исполняемый файл UNIX/Linux, приложения OpenFOAM могут запускаться двумя способами: как процесс переднего плана, то есть тот, в котором оболочка ждет завершения команды, прежде чем дать командную строку; как фоновый процесс, который не должен быть завершен до того, как оболочка примет дополнительные команды.

По этому случаю мы будем запускать MPPICFoam на переднем плане. Решатель MPPICFoam выполняется либо путем ввода каталога case и ввода текста: “ MPPICFoam ”.

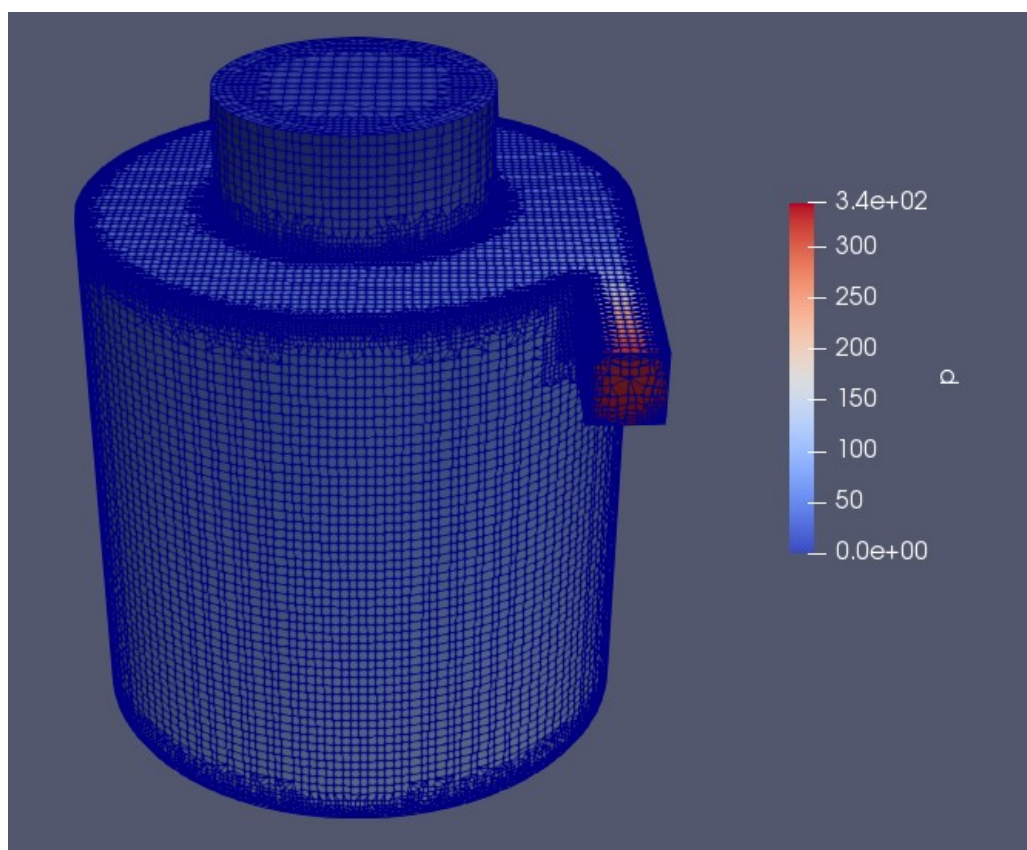


Рис. 12. Демонстрация распределения давления по корпусу воздухоочистителя.

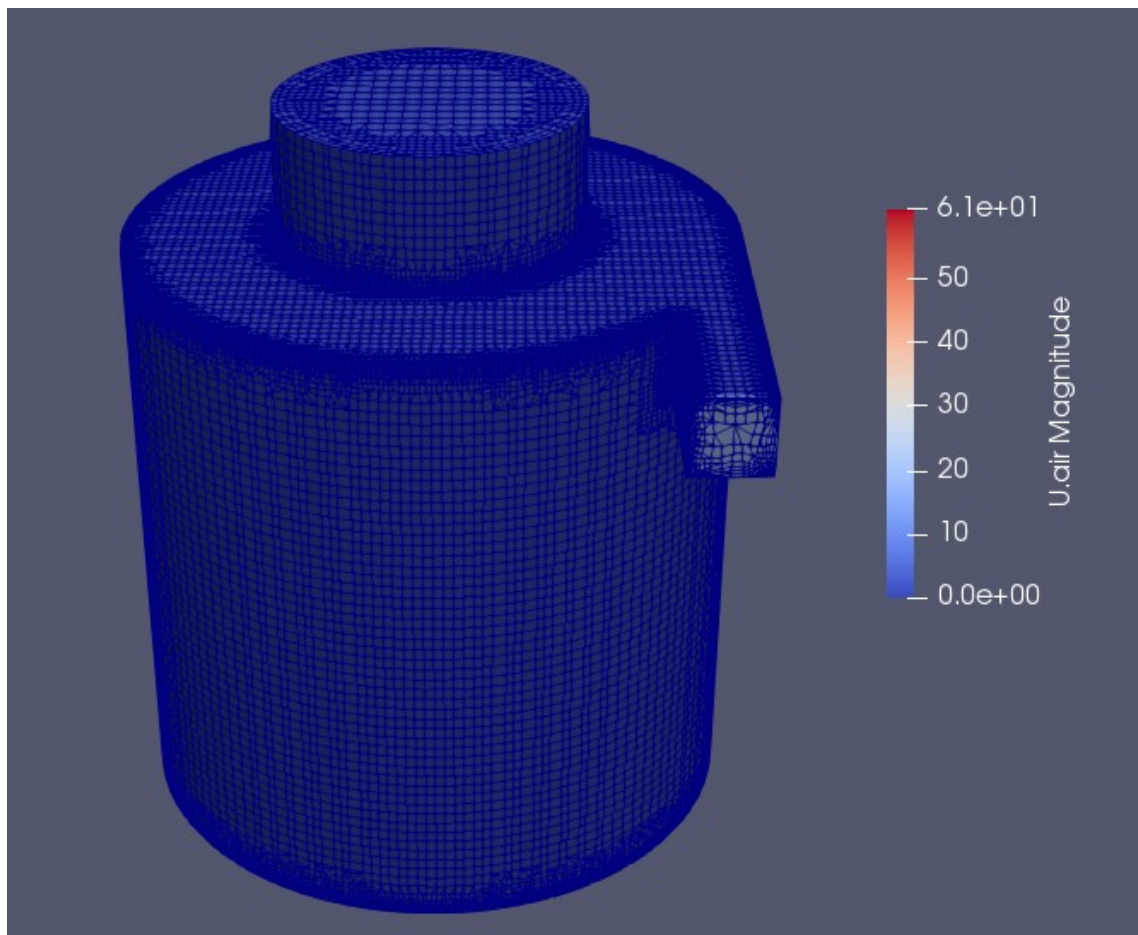


Рис. 13. Демонстрация распределения скорости по корпусу воздухоочистителя.

2.5. Изменения в модели BlockMesh

Для достоверности сравнения моделей, немного изменим BlockMesh модель, чтобы сетки совпадали. Добавим дополнительный уровень, отступив 0.3 по оси Y, и укажем новые точки с координатами уровня выше, изменив координату Y.

Аналитическая модель уровня представлена на рисунке 13.

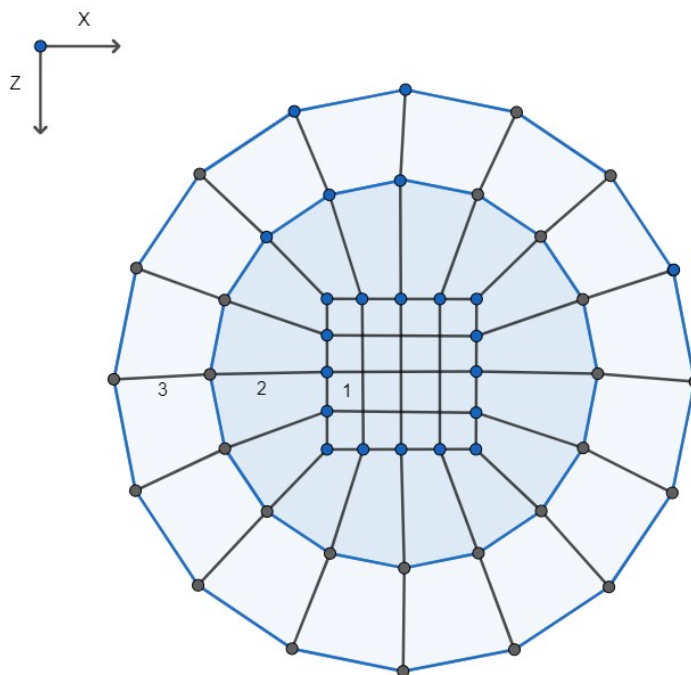


Рис. 14. Дополнительный уровень в модели BlockMesh

Добавив изменения в BlockMesh модель можно рассмотреть как изменился корпус воздухоочистителя. Демонстрация на рисунке 14.

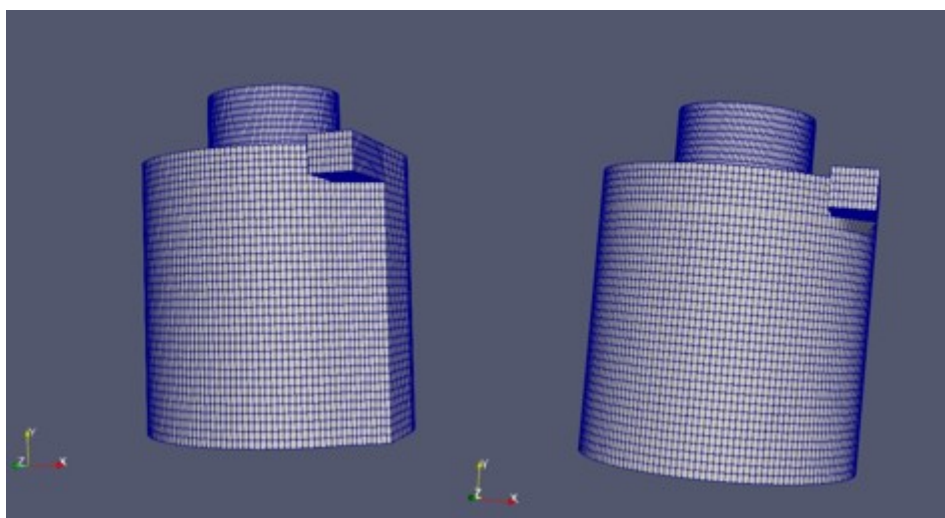


Рис. 15. Демонстрация изменений в модели BlockMesh

Также необходимо добавить пограничный слой. Он необходим для расчета ламинарного течения с большим градиентом физических параметров возле твердой стенки. Реализация показана на рисунке 15.

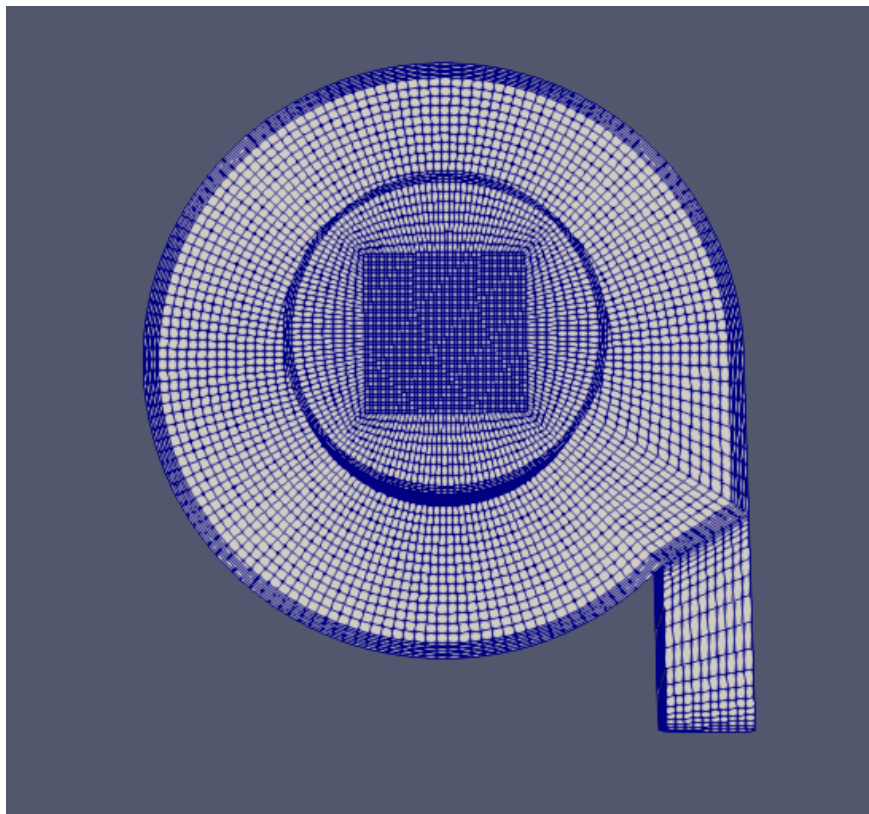


Рис. 16. Реализация пограничного слоя в модели BlockMesh

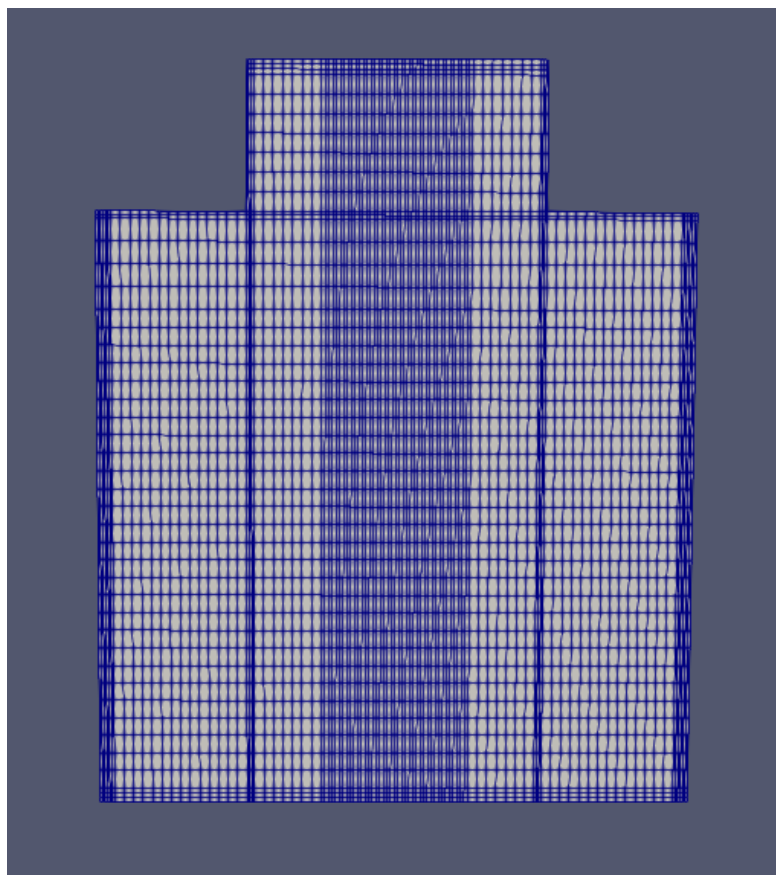


Рис. 17. Реализация пограничного слоя в модели BlockMesh в “разрезе”

2.6. Постобработка

Как только результаты записываются в каталоги времени, их можно просмотреть с помощью paraFoam. На рисунке 16 демонстрируется распределения линий тока по корпусу воздухоочистителя.

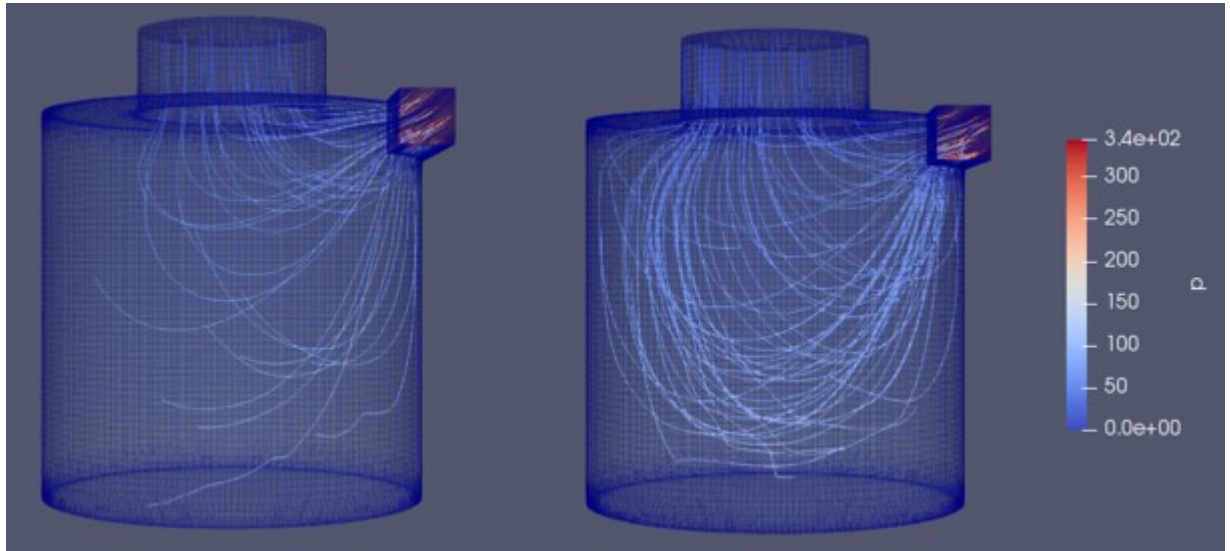


Рис. 16. Распределение линий тока по корпусу воздухоочистителя

Заметим, что образуются вихревое течение, преимущественно в нижней части корпуса. Линии тока демонстрируют динамику газа и его распределение по корпусу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В производственной работе была изучена основа работы в OpenFOAM. Были изучены уравнения сохранения масс и импульса. В результате чего, удалось разобраться в алгоритме PIMPLE и применить его на практике.

Так же была освоена утилита SnappyHexMesh, с помощью которых была сгенерирована модель динамики газа в воздухоочистителе циклонного типа. Сравнили применимости сеток, построенных в утилитах BlockMesh и SnappyHexMesh, и скорость вычисления моделей.

Приведенные данные дают представление о динамике газа и создаваемом им завихрений в корпусе воздухоочистителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. OpenFOAM and STAR-CD. Integration, Interoperability and Symbiosis, Dr. Mark Olessen, EMCON Technologies// DANSIS-2007: New Trends In CFD, October 2007.
2. Интернет-ресурс <http://www.openfoam.com/about/>.
3. Интернет-ресурс <https://www.openfoam.com/documentation/tutorial-guide/2-incompressible-flow/2.1-lid-driven-cavity-flow>.
4. Васильев В.А., Ницкий А.Ю. Практика решений задач вычислительной гидродинамики тонких турбулентных слоев в щелевых уплотнениях питательных насосов на суперкомпьютерах и в распределенных вычислительных средах // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2009): Труды международной научной конференции (Нижний Новгород, 30 марта - 3 апреля 2009 г.). Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009. -С. 72-81
5. Patankar. S.V.,Spolding D.B. Int. J. Heat Mass Transfer, 15, 1972, p. 1787-1806
6. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости // Москва: Энергоатомиздат, 150 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)
Листинг программы

SnappyHexMeshDict:

FoamFile

```
{
    version    2.0;

    format     ascii;

    class      dictionary;

    object     snappyHexMeshDict;
}

// * * * * *

castellatedMesh true;

snap          true;

addLayers     true;

geometry
{
    Wall.stl
    {
        type triSurfaceMesh;

        name walls;

        //file "Wall.stl";
    }

    Inlet.stl
    {
        type triSurfaceMesh;

        name patch;
    }
}
```

```

}
Outlet.stl
{
    type triSurfaceMesh;
    name patch;
}
};
castellatedMeshControls
{
    maxLocalCells 100000;
    maxGlobalCells 2000000;
    minRefinementCells 0;
    maxLoadUnbalance 0.10;
    nCellsBetweenLevels 2;
    features (
        /* file "Wall.eMesh";
           level 3;
           */);
refinementSurfaces
{
    walls
    {
        level (1 3);//1-3 2-3
        patchInfo
        {
            type wall;
        }
    }
}

```

```

    }
    resolveFeatureAngle 30;
    refinementRegions
    {
    }
    locationInMesh (0.001 0.001 0.001);
    allowFreeStandingZoneFaces true;
}

snapControls
{
    nSmoothPatch 3;
    tolerance 2.0;
    nSolveIter 300;
    nRelaxIter 5;
    nFeatureSnapIter 10;
    implicitFeatureSnap true;
    explicitFeatureSnap false;
    multiRegionFeatureSnap false;
}


addLayersControls
{
    relativeSizes true;
    layers
    {
        //"Wall.*"

```

```

    walls
    {
        nSurfaceLayers 3;
    }

}

expansionRatio 1.2;//1.0
finalLayerThickness 1;//0.5
//firstLayerThickness 0.025;
    minThickness 1e-5;//0.2//0.1
nGrow 0;//0
featureAngle 130;//60
slipFeatureAngle 30;
nRelaxIter 5;//5
nSmoothSurfaceNormals 1;
nSmoothNormals 3;
nSmoothThickness 10;
maxFaceThicknessRatio 0.5;//0.5
maxThicknessToMedialRatio 0.3;//0.3
minMedialAxisAngle 90;//90


nBufferCellsNoExtrude 0;
nLayerIter 50;
}

meshQualityControls
{
    #includeEtc "caseDicts/meshQualityDict"

```

```
nSmoothScale 4;
errorReduction 0.75;
}
writeFlags
(
    layerSets
);
mergeTolerance 1e-6;

// ***** //
```

ПЛАН-ГРАФИК

выполнения курсовой работы

обучающегося Шамаева И.Р.

Наименование этапа работ	Трудоемкость выполнения, час.	Процент к общей трудоемкости и выполнения	Срок предъявления консультанту
Получение и согласование задания	0,3	0,8	29 неделя
Знакомство с литературой по теме курсовой работы	2,7	7,5	30 неделя
Генерация сетки в OpenSCAD и выделение областей в Autodesk MeshMixer.	10	24,2	34 неделя
Изучение теоретического материала утилиты SnappyHexMesh.	10	30	36 неделя
Генерация сетки в SnappyHexMesh и добавление пограничного слоя в модель.	5	15,4	37 неделя
Добавление изменений в модель BlockMesh. Сравнение и анализ полученных данных.	5	13,8	37 неделя
Составление и оформление пояснительной записки и подготовка к защите	2,7	7,5	38 неделя
Защита	0,3	0,8	39 неделя
Итого	36	100	-