

## ВЫБОР СПОСОБА ПОСТРОЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ГОРЕНИЯ НЕПОДВИЖНОГО СЛОЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ANSYS FLUENT

Ахмед А.А.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Тикритский университет, г. Тикрит (Ирак)

<sup>2</sup> БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород

### Аннотация

Рассмотрен выбор параметров модели и расчетной сетки для модели горения неподвижного слоя твердого топлива. Представлены модели, включенные в расчет и их основные параметры. Проведено сравнение получаемых результатов моделирования при использовании различных сеток. Адекватность моделирования горения проверялась сравнением усредненного состава газов и их температуры в выходном окне с значениями, полученным при расчете горения топлива; усредненного содержания  $SO_2$  и  $NO$  в выходном окне с результатами расчетов выбросов и анализом горения по длине линий тока. Установлено, что многозонная сетка, используемая для всех областей, обеспечивает более адекватные результаты, в отличие от комбинации тетраэдрной сетки для газовой части и декартовой сетки для поверхностей, но характеризуется более высоким, в три раза, временем расчета. Комбинации многозонной сетки для газовой части и тетраэдрной для поверхностей и комбинации тетраэдрной сетки для газовой части и декартовой сетки для поверхности обладали одинаковым качеством и сопоставимыми получаемыми результаты, а так же одним временем расчета, но первый вариант содержит элементов на 20% меньше и обеспечивает лучшие результаты горения по отдельным линиям тока. В результате для моделирования был выбран вариант многозонной сетки для газовой части и тетраэдрной для поверхностей как обеспечивающий адекватные результаты при меньшем времени расчета.

**Ключевые слова:** топка, горение, твердое топливо, неподвижный слой, сетка, ANSYS Fluent.

## SELECTING THE MESH FOR MODELLING THE COMBUSTION OF A STATIONARY SOLID FUEL BED IN ANSYS FLUENT

Ashraf Ahmed <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Tikrit University, Iraq

<sup>2</sup> Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

### Abstract

The choice of model parameters and calculation grid for the model of combustion of a fixed layer of solid fuel is considered. The models included in the calculation and their main parameters are presented. The comparison of the obtained modelling results using different meshes is carried out. The adequacy of combustion modelling was checked by comparing the averaged composition of gases and their temperature in the output window with the values obtained by calculation of fuel combustion; the averaged  $SO_2$  and  $NO$  content in the output window with the results of emission calculations and combustion analysis along the length of current lines. It is found that the multi-area grid used for all areas provides more adequate results, in contrast to the combination of a tetrahedral grid for the gas part and a Cartesian grid for the surfaces, but is characterised by a higher, three times, calculation time. The combinations of the multi-area grid for the gas part and



*tetrahedron grid for the surfaces and the combination of the tetrahedron grid for the gas part and Cartesian grid for the surfaces had the same quality and comparable results, as well as the same calculation time, but the first variant contains 20% fewer elements and provides better combustion results on individual current lines. As a result, the multi-zone grid for the gas part and the tetrahedral grid for the surfaces were chosen for modelling as providing adequate results with shorter calculation time.*

**Keywords:** furnace, combustion, solid fuel, fixed layer, mesh, ANSYS Fluent

## Введение

Выбор параметров расчетной модели и составление сетки – одно из важнейших условий для получения надежных результатов в CFD. Качество сетки определяется на основе нескольких параметров, таких как форма элементов, перекося, ортогональность, качество и распределение. Если один или несколько параметров не соответствуют решаемой задаче, низкое качество сетки может вызвать проблемы со сходимостью и приведет к получению недостоверных результатов [1, 2]. Иногда небольшие изменения в параметрах модели и сетке могут привести к значительному изменению процессов течения жидкости при моделировании. Сетка должна быть выбрана в соответствии с характеристиками потока и должна быть очень плотной в областях, где поток имеет сложное меняющееся течение – в пограничных слоях, ударных волнах, при рециркуляции, расширений и сужение, при изменении направления и обтекании тел. Сетка создается на этапе предварительной обработки. При создании сетки ее элементы генерируются и анализируются в CFD-симуляторе [3]. Элементы могут быть созданы для оценки сложного физического поведения, нестационарных режимов течения, теплообмена и других последствий реакционной системы. Одной из главных задач CFD-моделирования заключается в выборе необходимых моделей и их параметров, исследовании влияния различных типов сеток и их размеров на точность решения.

## 1. Общие принципы численного моделирования в CFD-системах

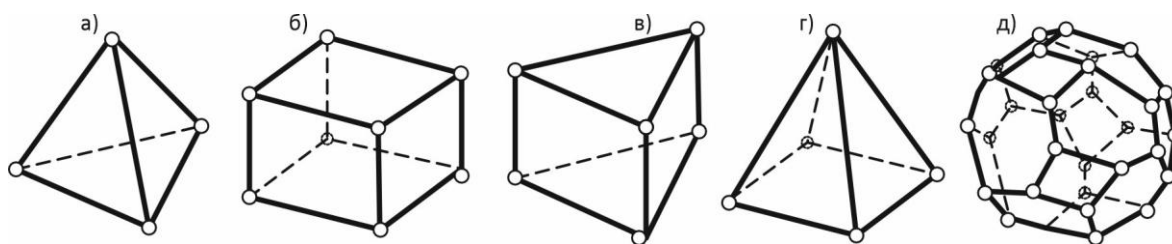
### 1.1. Дискретизация расчетного объема

CFD – это системы для численного решения задач гидродинамики. Необходимость их использования вызвана тем, что многие задачи гидродинамики не имеют аналитического решения в закрытой форме. В гидродинамике фундаментальными уравнениями являются дифференциальные уравнения Навье-Стокса, которые определяют движение среды. Уравнение неразрывности определяет сохранение массы [4]. Луи Навье и Джордж Стокс независимо друг от друга вывели уравнение вектора импульса, которое является комбинацией уравнений движения. В настоящее время общепринято использовать уравнения Навье-Стокса в качестве обозначения всех основных уравнений течения жидкости – непрерывности, импульса и энергии [5]. Основная функция вычислительной гидродинамики (CFD) заключается в дискретизации этих частных дифференциальных уравнений (PDE) и их решении с использованием схем численного интегрирования. В методе используется метод конечных разностей, при котором конечные пространственные ячейки используются для замены бесконечно малых элементов, как это классически понимается в математическом анализе. В базовом методе конечных разностей (FDM) контрольные объемы (CV) представляют собой идентичные объемы (в 3D), представленные равноотстоящими узлами. Это упрощает поток, так как все области, над которыми он проходит, равны, а направления потока глобально выровнены.



Частные производные аппроксимируются разностными коэффициентами, поэтому значения в поле потока могут быть определены итеративно, учитывая граничные условия (ГУ). Метод конечных элементов (FDM или МКЭ) - это альтернативная конечно-разностная форма, первоначально разработанная для структурного анализа [6]. Он особенно эффективен, поскольку позволяет использовать неструктурированные сетки из треугольных/четырёхугольных лицевых элементов, нерегулярность которых записывается в виде функции формы [7]. В этом методе, в отличие от метода конечных разностей, для численного интегрирования используются полиномиальные интегральные формы уравнений с частными производными [5]. Третьим методом, который используется в Ansys Fluent, является метод конечных объемов (FVM). Этот метод сочетает возможность моделирования сложных геометрических форм и использования неструктурированных сеток, как в МКЭ, и простые и очевидные связи между конечно-разностными формулами и частными дифференциалами, которые они заменяют, как в методе конечных разностей [6, 8]. Интегрирование по переменным обеспечивает сохранение данных, а частичные разности заменяются разностными отношениями, как в конечных разностях.

Fluent использует метод конечных объемов для разделения вычислительной области на множество ячеек, каждая из которых окружена несколькими узлами, как показано на рис. 1.



**Рис. 1. Расчетная ячейка:**

- а) тетраэдрная (tetrahedron); б) кубическая (hexahedron); в) призма/грань (prism/wedge); г) пирамидальная (pyramid); д) многогранная (polyhedron)

Чтобы определить полный объем потока, уравнения сохранения решаются для каждой ячейки, сохраняя полученные переменные, включая температуру, плотность и скорость. В нашем концепте область изначально делится на тетраэдрические (2D) или тетраэдрические и кубические (3D) ячейки. Это требование модели, следовательно, вычислительная область должна быть совместима либо с тетраэдрическими, либо с комбинацией тетраэдрических и кубических ячеек.

### 1.3. Этапы моделирования и методы построения расчетных сеток

Вычислительная гидродинамика – это численный эксперимент, а не теория [9], и все этапы требуют участия исследователя. Решение задач в CFD включает:

- разработку геометрической модели, задание сетки и граничных условий, выбор параметров численного решения;
- численный расчет до установления сходимости;
- интерпретацию результатов.

При разработке модели необходимо задать расчетную сетку и выбрать используемые для расчета уравнения. В моделировании расчетная сетка – это численная область, которая точно представляет физический объем системы. При этом используется ряд упрощений и допущений, например, исключаются малые области, так как они требуют более точной сетки. Размер ячеек расчетной сетки служит степенью закругления



модели, так как исключает игнорировать флуктуации в масштабе, меньшем, чем шаг сетки. Границы геометрических систем в большинстве случаев являются открытыми и имеют, по крайней мере, один вход и один выход. Сетка разделена на элементарные ячейки, размер сетки обычно указывается как число этих ячеек и составляет  $10^3$ – $10^7$ . В критических областях размер ячеек обычно уменьшают.

В узлах сетки определяются численные значения переменных полей, которые включены в модель. Границы области характеризуют граничные условия – заданные значения переменных в определенной точке или закона изменения этих переменных в виде функции изменения значения во времени, значение градиента переменной поля или функции, включающей другие переменные и параметры (например, коэффициент теплоотдачи). Так же для модели задается начальное состояние – значения переменных перед началом расчета.

Как правило, существует три различных метода построения сетки, которые используются для деления расчетной области на дискретные ячейки:

- структурированная сетка (в которых каждая ячейка, кроме расположенных на границе области, имеет одно и то же число соседних ячеек);
- неструктурированная сетка с тетраэдрическими элементами;
- неструктурированная сетка с полиэдрическими элементами.

Каждый метод сетки имеет свои преимущества и недостатки, которые могут повлиять на решение по моделированию течения жидкости. Качество сетки играет важную роль в точности моделирования и результатов, так как чем точнее сетка, тем лучше будут результаты, но это займет больше вычислительного времени, и это зависит от хороших технических характеристик компьютера, используемого в процессе применения [10].

На процессы гидрогазодинамики и теплообмена и химические реакции в моделируемом объеме значительное влияние оказывают граничные условия – распределение расхода потоков на входе, также является значительным фактором [11]. На движение жидкости через неподвижный слой влияет его структура. На кинетику реакции горения влияет значение температуры, зависящие от механизмов теплопередачи. Температурные градиенты уменьшаются в результате наличия значительных механизмов теплопроводности и конвекции. Поэтому для моделирования горения важен точный расчет распределения температур [12].

## 2. Выбор (Материалы и методы)

### 2.1. Параметры численной модели в Ansys Fluent

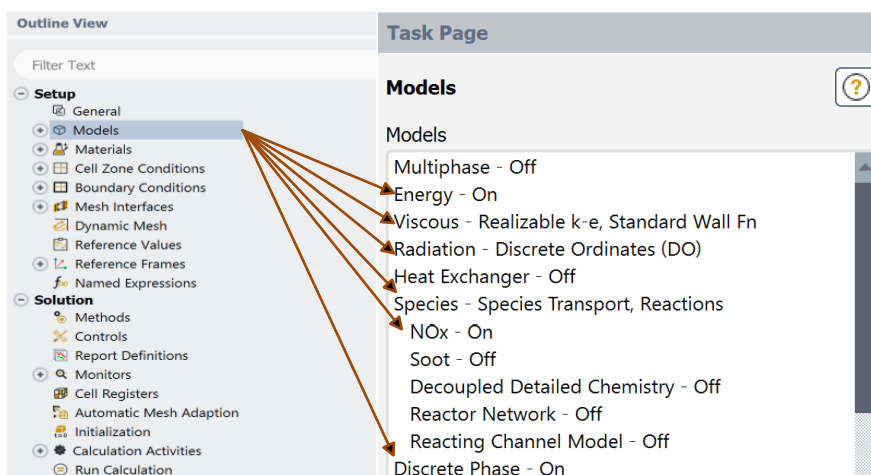
Энергетическое использование отходов является одним из направлений их утилизации, главной проблемой которого является обеспечение экологических требований [13]. При разработке моделей сделаны следующие предположения:

- слой топлива моделируется через его непрерывную подачу на границе области, ограничивающей твердое топливо;
- уравнение импульса твердой фазы не учитывается;
- тепловое равновесие между фазами отсутствует;
- для характеристики процесса сушки используется модель постоянной температуры;
- включено сгорание в газовой фазе;
- для описания пиролиза используется модель параллельной реакции с одним этапом;
- включены газификация и сжигание, которые являются гетерогенными реакциями углеродного остатка;



- скорость однородного сгорания рассчитывается по модели вихревой диссипации (EDM);
- транспортировка газов в твердой фазе не учитывается; продукты горения выделяются немедленно с той же температуре, что и твердая фаза;
- нет уноса частиц из слоя.

В разработанной расчетной модели, кроме включенных по умолчанию уравнений законов сохранения массы и импульса, включены следующие модели физических процессов (рис. 2, табл.1 ).



**Рис.2. Выбор расчетных моделей**

Таблица1

**Параметры расчетных моделей**

Модели физических процессов	Параметр	Значение
1. Энергия (Energy)	-	-
2. Модель турбулентности (Viscous)	Model	k-ε (модель турбулентности)
	k-ε модель	Realizable
	Near-War Treatment	Standard Wall Function
3. Излучение (Radiation)	Discrete Ordinates	Solar Load (off)
4. Модель переноса компонентов (Species Transport)	Reactions	Volumetric
	Chemistry Solver	None-Direct Source
	Mixture Material	Coal-volatiles-air
	Turbulence-Chemistry Interaction	EDD-Dissipation
5. Модель образования оксидов азота (NOx)	Pathways	Thermal NOx Prompt NOx Fuel NOx
	Fuel Streams	Vol
6. Модель дискретной фазы (Discrete Phase)	-	-

Использованные настройки моделей турбулентности и теплообмена излучением представлены в табл. 2.



Таблица 2

**Настройки для пространственной дискретизации (модели k-ε и DO)**

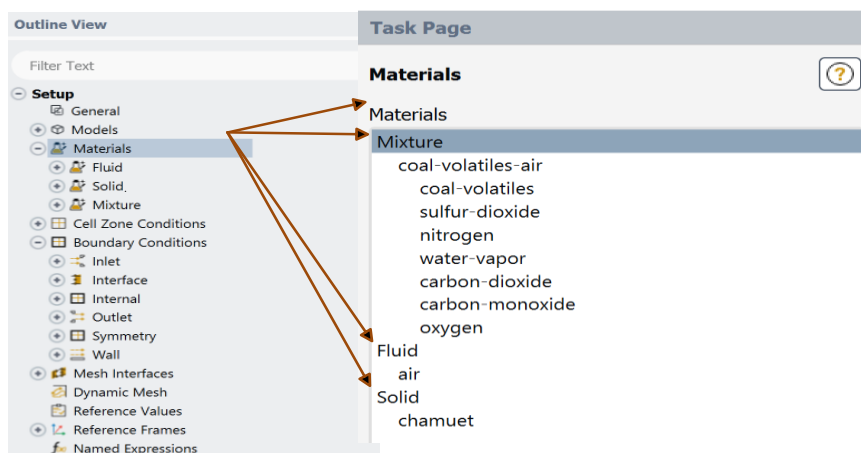
Параметр	Значение	Параметр	Значение
Градиент	Метод наименьших квадратов на основе ячеек	Vol	Второй порядок
Давление	PRESTO	O <sub>2</sub>	Второй порядок
Импульс	Второй порядок	CO <sub>2</sub>	Второй порядок
Плотность	Второй порядок	H <sub>2</sub> O	Второй порядок
Турбулентная кинетическая энергия	Второй порядок	CO	Второй порядок
Скорость диссипации турбулентности	Второй порядок	Загрязнитель NO	Второй порядок
Энергия	Второй порядок	Загрязнитель HCN	Второй порядок
Дискретная фаза	Первый порядок	Загрязнитель NH <sub>3</sub>	Второй порядок

Чтобы обеспечить сходимость, в вычислительной модели были скорректированы коэффициенты релаксации. Это связано с тем, что моделирование сложных потоков жидкости может становиться нестабильным или расходящимся. Коэффициенты релаксации помогают регулировать степень изменения переменных при каждом шаге (табл. 3). Используемые материалы и граничные условия представлены на рис. 3 и 4.

Таблица 3

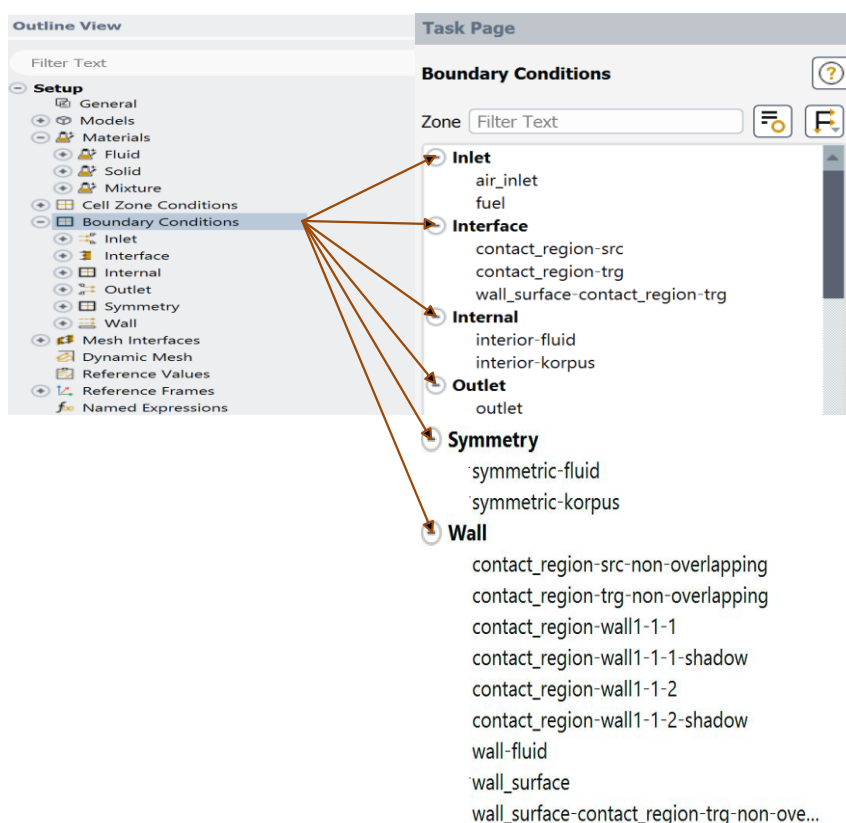
**Коэффициенты релаксации (модели k-ε и DO)**

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
Давление	0,5	Турбулентная вязкость	1	H <sub>2</sub> O	0,75
Импульс	0,5	Энергия	0,75	CO	0,75
Плотность	0,5	Дискретные ординаты	1	NO	0,75
Массовая сила	1	Летучие (Vol)	0,75	HCN	0,75
Турбулентная кинетическая энергия	0,75	O <sub>2</sub>	0,75	NH <sub>3</sub>	0,75
Турбулентная скорость диссипации	0,75	CO <sub>2</sub>	0,75	Источники дискретной фазы	0,5



**Рис. 3. Материалы модели**





**Рис.4. Граничные условия модели**

Используемые области граничных условий описаны в первой части работы [14].

## 2.2 Анализ чувствительности сетки

Для построения сетки была использована адаптированная решетчатая модель, состоящая из многогранных компонентов, представляющих собой трехмерные фигуры с четырьмя треугольными сторонами. Первоначально использовалась преимущественно четырехсторонняя адаптивная сетевая модель. После этого, чтобы уменьшить размер и количество сетевых компонентов, сетевая модель была преобразована в многогранную конфигурацию. Это способствовало ускорению процесса принятия решений, тем самым сократив общее количество компонентов с 1 363 243 до 1 060 690, что повысило скорость расчетов и при сохранении показателей качества сетки. Кроме того, были введены счетчики «пространственного распознавания» (определения местоположения) – метод, используемый для упрощения сложных уравнений с целью облегчения вычислений.

В табл. 4 показано определение оптимального количества ячеек сетки модели. Было произведено моделирование с разным числом ячеек с определением среднего содержания компонентов и температуры газов на выходе из топки. Результат сравнивался со значениями, полученным при расчете горения топлива.

Как видно из рис. отклонения стабилизируются и допустимая точность моделирования достигается при числе ячеек 1 060 269.



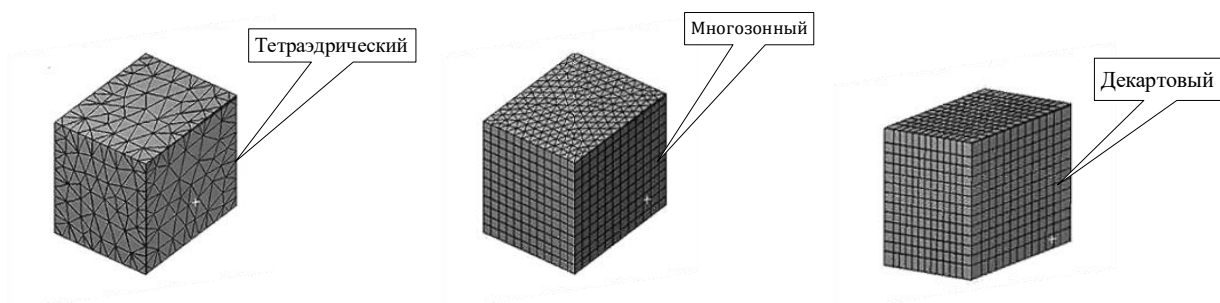
Таблица 4

**Независимость сетки**

№	Число ячеек	Сумма относительных отклонений состава продуктов горения и температуры на выходе из топки от расчетных	Лучший выбор
1	765 876	33,5%	×
2	799 800	11,0%	×
3	865 390	4,5%	×
4	976 543	3,5%	×
5	1 060 269	1,8%	√
6	1 100 653	1,7%	×

**2.3. Выбор способа построения сетки**

Использовались три различных метода построения сеток (многозонный, декартовый и тетраэдрический) с разным количеством элементов (рис. 5).

**Рис. 5. Методы построения сеток**

1. Тетраэдрическая (tetrahedron) сетка характеризуется двумя основными свойствами: изотропией и спонтанной симметрией, под которой понимается, что все грани представляют собой приблизительно равносторонние треугольники [15].

2. Многозонная (multizone) сетка. Позволяет точно контролировать интерфейсы сетки, что способствует сходимости решения и минимизирует вероятность расхождения и искажения элементов в сетке. Кроме того, позволяет определять конкретные области и задавать геометрические характеристики, такие как диаметры координат, высоты, или качественные свойства, например изотропию или четность [16].

3. Декартова (Cartesian) сетка – построение сетки из точек, вершин, ячеек или компонентов декартовой сетки. Сетка эффективно генерируется, а с развитием систем моделирования нового поколения декартова сетка может представлять и определять геометрическую область напрямую. Простой структурный дизайн способствует простой генерации, однако метод недостаточен для геометрически сложных областей [17].

Рассмотрены три варианта генерации с использованием инструмента ANSYS Workbench:

- а) Multizone – кубическая многозонная сетка для всего объекта;
- б) Cartesian+Tetrahedron – тетраэдрическая сетка (для газовой области) в сочетании с декартовой сеткой (для поверхностей);
- в) Multizone + Tetrahedron – тетраэдрическая сетка (для газовой области) в сочетании с многозонной сеткой (для поверхностей);
- г) Polyhedral – адаптивная сетка, которая в основном состоит из многогранных элементов.



Третий вариант был выбран потому, что две сетки улучшили взаимосвязи между различными компонентами модели и продемонстрировали возможность согласования трехмерной геометрии, что повысило надежность моделирования для получения точных результатов. Далее, чтобы уменьшить размер и количество компонентов сетки, сеточная модель была преобразована в сетчатую структуру из многогранников (Polyhedral). Это ускорило процесс принятия решений за счет сокращения общего количества компонентов, повышения независимости от сети, обеспечения оптимальной точности, минимизации времени обработки и поддержания показателей качества (рис. 6).

Использованием различных конфигураций сетки показало заметные различия в результатах (табл. 5).

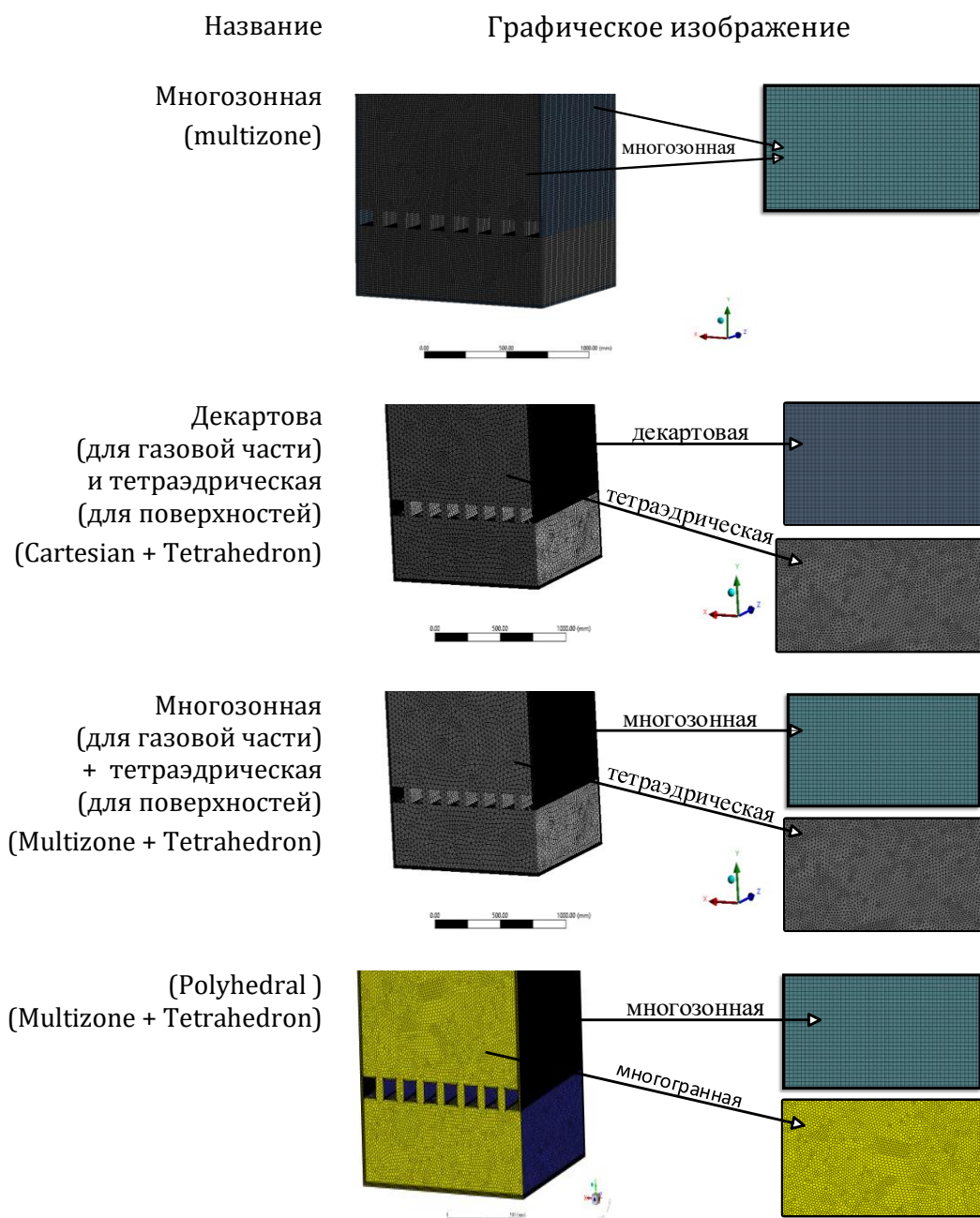


Рис. 6. Изображения сеток



Таблица 5

**Параметры сеток**

№	Тип сетки	Количество, млн.		Показатели качества (минимальное; максимальное; среднее значения)		
		ячеек	узлов	Ортогональное качество (Orthogonal Quality)	Коэффициент асимметрии (Skewness)	Соотношение сторон (Aspect ratio)
1	Многозонная (multizone)	2,822	11,84	0,798; 1,000; 0,998	$3,50 \cdot 10^{-10}$ ; 0,514; 0,0243	1,000; 2,492; 1,067
2	Декартова и тетраэдрическая (Cartesian + Tetrahedron)	5,395	23,57	0,386; 1,000; 0,975	$1,31 \cdot 10^{-10}$ ; 0,613; 0,0562	1,000; 4,731; 1,213
3	Многозонная тетраэдрическая (Multizone + Tetrahedron)	4,674	19,71	0,402; 1,000; 0,962	$1,50 \cdot 10^{-10}$ ; 0,597; 0,039	1,000; 4,871; 1,140
4	Polyhedral (Multizone + Tetrahedron)	3,702	12,63	–	–	–
5	Polyhedral (Cartesian + Tetrahedron)	4,942	66,43	–	–	–

**3. Сравнение результатов расчета при использовании различных типов сеток (Результаты и обсуждение)**

Проведено сравнение получаемых результатов моделирования при использовании различных сеток. Адекватность моделирования горения проверялась сравнением усредненного состава газов в выходном окне (outlet) и состава продуктов горения из расчета горения топлива; усредненной температуры газового потока в выходном окне (outlet) и результатов расчета адиабатной температуры горения топлива [18]; усредненного содержания  $SO_2$  и  $NO$  в выходном окне (outlet) и расчетов выбросов при сжигании твердого топлива и выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от установок малой производительности по термической переработке отходов; анализом горения по ходу движения газов в расчетной области (значение температуры, содержания  $O_2$ ,  $CO$ , летучих по длине линий тока – Streamline).

**3.1. Модель: вертикальный газопровод над котлом высотой 1,5 м с поворотом газов на 180°**

Расчетная область разделена на ряд зон, которые связаны между собой газовым потоком. Воздух поступает через входное окна диаметром 400 мм, отходящие газы уходят через выходное окно диаметром 600 мм. В расчетной области происходит горение твердого топлива в неподвижном слое и движение газом вдоль верхней и боковых стенок с определенными траекториями (рис. 7). Характеристиками физических параметров сетки являлись (табл. 6):

- тип сетки;
- размер (количество) элементов сетки;
- метрическое качество сетки (минимальное, максимальное и среднее).

С использованием ANSYS Workbench (рис. 8) были выбраны два типа сеток:

- 1) многозонная (multizone);
- 2) тетраэдрическая и декартова сетка (Cartesian, tetrahedron).



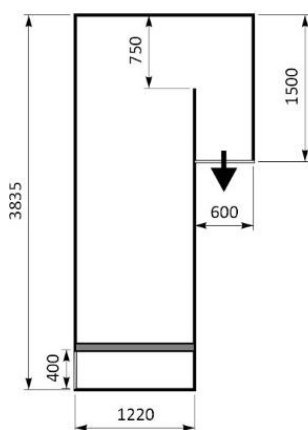


Рис.7. Размеры расчетной области

Таблица 6

Параметры сеток

№	Тип сетки	Количество, млн.		Ортогональное качество (Orthogonal Quality)			Коэффициент асимметрии (Skewness)			Соотношение сторон (Aspect ratio)		
		ячеек	узлов	Мин	Макс.	Среднее	Мин	Макс.	Среднее	Мин	Макс.	Среднее
1	Multizone	2,822	11,84	0,798	1,0	0,998	$3,50 \cdot 10^{-10}$	0,514	0,0243	1,0004	2,492	1,067
2	Tetrahedron + Cartesian	5,171	20,02	0,406	1,0	0,942	$1,31 \cdot 10^{-10}$	0,688	0,0583	1,0	4,887	1,323

При моделировании были получены скорости и температуры газов, средние параметры газов в выходном окне и определены расчетное время прохождения газов в вертикальном газоходе.

Первый вариант имел вдвое больший размер сетки (табл. 7), но при этом скорость расчета была значительно ниже. По физической адекватности расчет горения более соответствовал первому варианту (табл. 7, рис. 8), так как:

- а) тип «Multizone» обеспечивал значительно более лучшее качество сетки;
- б) средняя температура газов в выходном сечении (1579 К) больше соответствовала расчетной адиабатической температуре горения топлива 1688 К;
- в) зона окончания горения в большинстве линий тока находилось в топке над слоем топлива, тогда как во втором варианте наблюдалось значительное количество линий тока, в которых горение не происходило (рис. 9).

Таблица 7

Результаты моделирования

№	Вид сетки	Средняя концентрация в выходном сечении, мас. доли								Температура, К	
		O <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	NO	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Летучие	максимальная	средняя
1	Multizone	0,0526	0,00028	0,1663	0,0006	0,6875	0,0922	0,0011	0,0001	2 185	1 579
2	Tetrahedron + Cartesian	0,0385	0,0000	0,1802	0,0003	0,6805	0,0996	0,0012	0,0000	2 104	1 709



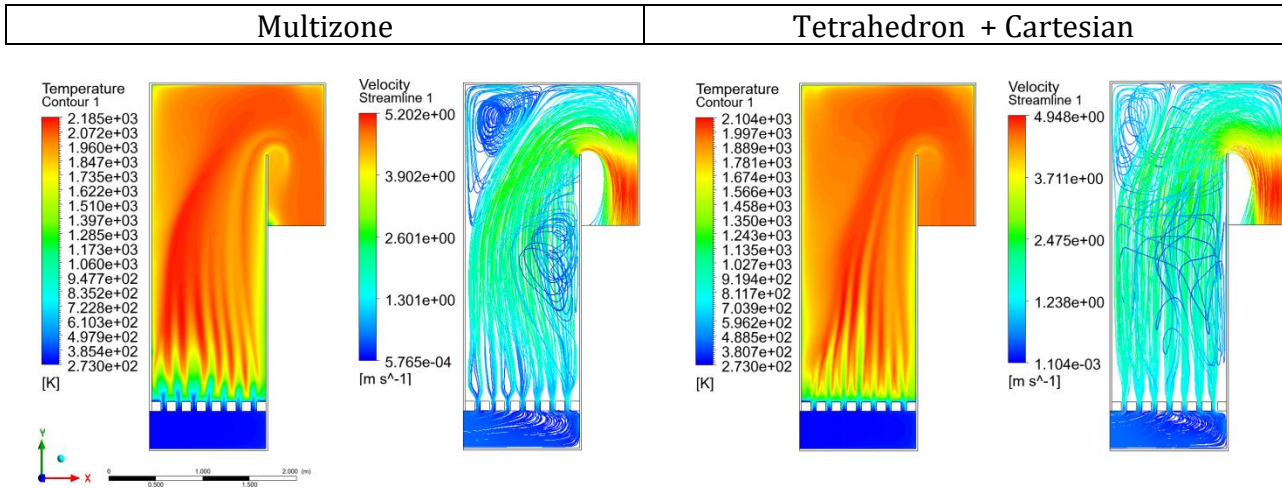


Рис. 8. Поля температур и скоростей

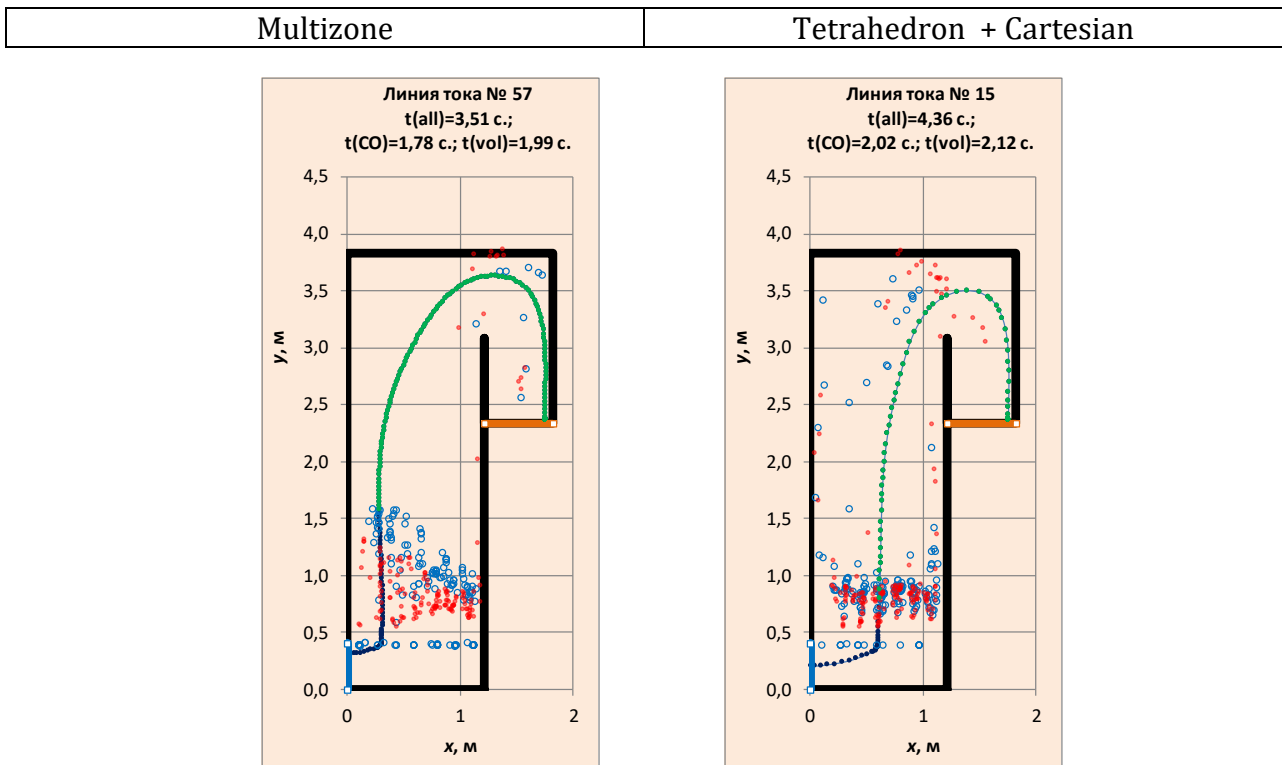


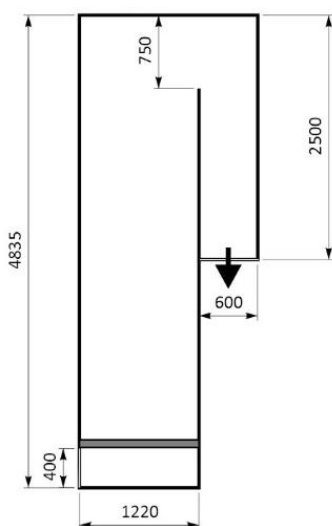
Рис. 9. Расчет времени окончания горения  
(o – расчет по концентрации CO; • – расчет по содержанию летучих)

Можно сделать вывод, что сетка «Multizone» обеспечивает адекватные результаты, в отличие от сетки «Tetrahedron + Cartesian», но характеризуется более высоким временем расчета (25 часов и 8 часов).



**3.2. Модель: Вертикальный газоход над котлом высотой 2,5 м с поворотом газов на 180°.**

Вторая расчетная модель имела более высокий газоход после топки высотой 2,5 м (рис. 10), использовались физические параметры сетки, указанные в табл. 8. Первый тип сетки задан как «Многозональная и Тетраэдрическая» (Multizone + Tetrahedron), а второй тип сетки – «Декартова и тетраэдрическая» (Cartesian, Tetrahedron). Также были смоделированы температура, скорость и время пребывания газов в вертикальном газовом потоке (табл. 8, 9, рис. 11, 12).



**Рис.10. Размеры расчетной области**

Таблица 8

Параметры сеток

№	Тип сетки	Количество, млн.		Ортогональное качество (Orthogonal Quality)			Коэффициент асимметрии (Skewness)			Соотношение сторон (Aspect ratio)		
		ячеек	узлов	Мин	Макс.	Среднее	Мин	Макс.	Среднее	Мин	Макс.	Среднее
1	Multizone+ Tetrahedron	4,386	17,98	0,394	1,0	0,954	$1,31 \cdot 10^{-10}$	0,606	0,0466	1,0	4,506	1,169
2	Cartesian Tetrahedron	5,395	23,58	0,386	1,0	0,975	$1,30 \cdot 10^{-10}$	0,613	0,0256	1,0	4,731	1,213

Таблица 9

Результаты моделирования

№	Вид сетки	Средняя концентрация в выходном сечении, мас. доли								Температура, К	
		O <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	NO	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	Летучие	максимальная	средняя
1	Multizone+ tetrahedron	0,0122	0,0000	0,2047	0,0012	0,6685	0,1132	0,00139	0,00000	2 156	1 969
2	Cartesian+ Tetrahedron	0,0122	0,0000	0,2048	0,0013	0,6685	0,1132	0,00139	0,00000	2 156	1 986



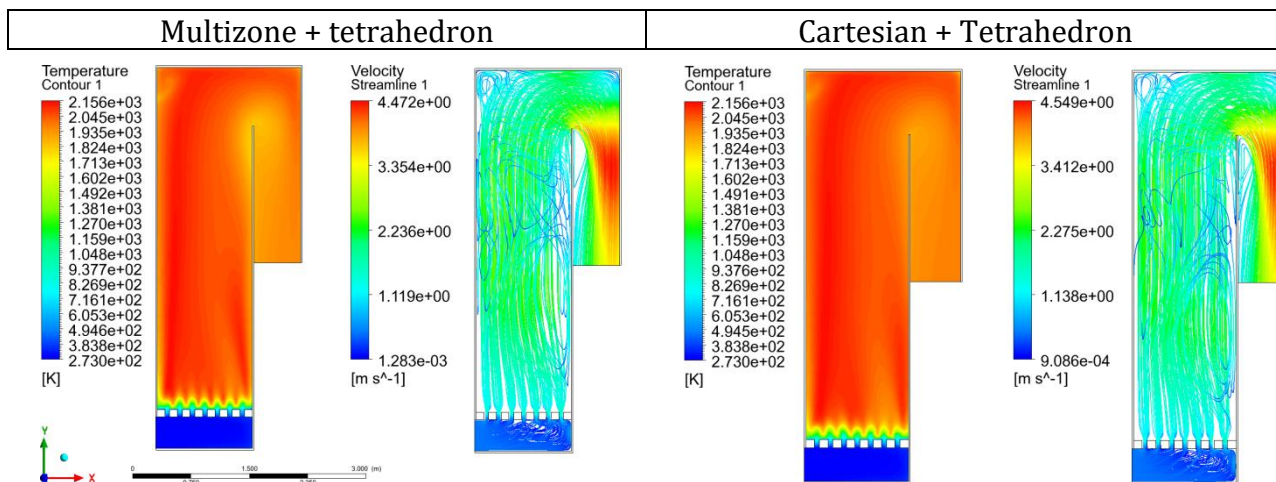


Рис. 11. Поле температур скоростей

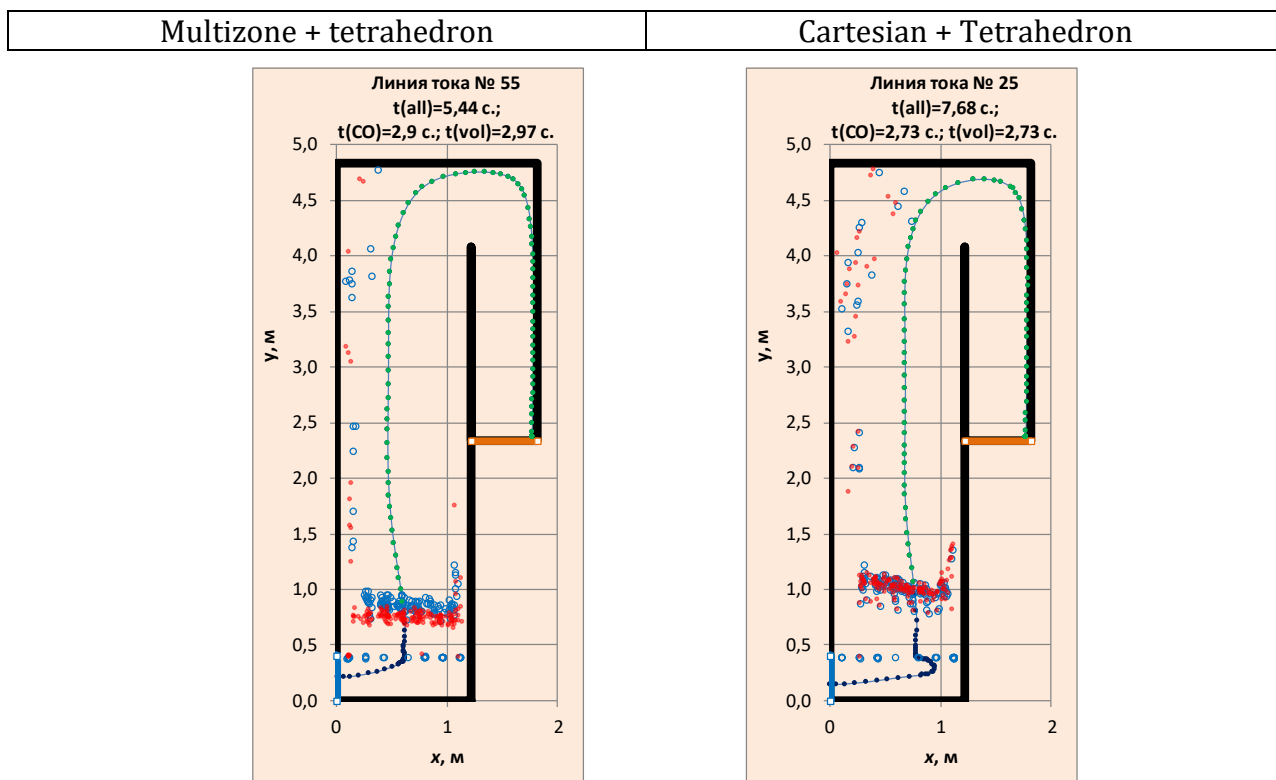


Рис. 12. Расчет времени окончания горения  
 (o – расчет по концентрации CO; • – расчет по содержанию летучих)

Сравнивая два типа сетки, можно увидеть их одинаковое качество (табл. 8), сопоставимые результаты (табл. 9), варианты характеризовались одним временем расчета (около 8 часов), но первый вариант обеспечивает меньшее количество элементов и более лучшие результаты горения по отдельным линиям тока (рис 12).



#### 4. Выводы

В работе для предложенной в [14] расчетной модели горения неподвижного слоя твердого топлива рассмотрен выбор расчетной сетки. Адекватность моделирования горения проверялась сравнением усредненного состава газов и их температуры в выходном окне с значениями, полученным при расчете горения топлива; усредненного содержания  $SO_2$  и  $NO$  в выходном окне с результатами расчетов выбросов и анализом горения по длине линий тока.

Сетка «Multizone», используемая для всех областей, обеспечивает адекватные результаты, в отличие от сетки «Tetrahedron (для газовой части) + Cartesian (для поверхностей)», но характеризуется более высоким, в три раза, временем расчета. Сетки «Multizone (для газовой части) + Tetrahedron (для поверхностей)» и «Cartesian (для газовой части) + Tetrahedron (для поверхностей)» обладали одинаковым качеством и сопоставимыми получаемыми результаты, одним временем расчета, но сетка «Multizone + Tetrahedron» содержит меньшее количество элементов (4,4 млн. ячеек и 18 млн. узлов, что на 20% меньше, чем в сетке «Cartesian + Tetrahedron») и обеспечила лучшие результаты горения по отдельным линиям тока.

В результате для моделирования был выбран вариант сетки «Multizone (для газовой части) + Tetrahedron (для поверхностей)», как обеспечивающий адекватные результаты при меньшем времени расчета. Для уменьшения размера сеточная модель преобразовывалась в адаптивную структуру из многогранников (Polyhedral), что позволило уменьшить размер на 25%, улучшило взаимосвязи между областями, и повысило надежность моделирования.

#### Информация о финансировании (Acknowledgments)

Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

#### Библиографический список

1. **Alfarawi S.S., El-Sawi A., Omar H.** Exploring discontinuous meshing for cfd modelling of counter flow heat exchanger // Journal of Advanced Research in Numerical Heat Transfer. – 2021. – Vol. 5 – P. 26-34.
2. **Charlesworth D.J.** Solution of the incompressible Navier-Stokes equations on unstructured meshes. – London: University of London, 2024. –196 p.
3. Application of polyhedral meshing strategy in indoor environment simulation: Model accuracy and computing time/ **H. Chen, X. Zhou, Z. Feng, S. Cao** // Indoor and Built Environment. – 2022. – Vol. 31(3). – P. 719-731. DOI: [10.1177/1420326X211027620](https://doi.org/10.1177/1420326X211027620).
4. Theories and applications of CFD-DEM coupling approach for granular flow: A review/ **M.A. El-Emam, L. Zhou, W. Shi** et al. // Archives of Computational Methods in Engineering. – 2021. – Vol. 28. – P. 4979-5020. DOI: [10.1007/s11831-021-09568-9](https://doi.org/10.1007/s11831-021-09568-9).
5. **Massey B. S., Ward-Smith J.** Mechanics of fluids / 8th ed. – London: Taylor & Francis. – 697 p.
6. **Versteeg H.K., Malalasekera W.** (1995). An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The finite volume method / 2nd ed. – Harlow: Longman Scientific & Technical, 1995. – 257 p.
7. **Donea J., Huerta A.** Finite element methods for flow problems. – Chichester: John Wiley & Sons, 2003. – 350 p. DOI: [10.1002/0470013826](https://doi.org/10.1002/0470013826).
8. **Singh R.I., Brink A., Hupa, M.** CFD modeling to study fluidized bed combustion and gasification //Applied thermal engineering. – 2013. – Vol. 52(2). – P. 585-614. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2012.12.017](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.12.017).



9. **Roache P.J.** Fundamentals of computational fluid dynamics(Book). – Socorro: Hermosa Publishers, 1998. – 648 p.
10. **Shrivastava D.** CFD Modelling of Underground Coal Gasification using ANSYS Fluent Simulator // International Journal of Scientific and Engineering Research. – 2021. – Vol. 12(7). – P. 505–519. DOI: [10.14299/ijser.2021.07.02](https://doi.org/10.14299/ijser.2021.07.02).
11. **Кузнецов В.А., Трубаев П.А.** Возможности и проблемы математического моделирования теплотехнологических процессов // Энергетические системы. – 2017. – № 1. – С. 54-61. EDN: [PDDPPD](https://edn.ru/PDDPPD).
12. Fluid flow simulation of industrial fixed bed mixed-flow grain dryer using k- $\omega$  SST turbulence model/ **A.R. Visconcini, C.M.G. Andrade, A.M. de Souza Costa** // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. – 2021. – Vol. 14(2). – P. 226-230. DOI: [10.25165/ijabe.20211402.5321](https://doi.org/10.25165/ijabe.20211402.5321).
13. Особенности сжигания отходов с получением энергии / **П.А. Трубаев, И.И. Щекин, Н.В. Корнилова, Б.М. Гришко** // Научные технологии и инновации. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. – С. 105-109. EDN: [YNLUBP](https://edn.ru/YNLUBP).
14. **Ахмед А.А.А.** Выбор модели горения неподвижного слоя твердого топлива в ANSYS FLUENT // Энергетические системы. – 2024. – № 2. – С. 19-34. DOI: [10.34031/es.2024.2.002](https://doi.org/10.34031/es.2024.2.002).
15. Optimization of a tetrahedron compliant spherical joint via computer-aided engineering tools/ **S.M. Kargar, A. Parmiggiani, M. Baggetta** et al. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2024. – Vol. 132(3). – P. 1151-1162. DOI: [10.1007/s00170-024-13314-3](https://doi.org/10.1007/s00170-024-13314-3).
16. Comparison of meshing strategies in THR finite element modelling / **A. Ruggiero, R. D’Amato, S. Affatato** //Materials. 2019. – Vol. 12(14). – P. 2332. DOI: [10.3390/ma12142332](https://doi.org/10.3390/ma12142332).
17. An efficient Cartesian mesh generation strategy for complex geometries / X. Li, M. Yang, L. Bi et al. // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2024. – Vol. 418. – P. 116-564. DOI: [10.1016/j.cma.2023.116564](https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.116564).
18. Корнилова Н.В., Трубаев П.А. Разработка методики теплотехнических расчетов по приведённым характеристикам RDF-топлив // Энергетические системы. – 2018. – № 1. – С. 214-223. EDN: [CVELZB](https://edn.ru/CVELZB).

## References

1. Alfarawi, S. S., El-Sawi, A., & Omar, H. (2021). Exploring discontinuous meshing for cfd modelling of counter flow heat exchanger. *Journal of Advanced Research in Numerical Heat Transfer*, 5, 26-34.
2. Charlesworth, D. J. (2004). *Solution of the incompressible Navier-Stokes equations on unstructured meshes*. University of London, University College London (United Kingdom).
3. Chen, H., Zhou, X., Feng, Z., & Cao, S. J. (2022). Application of polyhedral meshing strategy in indoor environment simulation: Model accuracy and computing time. *Indoor and Built Environment*, 31(3), 719-731. <https://doi.org/10.1177/1420326X211027620>.
4. El-Emam, M. A., Zhou, L., Shi, W., Han, C., Bai, L., & Agarwal, R. (2021). Theories and applications of CFD-DEM coupling approach for granular flow: A review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28, 4979–5020. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09568-9>.
5. Massey, B. S., & Ward-Smith, J. (2006). *Mechanics of fluids* (8th ed.). Taylor & Francis.
6. Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The finite volume method* (2nd ed.). Longman Scientific & Technical.
7. Donea, J., & Huerta, A. (2003). *Finite element methods for flow problems*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0470013826>.
8. Singh, R. I., Brink, A., & Hupa, M. (2013). CFD modeling to study fluidized bed combustion and gasification. *Applied thermal engineering*, 52(2), 585-614. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.12.017>.
9. Roache, P. J. (1998). Fundamentals of computational fluid dynamics. *Hermosa Publishers*.



10. Shrivastava, D. (2021). CFD Modelling of Underground Coal Gasification using ANSYS Fluent Simulator. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 12(7), 505–519. <https://doi.org/10.14299/ijser.2021.07.02>.
11. Kuznetsov, V. A. & Trubaev, P. A. Resources and problems of the mathematical simulating thermo-technological processes. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, 1066, 012024. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1066/1/012024>.
12. Visconcini, A. R., Andrade, C. M. G., & de Souza Costa, A. M. (2021). Fluid flow simulation of industrial fixed bed mixed-flow grain dryer using k- $\omega$  SST turbulence model. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(2), 226-230. <https://doi.org/10.25165/ijabe.20211402.5321>.
13. Trubaev, P. A., Shchekin, I. I., Kornilova, N. V., & Grishko B. M. (2016). Osobennosti szhiganiia otkhodov s polucheniem energii [Peculiarities of waste incineration with energy recovery]. . *Naukoemkie tekhnologii i innovatsii* (pp. 105-109). Izd-vo BGTU. [In Russian]
14. Ahmed A.(2024). Selection of a fixed bed solid fuel combustion model in ANSYS FLUENT // *Energy Systems*, 2, 19-34. <https://doi.org/10.34031/es.2024.2.002>.
15. Kargar, S. M., Parmiggiani, A., Baggetta, M., Ottonello, E., Hao, G., & Berselli, G. (2024). Optimization of a tetrahedron compliant spherical joint via computer-aided engineering tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 132(3), 1151-1162. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13314-3>.
16. Ruggiero, A., D'Amato, R., & Affatato, S. (2019). Comparison of meshing strategies in THR finite element modelling. *Materials*, 12(14), 2332. <https://doi.org/10.3390/ma12142332>.
17. Li, X., Yang, M., Bi, L., Xu, R., Luo, C., Yuan, S., Yuan, X., & Tang, Z. (2024). An efficient Cartesian mesh generation strategy for complex geometries. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 418, 116564. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.116564>.
18. Kornilova, N. V., & Trubaev, P. A. (2019). Method development for the ther-motechnical calculations utilizing reduced characteristics of the RDF fuels. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng*, 552, 012029. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/552/1/012029>.

### Сведения об авторах

**Ахмед Ашраф Абдулла Ахмед**, преподаватель кафедры теплоэнергетики инженерного колледжа Тикритского университета, Ирак, аспирант кафедры Энергетики теплотехнологии БГТУ им. В.Г. Шухова. E-mail: [ashraf.a.ahmed@tu.edu.iq](mailto:ashraf.a.ahmed@tu.edu.iq). ORCID [0009-0008-4592-9071](https://orcid.org/0009-0008-4592-9071).

### Authors about

**Ashraf Ahmed**, teacher of Mechanical Engineering Department, College of Engineering, Tikrit University, postgraduate student of the Department of Energy Engineering of Heat Technologie, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia. E-mail: [ashraf.a.ahmed@tu.edu.iq](mailto:ashraf.a.ahmed@tu.edu.iq). ORCID [0009-0008-4592-9071](https://orcid.org/0009-0008-4592-9071).

