ISSN: 2658–5782

Номер 2

2025

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org

ИМех
им. Р.Р. Мавлютова

ISSN 2658–5782 **20** (2025) 2: 89–97

Многофазные системы

http://mfs.uimech.org/mfs2025.2.013
DOI 10.21662/mfs2025.2.013
УДК / UDC 532.5;519.63

Получена / Received 4.06.2025
Принята / Accepted 27.06.2025

Подходы к построению сеток для моделирования динамики флюида при Т-образном соединении труб в среде OpenFOAM

И.А. Абдулов✉**, О.В. Яковлев**

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

E-mail: ily4s.abdulov@yandex.ru

В нефтехимической промышленности для переработки тяжелых нефтепродуктов в более легкое топливо используется каталитический крекинг. Данный процесс осуществляется в реакторах каталитического крекинга и на его результат большое влияние оказывает распределение реагентов внутри установки, а также ряд гидродинамических параметров, таких как давление и температура. Поэтому для моделирования подобных процессов используют методы вычислительной гидродинамики. В работе проведен сравнительный анализ различных подходов к построению конечно-разностных сеток для моделирования течения жидкости в Т-образном соединении цилиндрических труб с использованием пакета OpenFOAM. Рассмотрены как структурированные сетки, создаваемые с помощью blockMesh, так и неструктурированные гексаэдрические сетки, формируемые инструментом snappyHexMesh. Проведенная по основным параметрам оценка качества (неортогональность, скошенность, объем ячеек) показала, что структурированная сетка, построенная по усовершенствованной схеме соединения блоков, обеспечивает лучшие показатели ортогональности и скошенности по сравнению с неструктурированной сеткой, что положительно сказывается на точности и устойчивости численного моделирования. Результаты численного моделирования с использованием различных моделей турбулентности (k-ε, k-ω, LES) подтвердили, что выбор и качество сетки оказывают существенное влияние на распределение устойчивости расчета при моделировании. Показано, что структурированная сетка, построенная с помощью blockMesh, имеет более хорошие показатели сходимости и времени счета для рассмотренной пробной задачи по сравнению с неструктурированной сеткой, построенной с помощью snappyHexMesh. Полученные результаты могут быть использованы для выбора оптимального подхода к построению расчетных сеток при моделировании течения в инженерных задачах с использованием OpenFOAM.

Ключевые слова: динамика жидкости, турбулентность, Т-образное соединение, вычислительная гидродинамика, 3D-сетка, OpenFOAM

Mesh generation approaches for fluid dynamics simulation in a T-junction pipe using OpenFOAM

I.A. Abdulov✉**, O.V. Yakovlev**

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

E-mail: ily4s.abdulov@yandex.ru

In the petrochemical industry, catalytic cracking is used to process heavy petroleum products into lighter fuels. This process is carried out in catalytic cracking reactors and the result of the process is greatly influenced by the distribution of reagents within the unit, as well as a number of hydrodynamic parameters such as pressure and temperature. Therefore, computational fluid dynamics methods are used to model such processes. The paper presents a comparative analysis of various approaches to constructing finite-difference meshes for modeling fluid flow in a T-shaped joint of cylindrical pipes using the OpenFOAM package. Both structured meshes created using blockMesh and unstructured hexahedral meshes generated by the snappyHexMesh tool are considered. The conducted assessment of the main quality parameters (non-orthogonality, skewness, cell volume) showed that the structured grid constructed using the improved block connection scheme provides better orthogonality and skewness indicators compared to the unstructured grid, which has a positive effect on the accuracy and stability of numerical modeling. The results of numerical simulation using different turbulence models (k-ε, k-ω, LES) confirmed that the choice and quality of the grid have a significant impact on the distribution of stability of the calculation during simulation. It is shown that the structured grid constructed using blockMesh has better convergence and calculation time for the considered trial problem compared to the unstructured grid constructed using snappyHexMesh. The obtained results can be used to select the optimal approach to constructing computational grids when simulating flows in engineering problems using OpenFOAM.

Keywords: fluid dynamics, turbulence, T-junction, computational fluid dynamics, 3D mesh, OpenFOAM

1. Введение

В нефтехимической промышленности для переработки тяжелых нефтепродуктов в более легкое топливо используется каталитический крекинг. Данный процесс осуществляется в реакторах каталитического крекинга. На результат этого процесса большое влияние оказывает распределение реагентов внутри установки, а также ряд гидродинамических параметров, таких как давление и температура. Поэтому для моделирования этих процессов используют методы вычислительной гидродинамики.

Моделированию каталитических реакторов посвящено достаточно много статей, где рассматривались гидродинамические потоки внутри каталитического реактора.

Работы Chang [1] и Theologos [2] посвящены моделированию сложных многофазных течений в реакторах каталитического крекинга. В этих работах подчеркивается важность учета взаимодействия фаз (газ, жидкость, твердые частицы) и химических реакций. В работе Theologos была построена математическая модель для трехмерных двухфазных потоков в нижней части каталитического реактора. Впоследствии, в работе Chang была разработана и верифицирована трехмерная трехфазная модель ICRKFLO, описывающая потоки в реакторе каталитического крекинга. В статье Novia [3] рассматривается гидродинамика и кинетика реакций в реакторах FCC с использованием модели Эйлера–Эйлера и коммерческого CFD-пакета FLUENT. Авторы отмечали сложность моделирования зоны входа реактора, где требуется высокая детализация сетки для учета турбулентности и смешения. В статье [4] рассмотрена двумерная модель нижней части лифт-ректора без подачи гранулированной среды через боковой ввод.

Моделирование гидродинамических потоков требует создания качественной расчетной сетки, особенно при наличии сложной геометрии, такой как соединения цилиндрических труб.

Статья Аксенова и др. [5] была посвящена численному моделированию турбулентных потоков воды разной температуры в Т-образном соединении труб. Для расчета применялась неструктурированная расчетная сетка с адаптацией (с дополнительным разбиением сетки в областях с большими градиентами скорости потока). Однако в этой статье не были затронуты методы построения структурированных сеток для подобной геометрии расчетной области.

В рамках использования пакета OpenFOAM [6] — популярного инструмента с открытым исходным кодом для численного моделирования задач гидро- и аэродинамики — существует несколько способов построения гексаэдрической (шестигранной) расчетной сетки. Для этого в пакете применяются программы blockMesh и snappyHexMesh, каждая из которых использует различные методы построения конечной разностной сетки. Кроме того, сторонние программные решения (Ansys [7], Salome [8], FlowVision [9]) могут быть использованы для генерации сеток с последующим экспортом в формат OpenFOAM.

В настоящей статье рассматривается построение структурированной и неструктурированной разностных сеток для Т-образного соединения цилиндрических труб при помощи инструментов пакета OpenFOAM. Анализируются различные подходы к построению разностных сеток посредством сравнения показателей качества разбиения и времени счета. Для оценки качества построенных разностных сеток используется математическая модель протекания жидкости внутри соединения труб.

2. Математическая модель

Ламинарный поток несжимаемой жидкости в полости реактора описывается при помощи уравнений гидродинамики. Динамика жидкости задается системой уравнений [10], состоящей из уравнения неразрывности

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0,$$

уравнения сохранения импульса

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\rho u_i u_j + p\delta_{ij} - \tau_{ji}\right] = 0, \quad i = 1,2,3,$$

и сохранения энергии

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e_0) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\rho u_j e_0 + u_j p - u_i \tau_{ij}\right] = 0.$$

В приведенной системе были использованы следующие обозначения: u — вектор скорости; ρ — плотность; p — давление; τ — компоненты тензора напряжений $\tau_{ij} = -\frac{2\mu}{3}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij} + \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$, где μ — динамическая вязкость; e_0 — полная энергия.

В месте пересечения цилиндров могут возникать потоки жидкости с высоким числом Рейнольдса ($\mathrm{Re} \sim 10^6$). При прямом численном моделировании для разрешения всех вихрей необходимо, чтобы линейный размер ячеек имел тот же порядок, что и Колмогоровский масштаб. В таком случае количество ячеек прямо пропорционально $\mathrm{Re}^{\frac{9}{4}}$, что при такой величине числа Рейнольдса делает численные расчеты практически невозможными [11].

Для того, чтобы учесть эффекты турбулентности при использовании сетки, недостаточной для прямого численного моделирования, но позволяющей разрешить крупные вихревые структуры, необходимо использовать различные модели турбулентности. На практике основными типами моделей турбулентности являются RANS (Reynolds–Averaged Navier–Stokes) и LES (Large Eddy Simulation). Далее рассмотрим модели RANS k-ε и k-ω и модель LES Смагоринского.

Осредненное уравнение Навье–Стокса в моделях RANS для большого числа Рейнольдса можно записать

как

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial t} = \frac{\partial(\bar{u}_i\bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i}(2\nu_T\bar{S}_{ij}) + \bar{f}_i.$$

В модели k-ε для вычисления турбулентной вязкости используется следующая система уравнений [12, 13]:

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_k}\left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k}\right] + \frac{C_1\mu_t}{\rho}\frac{\varepsilon}{k}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_k} - \\ -C_2\frac{\varepsilon^2}{k} = 0,$$

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_k}\left[\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_k}\right] + \frac{\mu_t}{\rho}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_k} - \varepsilon = 0,$$

где k — турбулентная кинетическая энергия; ε — коэффициент рассеяния; ν_T — турбулентная вязкость; σ_k и σ_t — числа Прандтля; $\bar{S}_{ij}$ — компоненты тензора напряжений.

Основными уравнениями модели k-ω являются:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P_k - \beta^*\rho\omega k + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \sigma_k\mu_t)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right],$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j\omega)}{\partial x_j} = \alpha\frac{\omega}{k}P_k - \beta\rho\omega^2 + \\ + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \sigma_\omega\mu_t)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] + D_\omega,$$

где $P_k = \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$.

В моделях типа LES вместо осреднения по Рейнольдсу используется фильтрация турбулентных неоднородностей. Уравнение Навье–Стокса в таком случае будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \overline{u}_j\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \nu\frac{\partial^2 \overline{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}.$$

В модели Смагоринского используются следующие уравнения для вихревой вязкости и тензора напряжений:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3}\tau_{kk}\delta_{ij} = -2\nu_t\overline{S}_{ij},$$

$$\nu_t = (C_s\Delta)^2\sqrt{2\overline{S}_{ij}}.$$

3. Построение конечно-разностной модели расчетной области

При моделировании динамики жидкости эффективность численного решения (устойчивость и скорость расчета) иногда существенно зависит от разностной сетки. Существуют различные виды расчетных сеток: структурированные и неструктурированные.

При построении неструктурированной разностной сетки пространство разбивается на нерегулярно расположенные дискретные области. При таком разбиении нельзя аналитически связать номер ячейки сетки и ее положение в пространстве. Это позволяет строить разностные сетки для областей сложной формы, но в то же время замедляет расчет при использовании таких сеток.

В структурированной сетке, напротив, расчетная область разбивается на упорядоченные ячейки. Это позволяет аналитически вычислить положение ячейки по ее номеру. Поэтому структурированная сетка позволяет точнее аппроксимировать производные; использование структурированной сетки приводит к ускорению вычислительного процесса при фиксированном числе узловых точек; структурированная сетка уменьшает необходимый для расчетов объем оперативной памяти компьютера, упрощает процесс пространственной декомпозиции расчетной области при распараллеливании вычислений; ортогональная структурированная сетка снижает вычислительную погрешность [14]. Однако для объектов со сложной геометрией проблематично построить структурированную сетку, поэтому на практике при расчетах часто используют неструктурированные сетки.

Далее рассмотрим различные подходы для построения расчетной сетки для моделирования потока жидкости внутри Т-образного соединения цилиндрических труб.

Качество расчетных сеток можно оценить по набору параметров: неортогональности — углу между прямой, проходящей через центры смежных ячеек, и нормалью к грани, соединяющей эти ячейки; минимальному и максимальному объему ячеек; скошенности — расстоянию от точки пересечения прямой, проходящей через центры смежных ячеек, и соответствующей грани до центра этой грани.

3.1. Построение расчетной сетки при помощи BlockMesh

Для построения структурированной разностной сетки в пакете OpenFOAM используется утилита blockMesh. Программа позволяет описывать расположение и разбиение блоков в структурной сетке. Расчет координат вершин блоков осуществляется с помощью внешней программы, написанной на языке Python. Определение соседних блоков при сборке сетки производится по совпадению вершин соответствующих граней, что следует учитывать при описании структуры сетки.

Рассмотрим два подхода к построению структурной сетки для пересечения цилиндрических труб.

Построение ортогональной структурированной вычислительной сетки с гексаэдрическими ячейками для цилиндрической области не представляет технической проблемы, однако сложность возникает при построении области соединения цилиндрических труб.

Главная идея построения сетки для цилиндра заключается в разбиении окружности сечения на пять гексагональных областей (рис. 1(a)). Соединение цилиндров моделируется при помощи сечения цилиндров плоскостями, проходящими через центр пересечения [15]. Схема расположения блоков для сетки изображена на рис. 1(b). Общий вид полученной сетки изображен на рис. 2.

Однако у такого подхода имеются некоторые недостатки, если рассматривается соединение труб разного диаметра. В таком случае возникает необходимость в

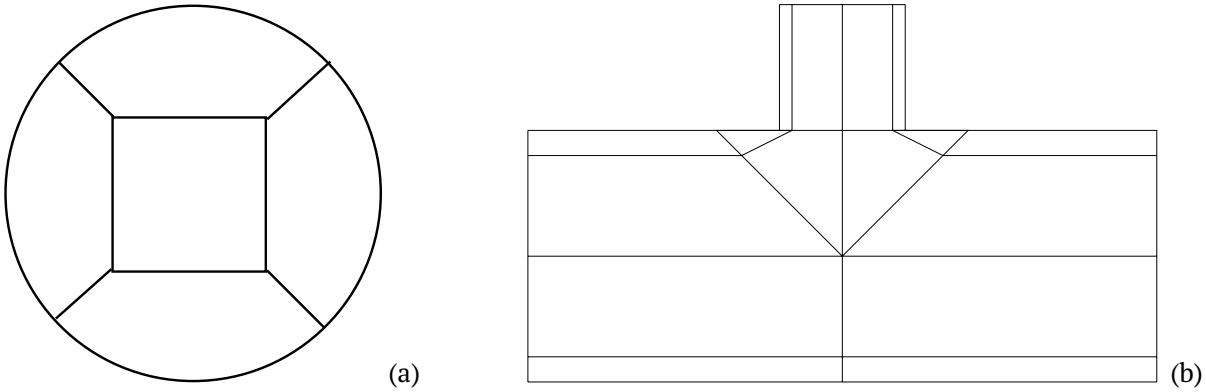


Рис. 1. Схема разбиения пересечения цилиндров на блоки для построения структурированной сетки 1: (a) поперечное сечение цилиндра, разделенное на пять областей, которые образуют основу для построения структурированной сетки внутри цилиндра, (b) продольное сечение пересечения двух цилиндров под прямым углом; грани блоков подогнаны друг к другу, чтобы обеспечить совместимость ячеек сетки в зоне пересечения

добавлении некоторого участка трубы с различными диаметрами, что негативно сказывается на ортогональности полученной сетки. Низкая ортогональность в переходной области между цилиндрами может повлиять на распространение вычислительной ошибки между ячейками.

Идея построения сетки, представленной на рис. 3, заключается в разбиении сетки для трубы большего диаметра так, чтобы было возможно соединение с секцией для трубы меньшего диаметра. Такая конфигурация блоков позволяет избежать чрезмерно большого искривления ячеек сетки в местах пересечения цилиндров. Однако в случае слишком большой разности диаметров большой и малой труб в середине области соединения могут возникать ячейки малого размера, что может снизить точность расчета распространения поля давления. Также слишком мелкое разбиение области будет требовать уменьшения шага по времени для сходимости расчета.

Общий вид со стороны «малого входа» полученной сетки показан на рис. 4, где видна структура разбиения описанных выше блоков на конечно-разностные ячейки.

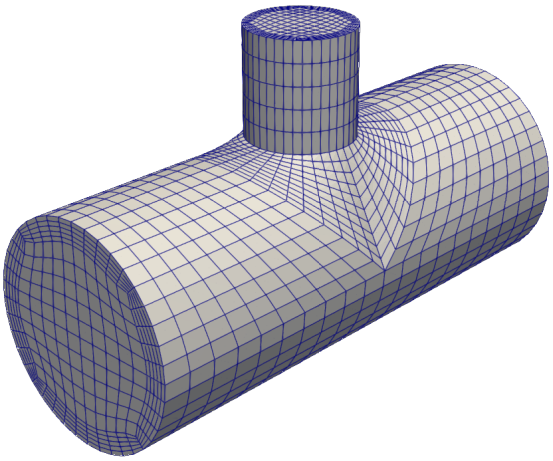


Рис. 2. Внешний вид сетки 1, построенной с использованием утилиты blockMesh

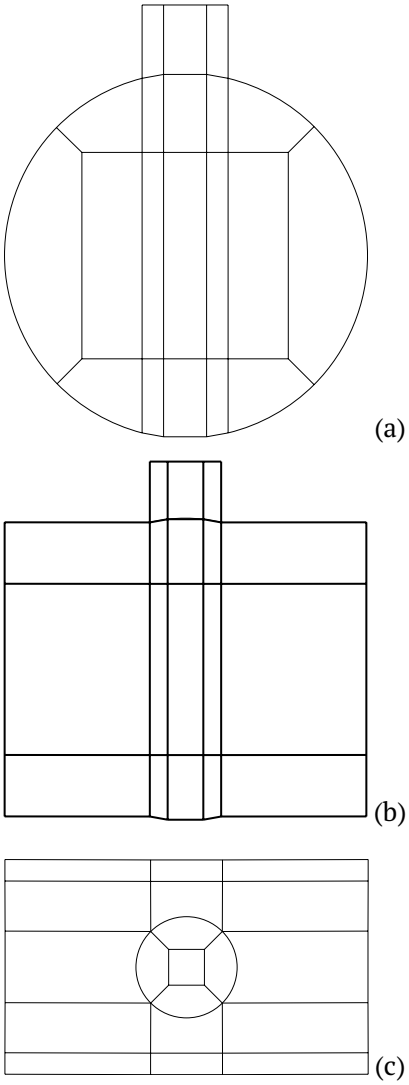
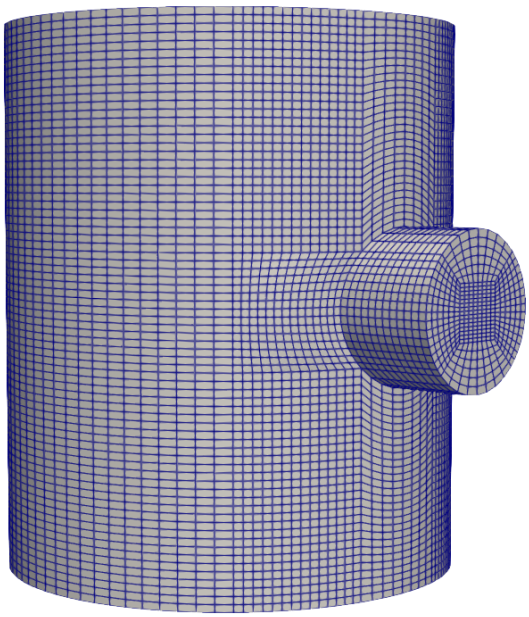
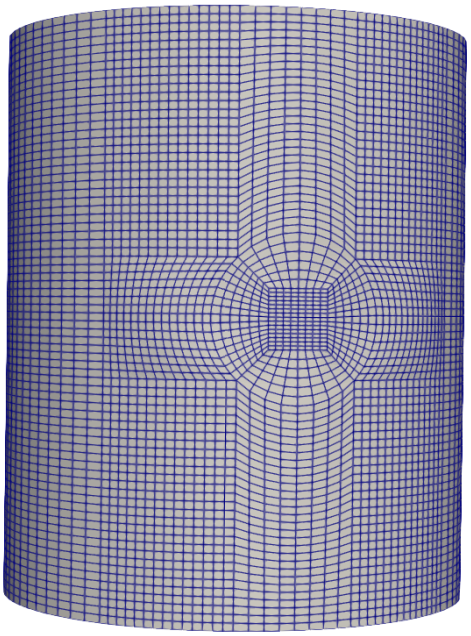


Рис. 3. Схема блоков для соединения большого и малого цилиндров в сетке: (a) сечение в плоскости Oxz, (b) сечение в плоскости Oxy, (c) сечение в плоскости Oyz, видны линии разбиения, формирующие блоки сетки, которые позволяют соединить цилиндр большего диаметра с цилиндром меньшего диаметра



(a)



(b)

Рис. 4. Внешний вид сетки 2, построенной с использованием blockMesh: (a) вид сетки со стороны примыкания малой трубы, (b) вид с обратной стороны

Сравним полученные сетки по приведенным выше параметрам при помощи программы checkMesh. Значения параметров представлены в табл. 1. Показатели неортогональности и скошенности для второй сетки оказались ниже, чем для первой, что позволяет вносить меньшую поправку в решение при моделировании. Далее будет рассматриваться именно вторая сетка, ввиду ее лучших показателей.

3.2. Построение расчетной сетки при помощи SnappyHexMesh

SnappyHexMesh — это инструмент для генерации гексаэдрической неструктурированной сетки, включенный в дистрибутив OpenFOAM. SnappyHexMesh может использовать трехмерную поверхность рельефа и итеративно строить сетку на ней. Некоторые параметры позволяют создавать несколько слоев ячеек у поверхности трехмерной модели. Эта функция позволяет иметь уточненную сетку в области высоких градиентов скорости около поверхности трехмерной модели. Можно выбрать несколько областей для уточнения до желаемого уровня, чтобы OpenFOAM мог решать численные задачи с максимальной эффективностью и точностью, используя сетки, созданные с помощью SnappyHexMesh. Инструмент построения сетки SnappyHexMesh можно запускать параллельно на компьютерном кластере или ПК.

Программа snappyHexMesh начинает строить сетку в гексаэдрически разбитой области, которую можно создать с помощью blockMesh. От начальной гексаэдрической сетки зависит плотность ячеек внутри области моделирования. В нашем случае размер области (20,20,20) и равномерно разбита на (37,37,37).

Процесс построения сетки в snappyHexMesh состоит из 3-х этапов:

1. castellatedMesh — измельчение сетки около поверхности области моделирования. На этом этапе происходит выделение и измельчение ячеек, принадлежащих области моделирования, и удаление ячеек, не принадлежащих ей, в результате чего на границе области моделирования образуется «зубчатая» поверхность. Измельчение определяется минимальным и максимальным уровнями: минимальный уровень применяется в общем к поверхности, а максимальный — к ячейкам, которые образуют пересечения, формирующие угол, превосходящий указанный в resolveFeatureAngle. В нашем случае минимальный уровень — 3, максимальный — 4, а resolveFeatureAngle — 60.

Таблица 1. Параметры качества сеток, построенных blockMesh

Параметр	Сетка 1	Сетка 2
Мин. объем	$1,33077 \cdot 10^{-5}$	0,00121951
Макс. объем	0,00633944	0,0022648
Макс. неортогональность	78,3088	10,9638
Средняя неортогональность	21,5799	5,45203
Максимальная скошенность	1,40888	0,457143

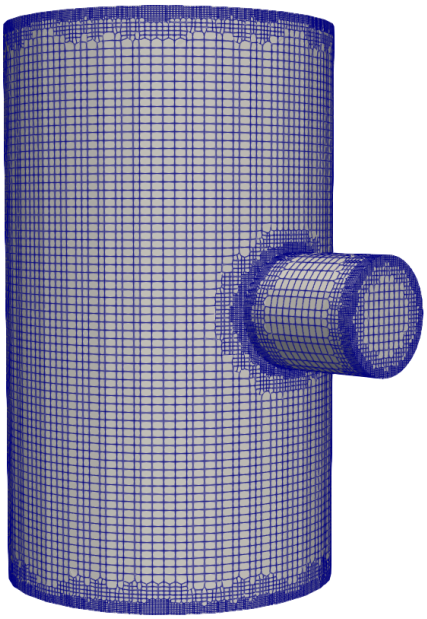


Рис. 5. Внешний вид сетки, построенной snappyHexMesh

2. snap — перемещение вершин около поверхности области моделирования. На этом этапе вершины вблизи поверхности моделирования перемещаются к ней. Для получения равномерного распределения вершин на поверхности моделирования проводятся итерации сглаживания nSolveIter, в нашем случае — 100.

3. addLayers — добавление дополнительных слоев около границы области моделирования. После проведения перемещений около границы области еще могут остаться ячейки с «плохими» параметрами, которые возникают из-за сильных отличий ячеек на границе и внутри границы. Для решения этой проблемы на этом этапе около границы внутри области моделирования добавляются дополнительные слои, имеющие форму границы. Количество слоев определяется параметром nSurfaceLayers, в нашем случае — 2.

На рис. 5 изображена расчетная сетка, полученная для приведенных выше параметров. На рисунке видно измельчение разбиения в угловых областях области моделирования.

4. Вычислительный алгоритм

Для расчета турбулентного потока жидкости была использована программа пакета OpenFOAM, реализующая алгоритм PIMPLE. Алгоритм является гибридом двух методов: PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) и SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) [16] и предназначен для решения уравнений Навье–Стокса в сложных течениях, таких как турбулентные потоки или потоки с переменной вязкостью [14].

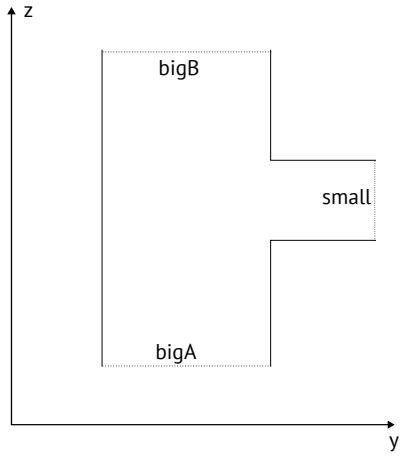


Рис. 6. Названия граничных поверхностей моделируемой расчетной области

5. Результаты

Для оценки числа Куранта и времени счета на рассмотренных сетках было проведено пробное моделирование динамики несжимаемой жидкости при различных моделях турбулентности. На стенках трубы ставится условие прилипания U_walls $= 0$; на входах small и bigA (рис. 6) задана постоянная скорость U_small $=$ U_bigA $= 2$ м/с; на выходе bigB задано условие протекания ∇U_bigB $= 0$. По давлению на входах заданы краевые условия ∇p_small $= 0$ и ∇p_bigA $= 0$, а на выходе — постоянное давление p_bigB $= 0$.

В начальный момент времени заданы условия $U = 0$ и $p = 0$ во всех внутренних точках расчетной области. Для расчета был задан фиксированный шаг по времени $\Delta t = 5 \cdot 10^{-4}$ с.

Расчет на сетке, построенной с помощью snappyHexMesh, с использованием модели турбулентности k-ε оказался неустойчивым. Это может быть связано с большим уровнем разбиения в области поверхности расчетной области, из-за чего получаются ячейки маленьких размеров в области соединения труб. На графиках, представленных на рис. 7, показано изменение среднего и максимального значений числа Куранта в ходе расчета для каждого момента времени.

Для вычислительных экспериментов используются следующие обозначения: Keps — модель турбулентности k-ε; Kom — модель турбулентности k-ω; Les — модель турбулентности Смагоринского; bm — сетка, построенная с помощью blockMesh (рис. 8); sm — сетка, построенная с помощью snappyHexMesh (рис. 9). Можно видеть, что средние значения числа Куранта при расчете с использованием построенной snappyHexMesh сетки оказываются больше, чем значения сетки, построенной с помощью blockMesh. Это значит, что расчет с применением моделей турбулентности для сетки bm допускает увеличение шага по времени Δt. Диаграмма времени расчета на сетках представлена на рис. 10. На диаграмме можно заметить, что время счета на сетках bm и sm отличается незначительно, не учитывая время Keps_sm ввиду расхождения расчета.

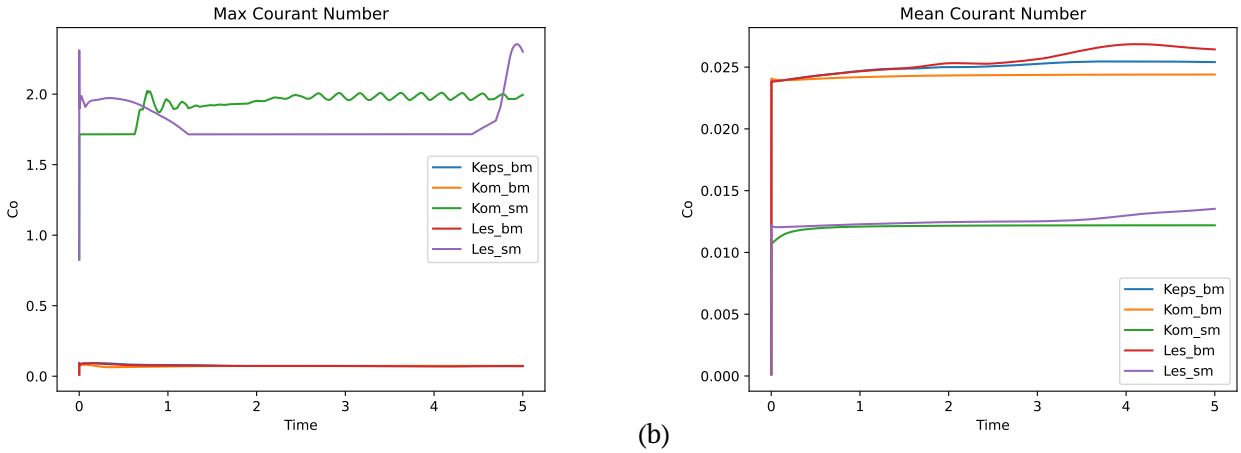


Рис. 7. Значения числа Куранта в ходе расчета для различных сеток: (a) максимальное число Куранта; (b) среднее число Куранта

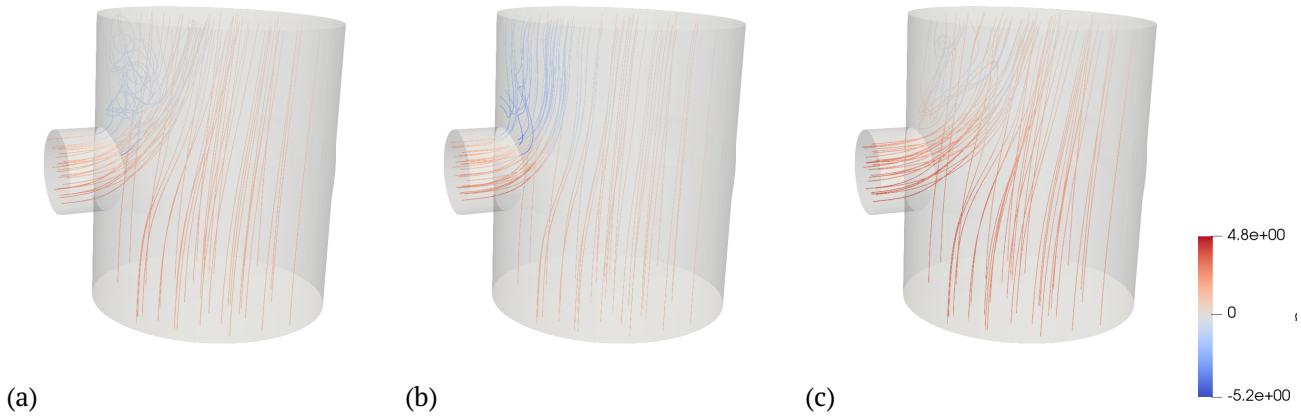


Рис. 8. Результаты пробных вычислительных экспериментов с использованием сетки 2. Показаны формы вихрей для различных моделей турбулентности: (a) модель k-ε; (b) модель k-ω; (c) модель Смагоринского

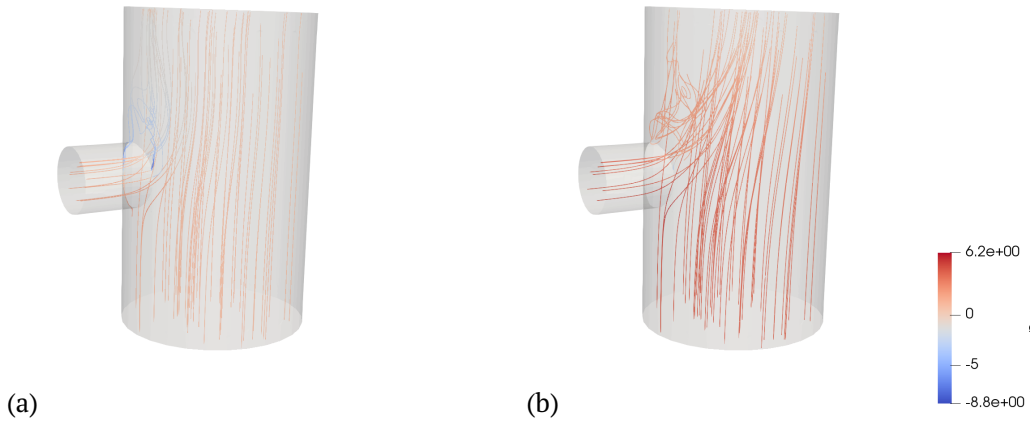


Рис. 9. Результаты пробных вычислительных экспериментов с использованием сетки, построенной с помощью snappyHexMesh. Показаны формы вихрей для различных моделей турбулентности: (a) модель k-ω; (b) модель Смагоринского

Таблица 2. Параметры качества сеток

Параметр	Сетка snappyHexMesh	Сетка blockMesh
Мин. объем	$4,28 \cdot 10^{-5}$	0,00121951
Макс. объем	0,157245	0,0022648
Макс. неортогональность	58,9713	10,9638
Средняя неортогональность	9,85755	5,45203
Максимальная скошенность	3,55625	0,457143

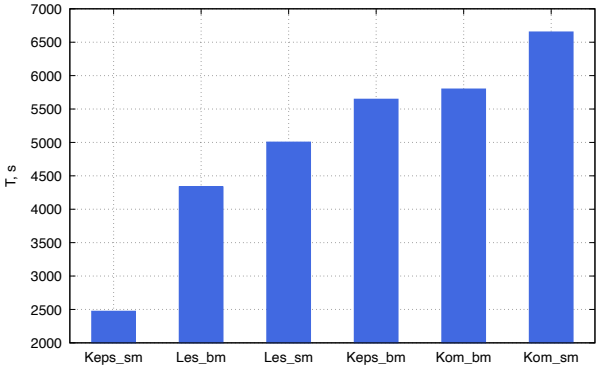


Рис. 10. Время расчета в различных вычислительных экспериментах

Расчеты с применением структурированной сетки, построенной с помощью blockMesh, показали большую устойчивость в сравнении с неструктурированной сеткой, построенной с помощью snappyHexMesh. Это может быть связано с более высокой ортогональностью и низкой скошенностью ячеек в структурированной сетке (табл. 2).

Стоит отметить, что неструктурированные сетки, создаваемые snappyHexMesh, позволяют более гибко адаптироваться к сложной геометрии при наличии резких изменений диаметра. Такие сетки позволяют локально уточнять разбиение в областях с большими градиентами скорости, что критично для корректного воспроизведения турбулентных вихрей и зон смешения. Однако неструктурированные сетки могут иметь повышенную неортогональность и скошенность, что потенциально увеличивает вычислительную ошибку и требует дополнительных ресурсов для коррекции численного решения.

6. Заключение

В настоящей работе проведен сравнительный анализ различных подходов к построению конечно-разностных сеток для моделирования течения жидкости в Т-образном соединении цилиндрических труб с использованием пакета OpenFOAM. Рассмотрены как структурированные сетки, создаваемые с помощью blockMesh, так и неструктурированные гексаэдрические сетки, формируемые инструментом snappyHexMesh. Проведенная по основным параметрам оценка качества (неортогональность, скошенность, объем ячеек) показала, что структурированная сетка, построенная по усовершенствованной схеме соединения блоков, обеспечивает лучшие показатели ортогональности и скошенности по сравнению с неструктурированной сеткой, что положительно сказывается на точности и устойчивости численного моделирования.

В то же время инструмент snappyHexMesh позволяет гибко адаптировать сетку к сложной геометрии области моделирования и локально уточнять разбиение в зонах с высокими градиентами скорости, что особенно важно для корректного описания турбулентных структур. Результаты численного моделирования с использованием различных моделей турбулентности (k-ε, k-ω, LES) подтвердили, что выбор и качество сетки оказывают существенное влияние на распределение устойчивости расчета при моделировании.

Таким образом, структурированная сетка, построенная с помощью blockMesh, имеет более хорошие показатели сходимости и времени счета для рассмотренной пробной задачи по сравнению с неструктурированной сеткой, построенной с помощью snappyHexMesh.

Список литературы / References

[1] Chang SL, Zhou C. Simulation of FCC riser flow with multiphase heat transfer and cracking reactions. *Computational Mechanics*. 2003;**31**(6):519–532. DOI: 10.1007/s00466-003-0459-7

[2] Theologos K, Markatos N. Advanced modeling of fluid catalytic cracking riser-type reactors. *AIChE Journal*. 1993;**39**(6):1007–1017. DOI: 10.1002/aic.690390610

[3] Novia N, Ray MS, Pareek V. Three-dimensional hydrodynamics and reaction kinetics analysis in FCC riser reactors. *Chemical product and process modeling*. 2007;**2**(2). DOI: 10.2202/1934–2659.1068

[4] Козлова АЮ, Михайленко КИ. Эйлер–Эйлерова модель динамики дисперсной среды в нижней части лифт-реактора. *Многофазные системы*. 2024;19(1s):60–62.
Kozlova AYu, <ikhaylenko CI. Euler–Euler model of the dynamics of a dispersed medium in the lower section of a lift reactor. *Multiphase Systems*. 2024;19(1s):60–62 (in Russian). DOI: 10.21662/mfs2024.1s

[5] Аксенов АА, Александрова НА, Будников АВ, Жестков МН, Сазонова МЛ, Кочетков МА. Моделирование LES-подходом в ПК FlowVision турбулентного перемешивания разнотемпературных потоков в Т-образном трубопроводе. *Компьютерные исследования и моделирование*. 2023;15(4):827–843.
Aksenov AA, Alexandrova NA, Budnikov AV, Zhestkov MN, Sazonova ML, Kochetkov MA. Simulation of multi-temperature flows turbulent mixing in a T-junctions by the LES approach in FlowVision software package. *Computer research and modeling*. 2023;15(4):827–843 (in Russian). DOI: 10.20537/2076-7633-2023-15-4-827-843

[6] *The Open Source ComputationalFluid Dynamics (CFD) Toolbox*. [online] URL: http://www.openfoam.com/ (Accessed 24.05.2025).

[7] *Ansys | Engineering Simulation Software*. [online] URL: https://ansys.com/ (Accessed 24.05.2025).

[8] *SALOME PLATFORM - The open-source platform for numerical simulation*. [online] URL: https://www.salome-platform.org (Accessed 24.05.2025).

[9] *FlowVision CFD*. [online] URL: https://flowvision.ru/ru/ (Accessed 24.05.2025).

[10] Седов ЛИ. *Механика сплошной среды.* Том 1. М.: Недра; 1970. 492 с. Sedov LI. *Continuum mechanics.* Vol 1. M.: Nedra; 1970. 492 p.

[11] Охотников ДИ. Прямое численное моделирование ламинарно-турбулентного перехода на сетках с локальным сгущением. *Ученые записки Казанского университета Серия Физико-математические науки.* 2017;**159**(2):216–230.
Okhotnikov DI. Direct numerical modeling of laminar-turbulent transition on grids with local thickening. *Scientific notes of Kazan University. Series Physical and mathematical sciences.* 2017;**159**(2):216–230 (in Russian). EDN: zqnuuf

[12] Коркодинов ЯА. Обзор семейства k–ε моделей для моделирования турбулентности. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение.* 2013;**15**(2):5–16. Korkodinov IaA. The review of set of k–ε models for modeling turbulence. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science.* 2013;**15**(2):5–16 (in Russian).
EDN: qyxpqp

[13] Launder B, Spalding DB. The numerical computation of turbulent flows. *Comput Methods Appl Mech Eng.* 1974;**3**(2):269-289. 10.1016/0045-7825(74)90029-2

[14] Михайленко КИ. К моделированию вихревой трубы: подготовка гексагональной сетки для вычислительных экспериментов в среде OpenFOAM. *Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН.* 2016;**11**(1):112-118.
Mikhaylenko CI. Simulation of the vortex tube: design of a hexagonal mesh for computational experiments in OpenFOAM. *Proceedings of the Mavlyutov Institute of Mechanics.* 2016;*11*(1):112–118.
DOI: 10.21662/uim2016.1.017

[15] Polansky J. *Pipeline mesh generator based on blockMesh version 2.5.* Physikalisch-Technische Bundesanstalt; 2021. 83 p.
DOI: 10.7795/530.20230512

[16] Ferziger JH, Perić M. *Computational methods for fluid dynamics.* Springer Science & Business Media; 2002. 364 p.
DOI: 10.1007/978-3-642-56026-2

Сведения об авторах / Information about the Authors

Абдулов Ильяс Айратович
Уфимский университет науки и технологий, Уфа

Ilyas A. Abdulov
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
ily4s.abdulov@yandex.ru
ORCID: 0009-0001-6843-1152

Яковлев Олег Витальевич
Уфимский университет науки и технологий, Уфа

Oleg V. Yakovlev
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
yakovlev_ov@inbox.ru
ORCID: 0009-0009-1726-4997