

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва»

Институт двигателей и энергетических установок
Кафедра теплотехники и тепловых двигателей

Численное моделирование тепловых процессов в теплообменных аппаратах

САМАРА 2017

УДК 533

ББК 31.31

Составители: Д.А. Угланов

Численное моделирование тепловых процессов в теплообменных аппаратах: Методические указания к лабораторной работе / Самарский университет; Д.А. Угланов; Самара, 2017. – 34 с.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по следующим направлениям подготовки бакалавра: 13.03.03 – Энергетическое машиностроение, 15.03.04 - Автоматизация технологических процессов и производств. 15.03.05 - Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 24.03.05 – Двигатели летательных аппаратов; по специальности 24.05.02 – Проектирование авиационных двигателей и энергетических установок, по направлению подготовки магистров 24.04.05 - Двигатели летательных аппаратов, а также может быть полезно слушателям курсов, аспирантам и специалистам. Разработано на кафедре теплотехники и тепловых двигателей.

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского университета.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. ПОДГОТОВКА РАСЧЁТНОЙ МОДЕЛИ	5
1.1 Запуск программной оболочки ANSYS Workbench	5
1.2 Построение конечно-элементной сетки.....	8
Глава 2. МЕТОДИКА РАСЧЁТА СЕКЦИИ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ANSYS FLUENT.....	11
2.1 Запуск программы ANSYS Fluent и ее особенности	11
2.2 Настройка параметров расчета	14
2.3 Задание граничных условий	19
2.4 Обработка результатов расчета	29
Заключение.....	33
Список литературы.....	34

ВВЕДЕНИЕ

Теплообменными аппаратами (теплообменниками) называются устройства, предназначенные для обмена теплотой между греющей и обогреваемой рабочими средами. Последние принято называть теплоносителями.

Необходимость передачи теплоты от одного теплоносителя к другому возникает во многих отраслях техники: энергетике, химической, металлургической, нефтяной, пищевой и других отраслях промышленности.

В котельном агрегате теплота, выделяющаяся при горении топлива, передается воде и пару, т. е. котельный агрегат представляет собой совокупность теплообменных аппаратов. В атомной силовой установке выделяемая ядерным реактором теплота воспринимается первичным теплоносителем, который сам становится радио-активным. В двигателе используется вторичный теплоноситель, который получает тепло от первичного в теплообменном аппарате. Процесс регенерации в газотурбинной установке осуществляется путем передачи теплоты в теплообменнике от отработанных продуктов сгорания сжатому воздуху.

Широкое распространение теплообменных аппаратов обусловило многообразие их конструктивного оформления.

Тепловые процессы, происходящие в теплообменных аппаратах, могут быть самыми разнообразными: нагрев, охлаждение, испарение, кипение, конденсация, плавление, затвердевание и более сложные процессы, являющиеся комбинацией перечисленных. В процессе теплообмена может участвовать несколько тепло-носителей: теплота от одного из них может передаваться нескольким и от нескольких — одному.

Глава 1. ПОДГОТОВКА РАСЧЁТНОЙ МОДЕЛИ

1.1 Запуск программной оболочки ANSYS Workbench

Расчет производится на основе программной оболочки ANSYS Workbench 14.5.

Сначала необходимо запустить ANSYS Workbench: Пуск→Все программы→ANSYS 14.5→Workbench 14.5. Откроется рабочее окно программы (рисунок 2.1).

В качестве проекта нужно выбрать Fluid Flow (Fluent) (Рисунок 1.1).

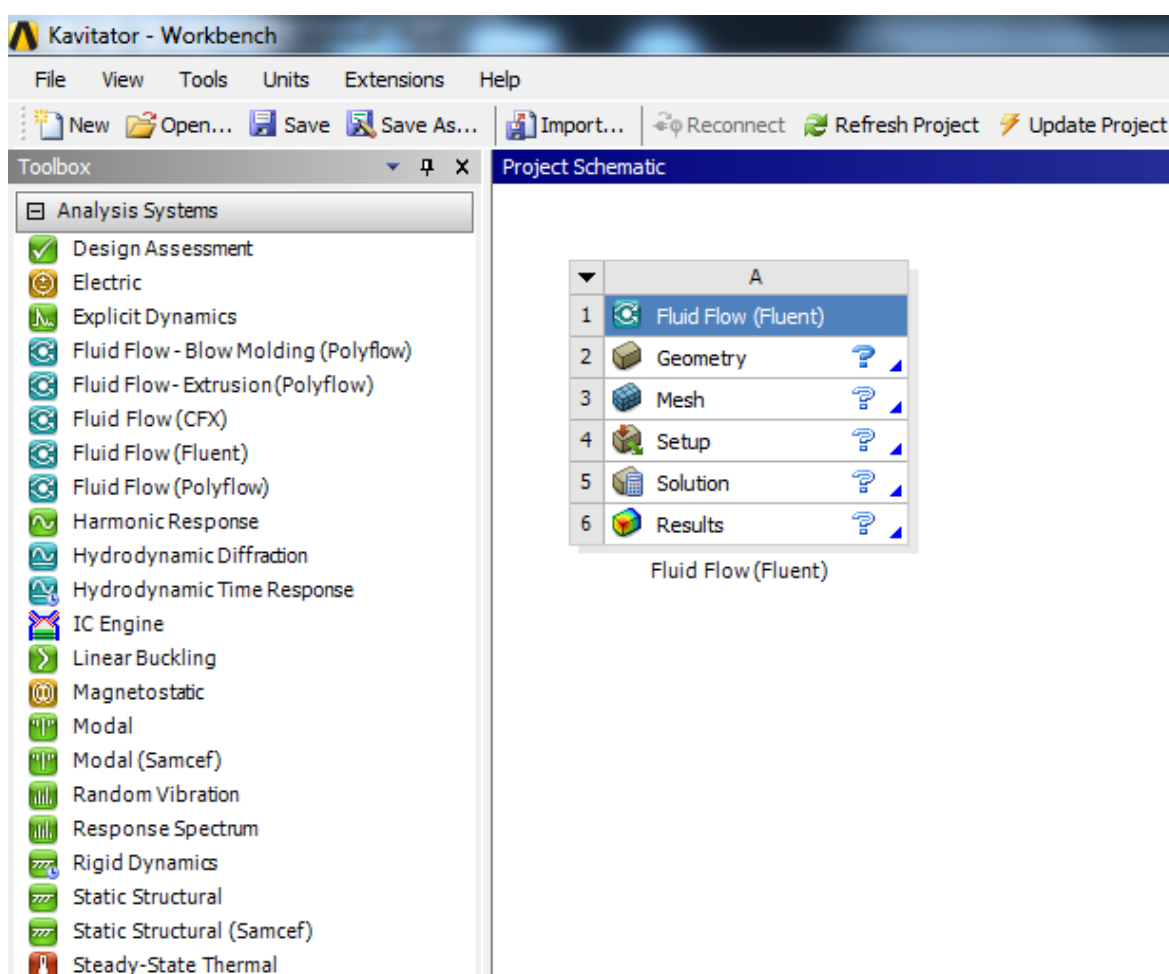


Рисунок 1.1 – Внешний вид рабочего окна Workbench и схемы расчета Fluid Flow (Fluent)

Для импорта геометрической модели нужно зайти в модуль Geometry.

Программа предложит выбрать единицу измерения. Необходимо выбрать миллиметры (Рисунок 1.2).

После этого загружается геометрическая модель проточной части теплогенератора (File→Import External Geometry File). На дереве построения появится значок Import. Нажмите на него ПКМ и выберите Generate. После этого модель должна визуализироваться в окне Graphics (рисунок 1.3).

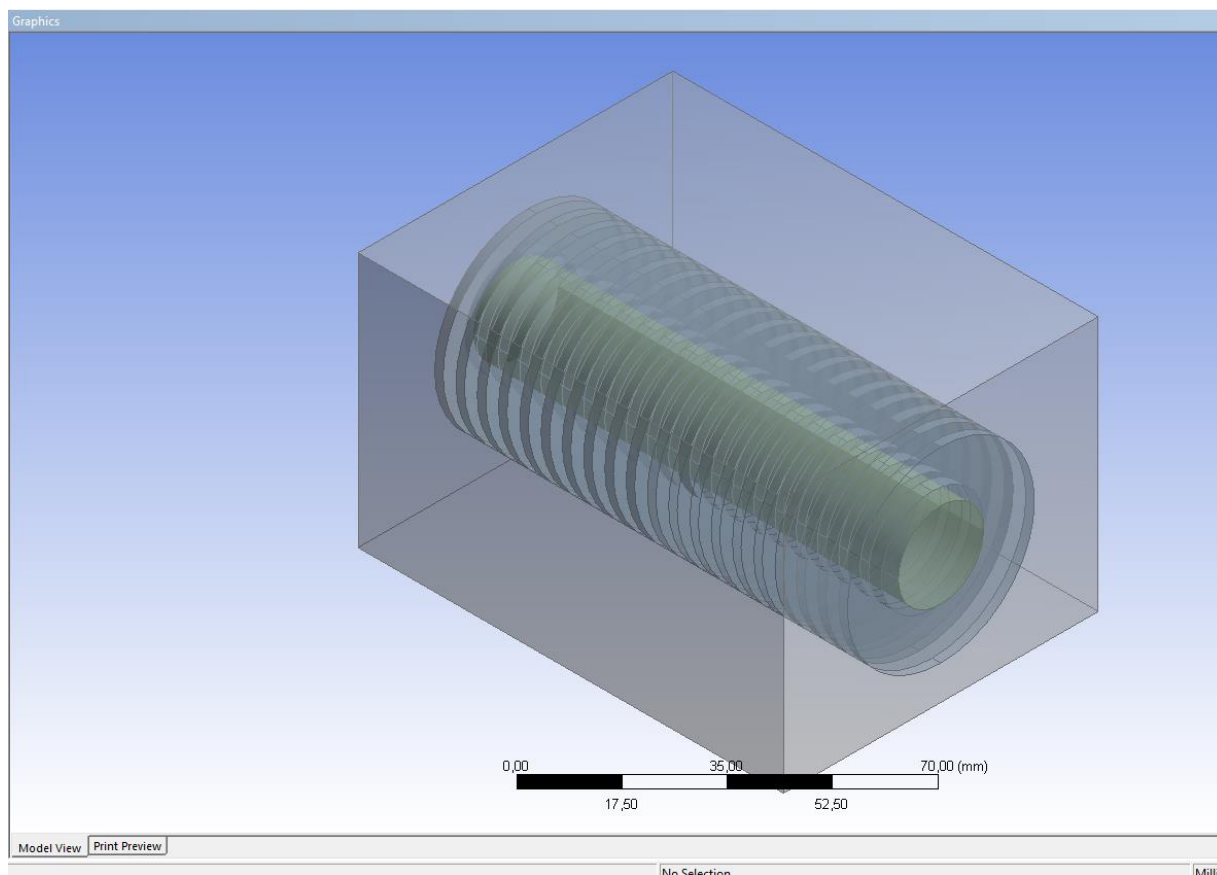


Рисунок 1.3 - Внешний вид секции теплообменного аппарата

Расчётная модель представляет собой секцию теплообменного аппарата. Теплообменный аппарат состоит из трубок с оребрением, внутри которых течёт вода. Снаружи оребренная поверхность труб обдувается горячим воздухом, тепло которого передаётся через стальную трубу холодной воде. Расчётную модель необходимо разделить на 3 основные части: газовый тракт (gas), труба (tube) и водяная полость (water). Для этого в дереве построения необходимо открыть раздел Parts, выделить тело и нажав правую клавишу в появившемся окне выбрать Rename (рисунок 1.4).

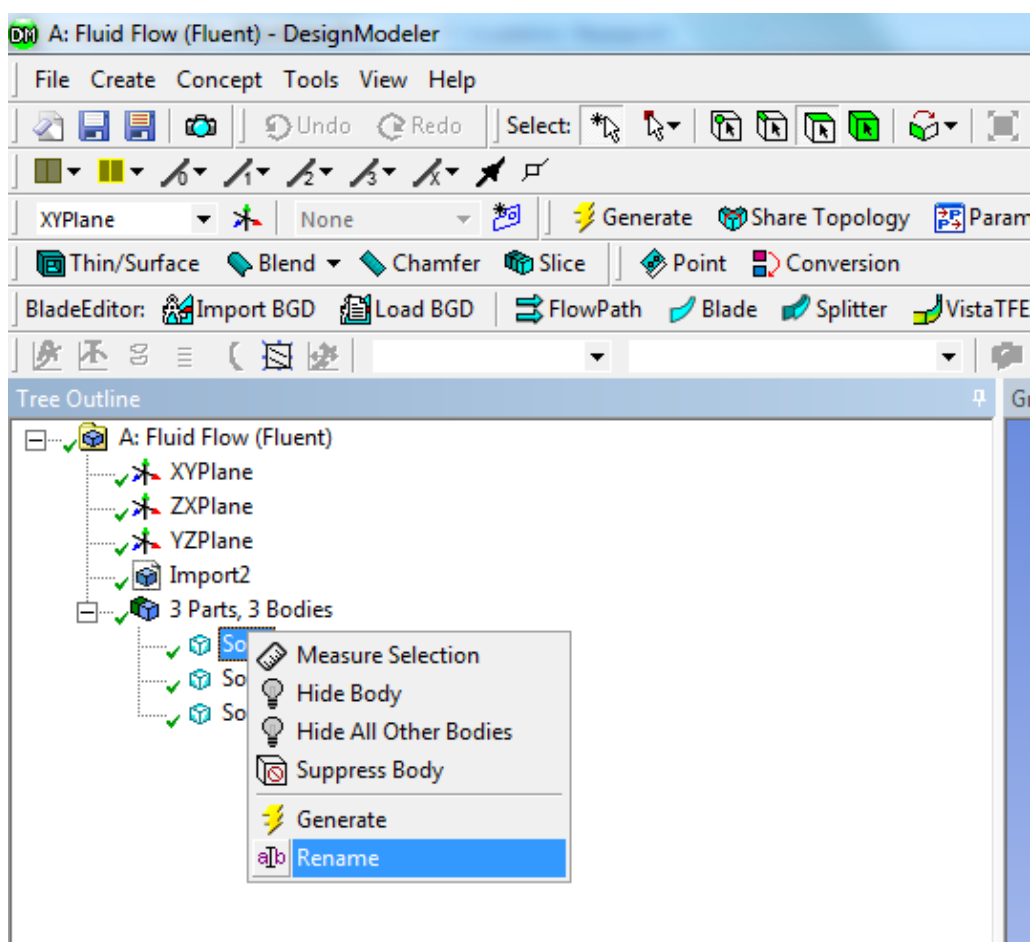


Рисунок 1.4 – Переименование основных частей модели

После импорта исходной модели по умолчанию все 3 основные части являются твёрдыми телами. Для газового (gas) и водяного (water) трактов необходимо изменить тип тела с твёрдого на жидкий (fluid) (рисунок 1.5). Для того чтобы появилось меню Details of Body необходимо выбрать тело во вкладке Parts как на предыдущем шаге.

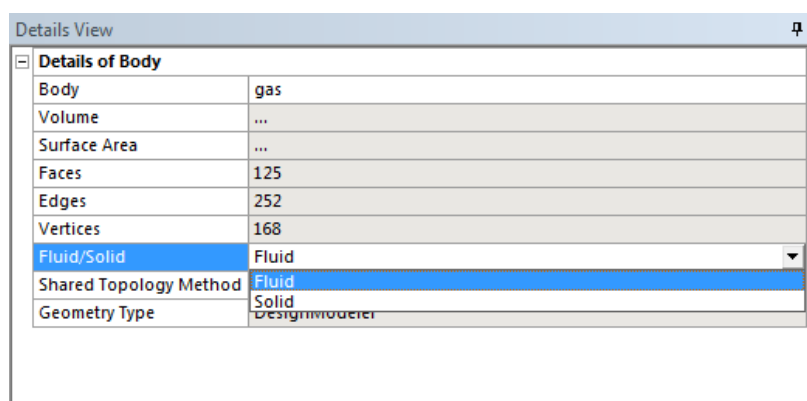


Рисунок 1.5 – Изменение типа тела

После этого можно закрыть экран Design Modeler.

1.2 Построение конечно-элементной сетки

Построение сетки детали производится в модуле Meshing. Модель теплообменника загрузится автоматически (рисунок 1.6).

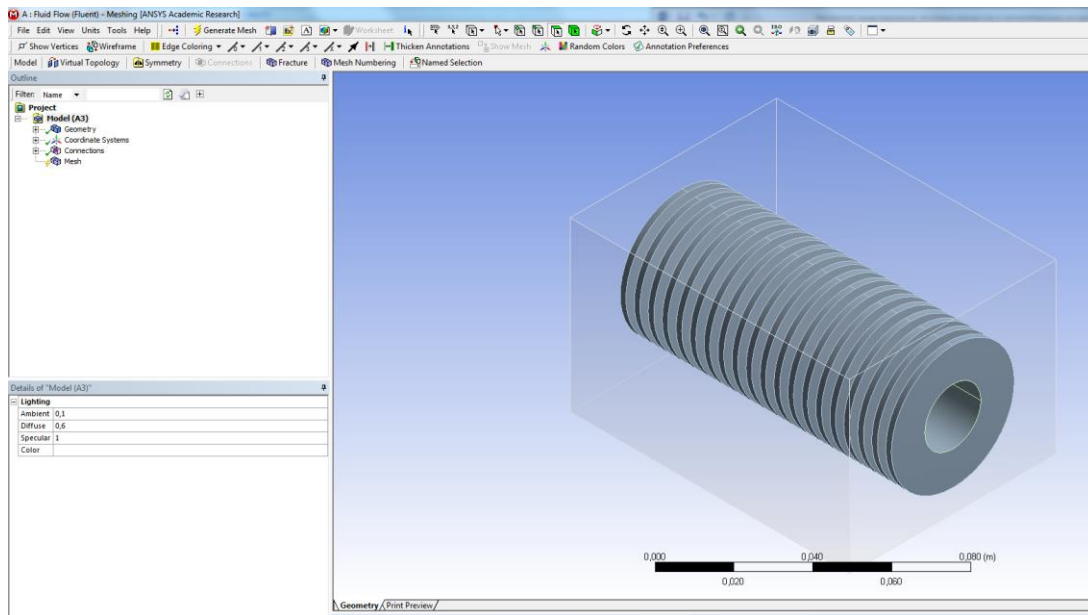


Рисунок 1.6 – Рабочее окно модуля Meshing и внешний вид загруженной геометрической модели секции теплообменника.

Для корректного расчёта сетку у оребренной поверхности, самой трубы и водяного тракта необходимо сделать мельче. Для этого в дереве построения необходимо выбрать вкладку Mesh и нажать правую кнопку. В появившемся окне необходимо выбрать Insert → Sizing (Рисунок 1.7).

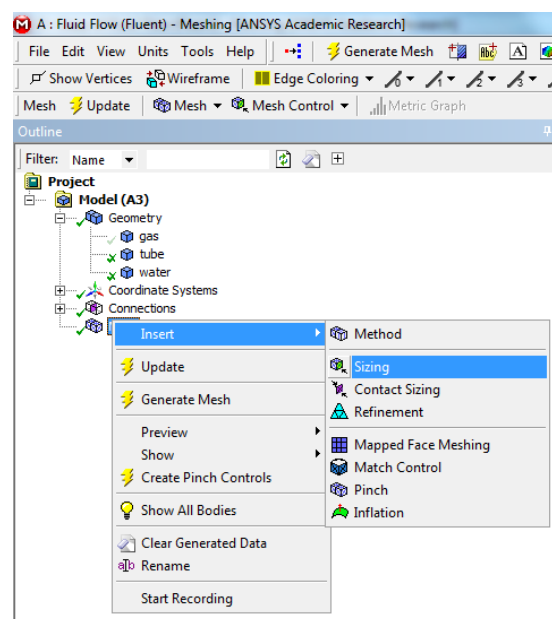


Рисунок 1.7 – Меню настройки размера сетки Sizing

Размер элемента (Element Size) на поверхности рёбер, соприкасающихся с газом и тела самой трубы равен 0,5мм. Размер элемента для водяной полости – 1 мм.

После этого необходимо нажать правой кнопкой мыши на Mesh и выбрать Update. Программа начнет процесс разбиения объемов конечно-элементной сеткой. После его окончания модель будет выглядеть следующим образом (Рисунок 1.8):

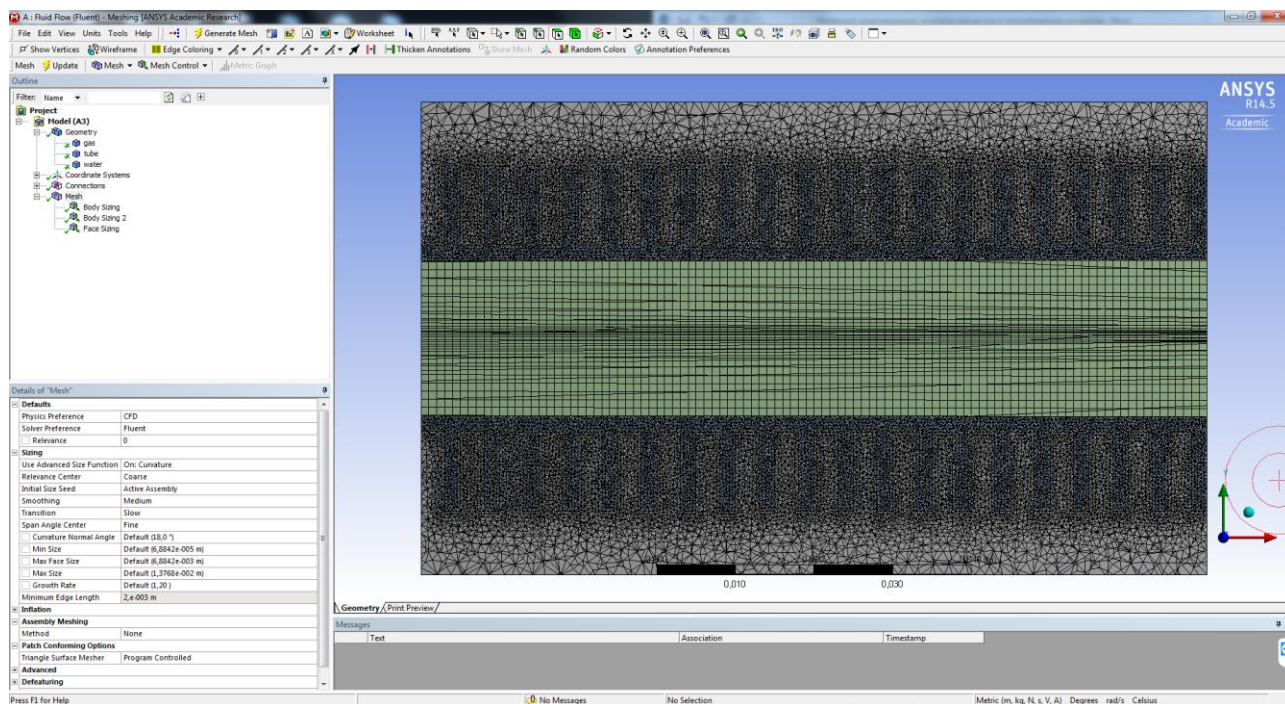


Рисунок 1.8 - Внешний вид построенной сетки

Теперь нужно обозначить поверхности для граничных условий входа и выхода воды и газа. Также для дальнейшей настройки процесса передачи тепла от газа к воде через трубу необходимо отдельно обозначить поверхности соприкасания газа и ребренной трубы, внутренней поверхности трубы и воды (всего 4 поверхности). Для этого надо выделить необходимую поверхность, нажать ПКМ и выбрать пункт Named Selection. Откроется диалоговое окно (рисунок 1.9). Направление движения воды совпадает с осью X, направление движения газа с осью Y. Результат настройки выбора поверхностей представлен на рисунке 1.10. В дереве построения указаны все поверхности.

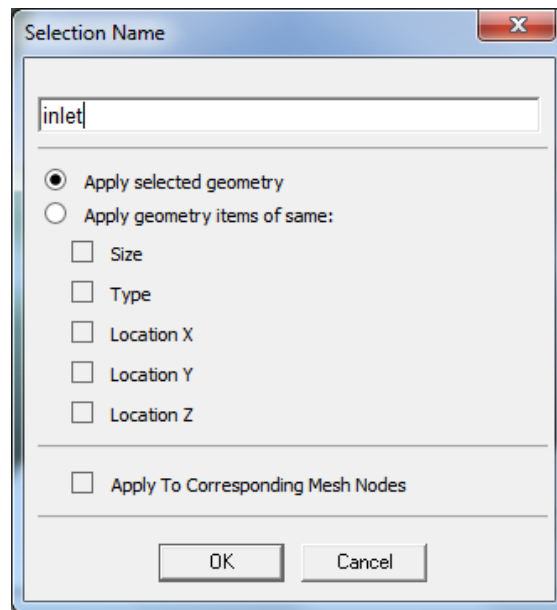


Рисунок 1.9 – Внешний вид окна выбора имени поверхности

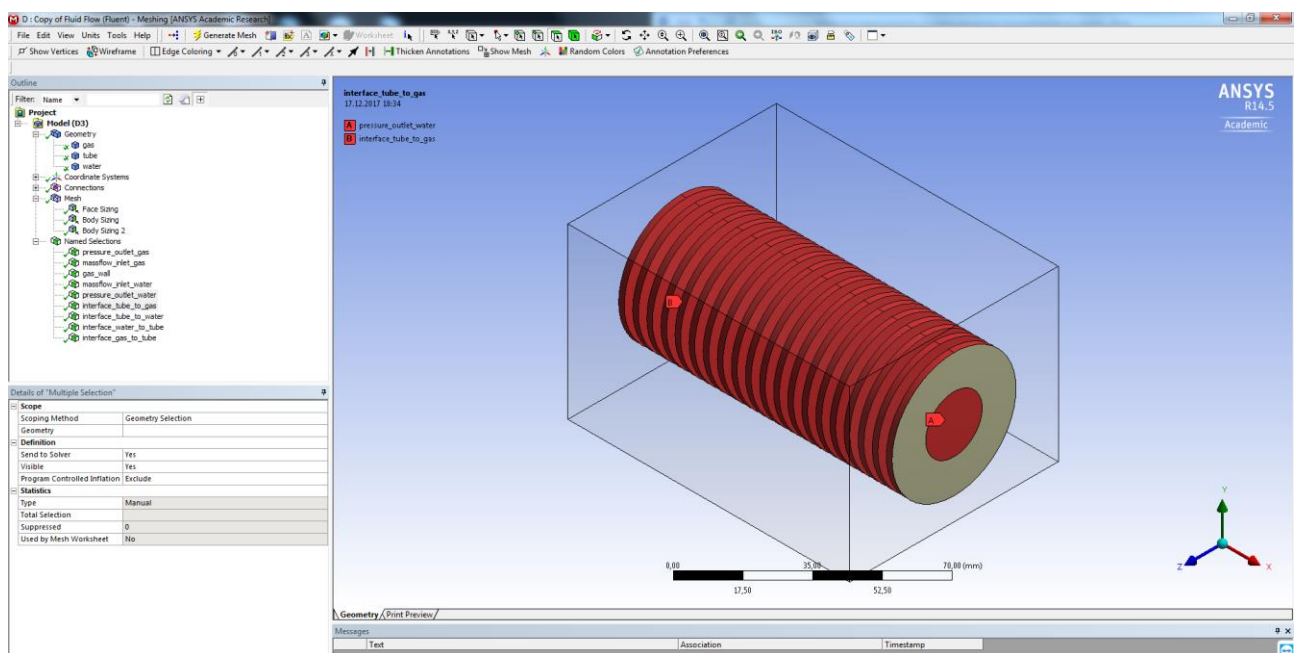


Рисунок 1.10 – Внешний вид окна выбора имени поверхности

После этого модуль Meshing можно закрыть.

Глава 2. МЕТОДИКА РАСЧЁТА СЕКЦИИ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ANSYS FLUENT

2.1 Запуск программы ANSYS Fluent и ее особенности

Дальнейшими действиями с расчетной моделью, которые производятся в программе ANSYS Fluent, являются задание граничных условий, настройка параметров решателя, выполнение расчетов и обработка результатов.

Чтобы запустить программу, нужно в среде ANSYS Workbench зайти в модуль Setup. Откроется диалоговое окно запуска ANSYS Fluent (Рисунок 2.1).

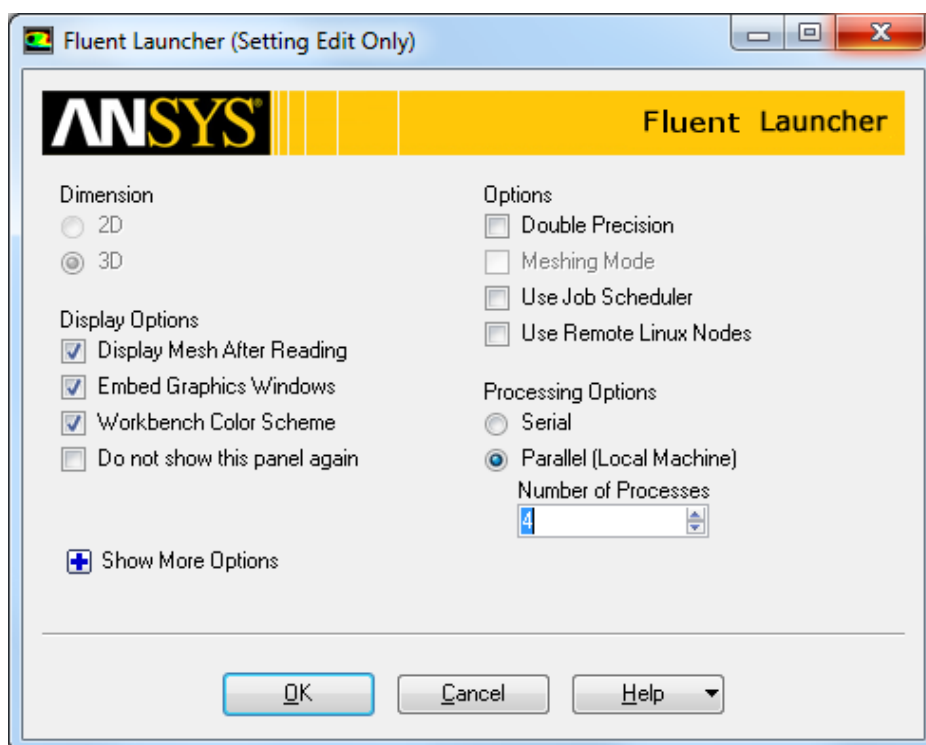


Рисунок 2.1 – Меню запуска программы ANSYS Fluent (Fluent Launcher)

В рассматриваемом случае задача является трехмерной. После выбора нужно нажать кнопку OK. В результате на экране компьютера появляется рабочее окно программы ANSYS Fluent (рисунок 2.2).

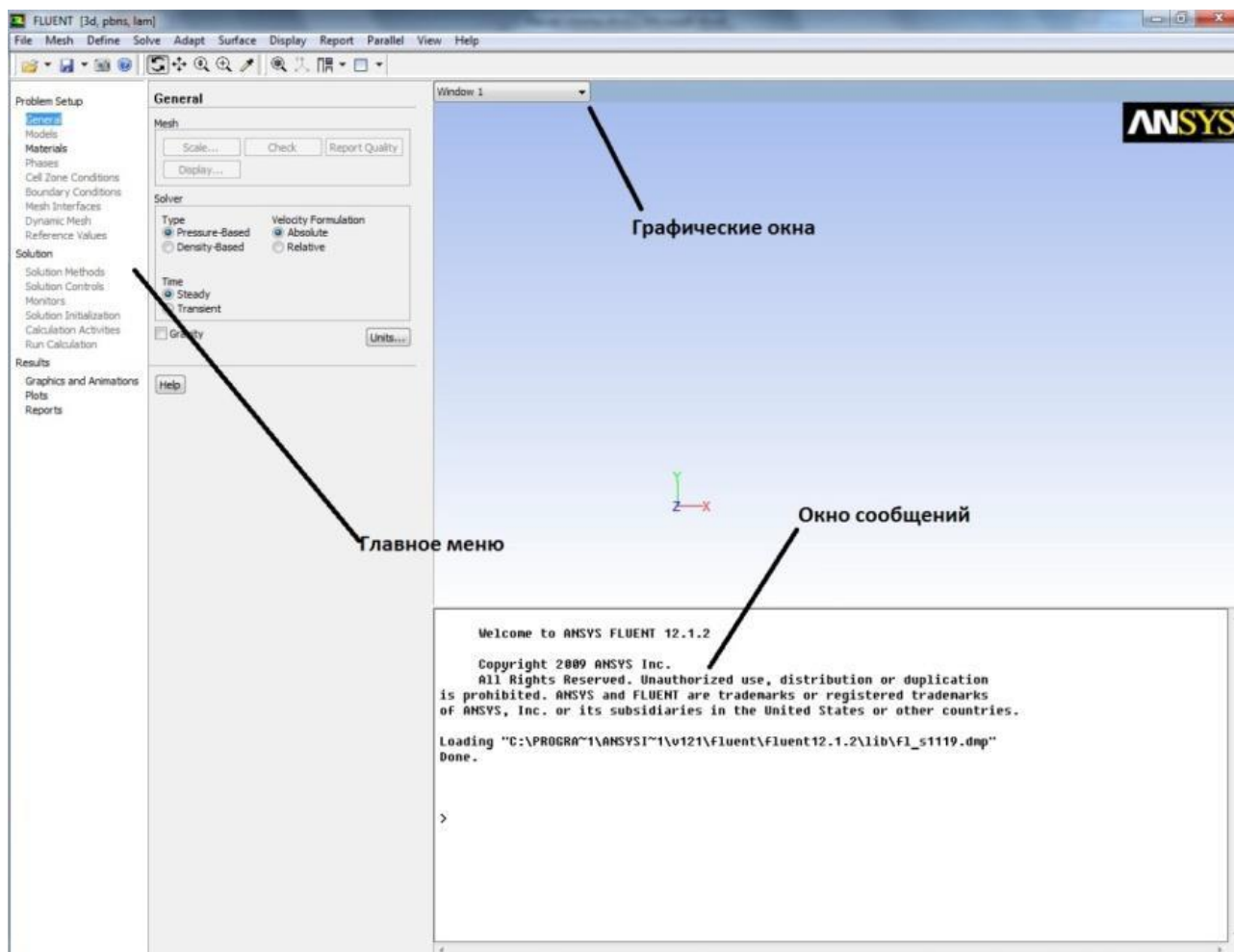


Рисунок 2.2 – Рабочее окно программы ANSYS Fluent

Окно программы достаточно простое и состоит из трех основных частей:

- главного меню, через которое осуществляется доступ ко всем командам и меню программы;
- окна сообщений, где находится командная строка и отображаются результаты выполнения команд;
- графических окон, в которых отображаются результаты расчета и построений.

Загрузка файла сетки

Так как запуск ANSYS Fluent осуществляется из программной среды Workbench, то прикрепленная сетка загрузится автоматически.

Проверка конечно-элементной сетки на наличие ошибок

Проверка расчетной сетки на наличие ошибок осуществляется с помощью команды:

ГМ: Mesh → Check

После ее запуска программа начнет проверять конечно-элементную сетку (рисунок 2.3), а в окне сообщений появятся полные сведения о конечно-элементной сетке. Если будет найдена ошибка, то будет выдано соответствующее сообщение. В этом случае необходимо вернуться в программу Meshing, найти ошибку и исправить ее.

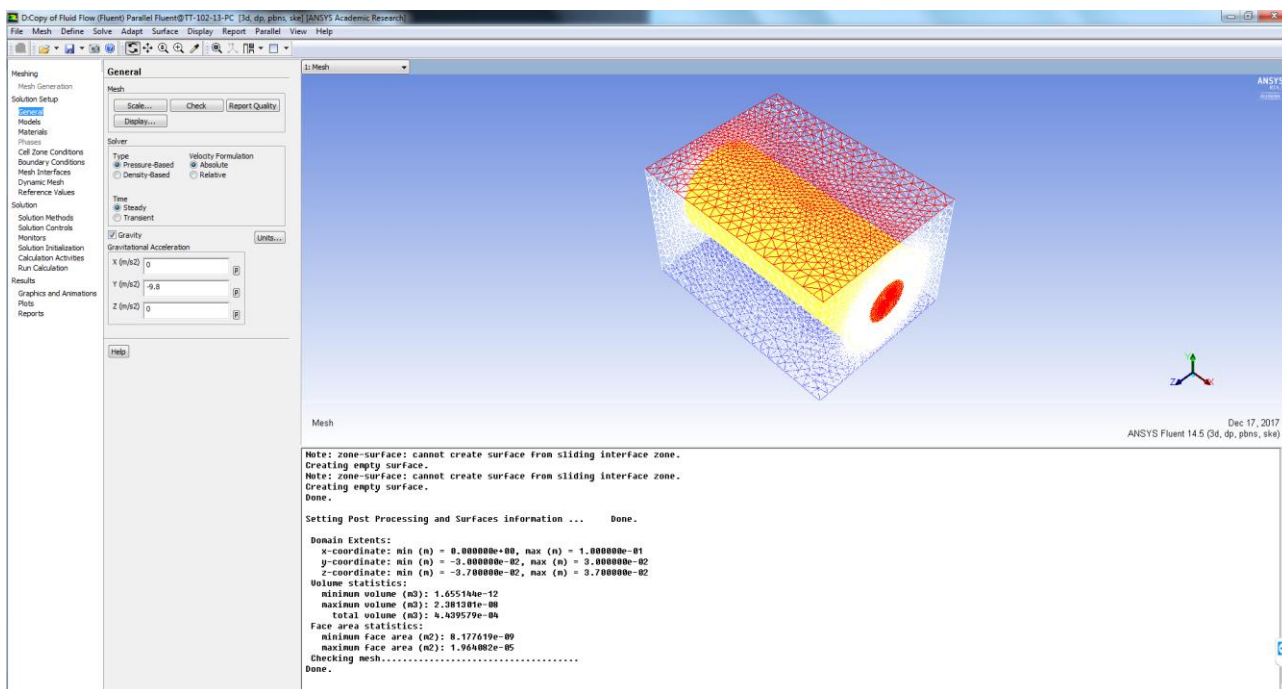


Рисунок 2.3 – Отображение Сетки (Mesh Display)

Масштабирование конечно-элементной сетки

Геометрические размеры в ANSYS Fluent обязательно должны быть указаны в метрах, поэтому в случае создания модели в миллиметрах необходимо произвести её масштабирование. В нашем случае данный шаг не нужен, так как при переносе геометрической модели в ANSYS Design Modeler масштабирование проводится автоматически.

Просмотр конечно-элементной сетки

Просмотреть конечно-элементную сетку загруженной модели можно с помощью команды:

ГМ: Display→ Mesh

В появившемся меню Mesh Display (рисунок 2.14) в окне Surfaces требуется выбрать все поверхности, образующие сеточную модель. Следует обратить

внимание на то, что имена в списке совпадают с именами поверхностей, заданных в Meshing. Для просмотра выбранных элементов сетки нужно нажать кнопку Display.

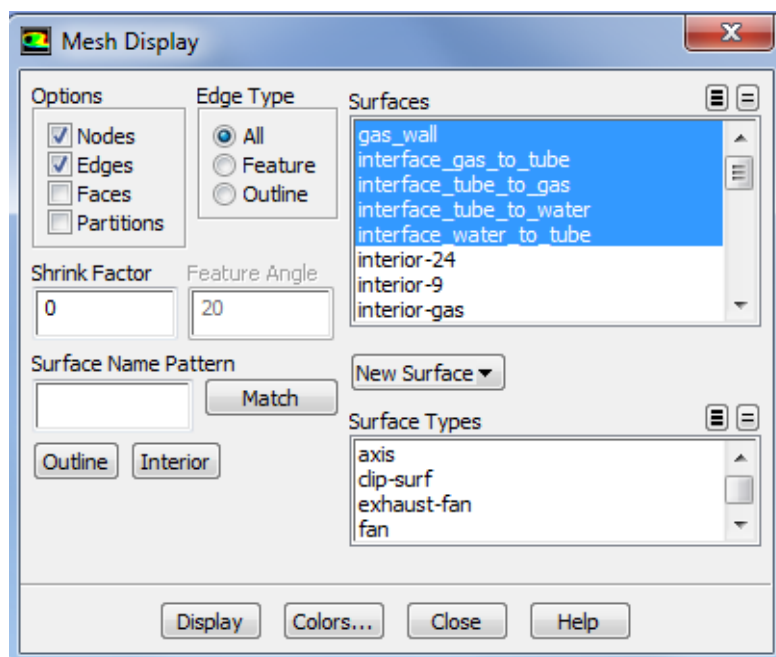


Рисунок 2.4 – Отображение сетки (Mesh Display)

В результате выполнения команды появится графическое окно, в котором будет изображена расчетная сетка или выбранные элементы модели.

Если в окне Surfaces снять выделение с пункта default – interior, то в окне можно будет увидеть только контур модели, без расчетной сетки.

2.2 Настройка параметров расчета

Задание опций решателя

В качестве первого действия при описании расчетной модели следует выбрать решатель, с помощью которого будет проводиться решение, а также определить стационарность или нестационарность задачи. Этот выбор осуществляется в меню Solver:

ГМ: Define

В меню Solver (рисунок 2.5) нужно обратить внимание на следующие моменты. Программа ANSYS Fluent позволяет использовать два алгоритма решений: Pressure Based (алгоритмом установления) или Density Based (алгоритм

расщепления). Первый из них изначально разрабатывался для низкоскоростных потоков, но впоследствии был модифицирован и распространен и на другие течения. Алгоритм установления создавался для расчетов высокоскоростных транс- и сверхзвуковых потоков. Для решения рассматриваемой задачи целесообразно выбрать Pressure Based.

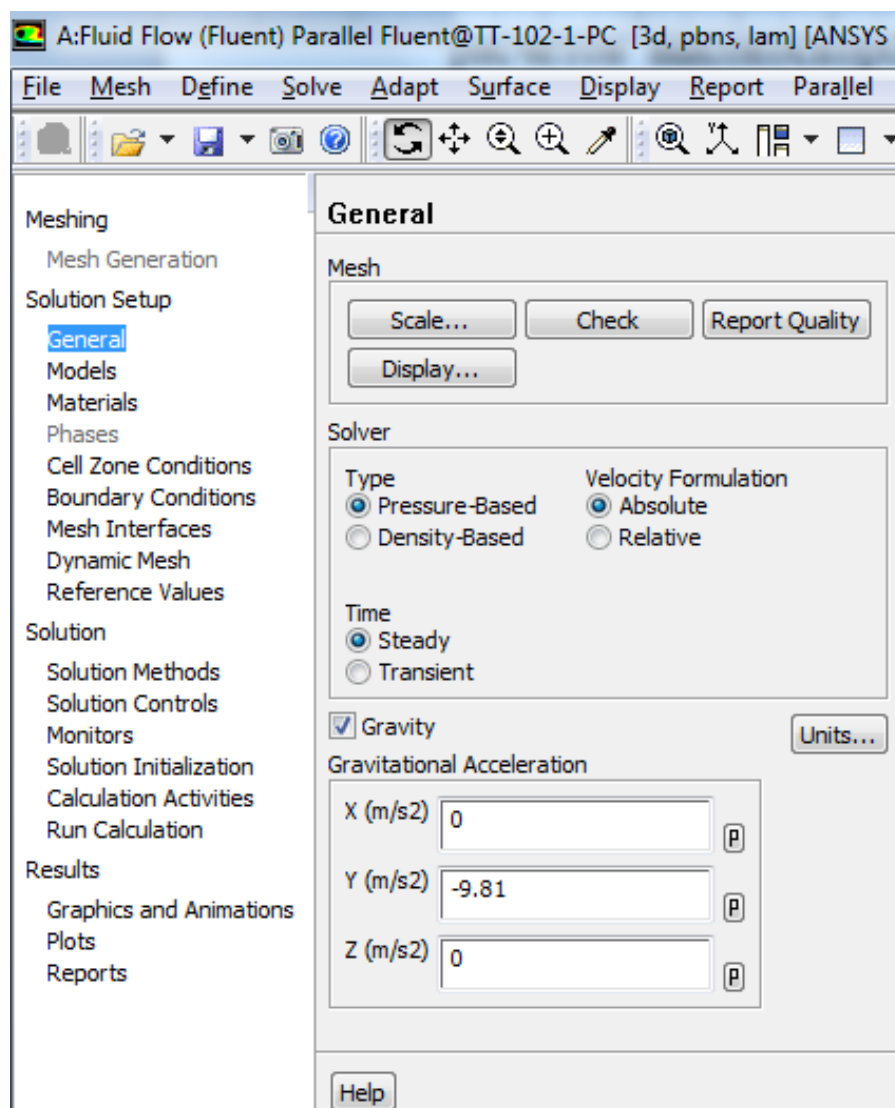


Рисунок 2.5 – Меню настройки решателя (Solver)

В поле Time выбирается, будет ли решение стационарным Steady или нестационарным Transient. То есть, будут ли параметры потока зависеть от времени или нет. Рассматриваемая задача является трехмерной стационарной. Кроме того, в данной задаче необходимо учитывать силу тяжести. Для этого нужно выделить пункт Gravity и указать значение ускорения свободного падения равным $-9,81 \text{ м/с}^2$.

Выбор модели турбулентности

Поток жидкости характеризуется наличием турбулентности – беспорядочного движения вихревых масс. При этом на основное направление скорости накладываются поперечные составляющие, вызывающие сильное перемешивание жидкости/газа. При исследовании течения в канале теплогенератора целесообразно использовать модель турбулентности k-epsilon, поскольку она позволяет получать решения с приемлемой точностью, и для этой модели она хорошо сходится (рисунок 2.6).

ГМ: Define→Models→Viscous.

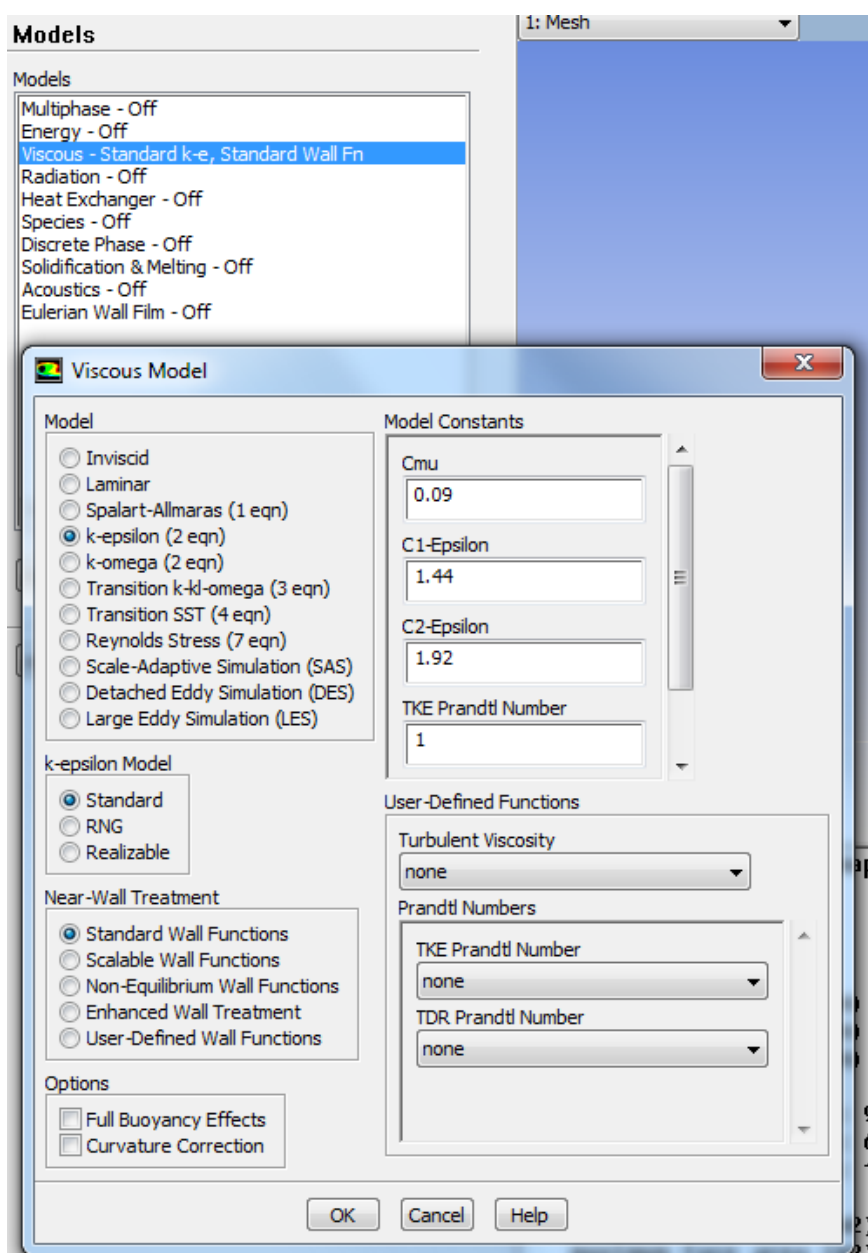


Рисунок 2.6 – Настройка параметров турбулентности (Viscous)

Подключение уравнения энергии

При решении данной задачи нужно обязательно учитывать теплообмен и теплопередачу. Для этого необходимо подключить к решению уравнение энергии с помощью команды:

Define → Models → Energy...

В появившемся окне нужно поставить галочку в строке Energy Equation и нажать ОК (рисунок 2.7).

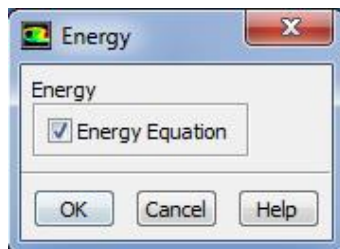


Рисунок 2.7 – Меню включения уравнения энергии (Energy)

Задание свойств рабочего тела и справочного давления

Задание свойств рабочего тела осуществляется в меню Materials (рисунок 2.8), которое вызывается командой:

ГМ: Define→Materials

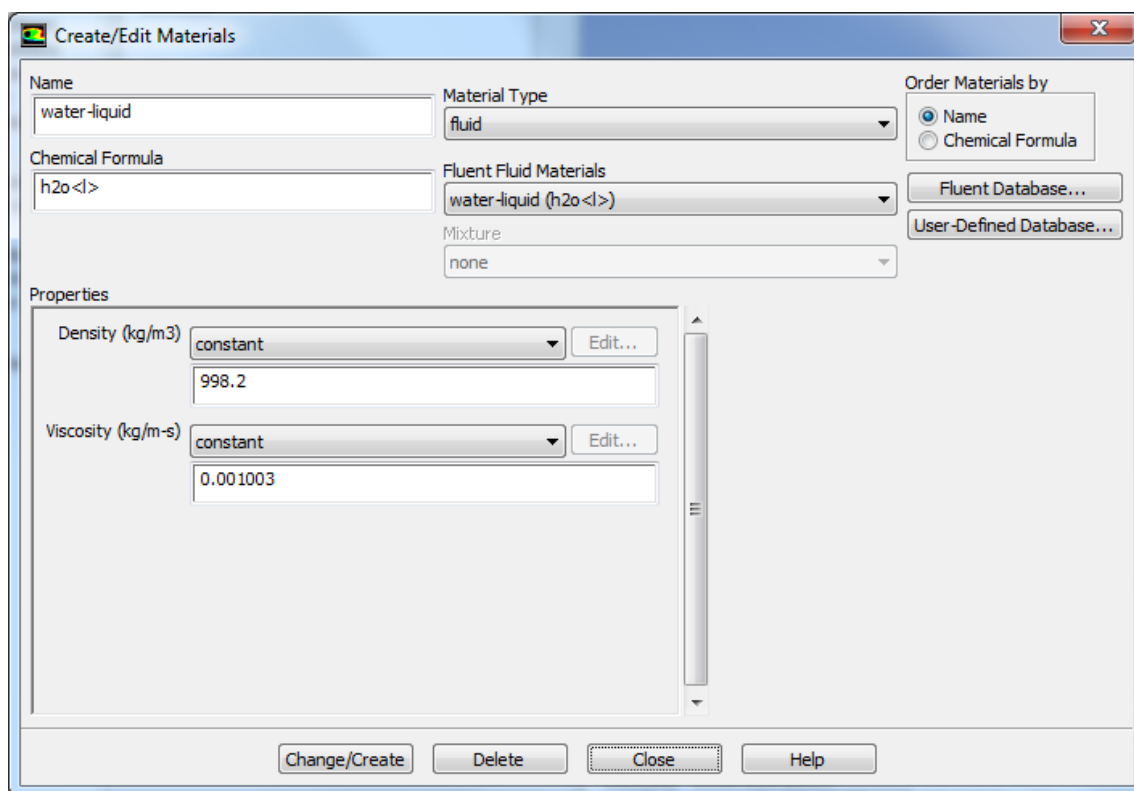


Рисунок 2.8 – Меню материалов (Materials)

В рассматриваемой задаче в качестве рабочего тела используется вода и воздух. Воздух установлен по умолчанию. Для того, чтобы добавить в качестве рабочего тела воду, в меню Materials необходимо нажать кнопку Fluent Data Bases, далее в появившемся списке Fluent Fluid Materials выбрать необходимый материал (water-liquid) из базы.

Особенность программы ANSYS Fluent состоит в том, что давление, получаемое и задаваемое в расчете, является избыточным. То есть для того, чтобы получить истинное значение давления, необходимо прибавить к нему так называемое «справочное давление». По умолчанию в его качестве используется нормальное атмосферное давление – 101325 Па. Если в качестве «справочного давления» принять 0, то результаты расчета и исходные данные будут задаваться в абсолютных значениях. Изменить значение «справочного давления» можно в меню (рисунок 2.9), которое появится в результате выполнения команды:

ГМ: Define→ Operating Conditions

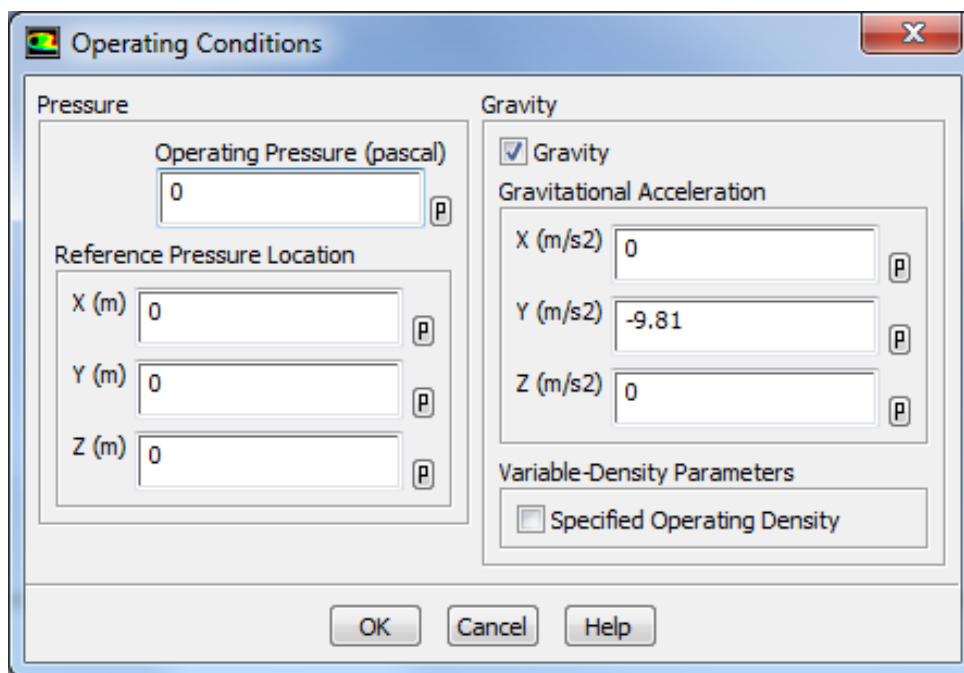


Рисунок 2.9 – Справочное давление (Operating Conditions)

Для упрощения обработки результатов в решаемой задаче целесообразно принять «справочное давление», равное нулю, и ввести его значение в поле Operating pressure.

2.3 Задание граничных условий

Меню задания граничных условий (рисунок 2.10) вызывается командой:

ГМ: Define→ Boundary Conditions

В поле Zone находится список всех граничных условий, определенных в Meshing. Если выбрать имя одного из них, например massflow_inlet_water, то в окне Type будет указан тип граничного условия. В случае необходимости в этом окне тип граничных условий можно поменять. Чтобы приступить к заданию граничных условий, необходимо в окне Zone выбрать нужное граничное условие, убедиться, что в окне Type тип граничного условия указан верно, затем нажать Edit...

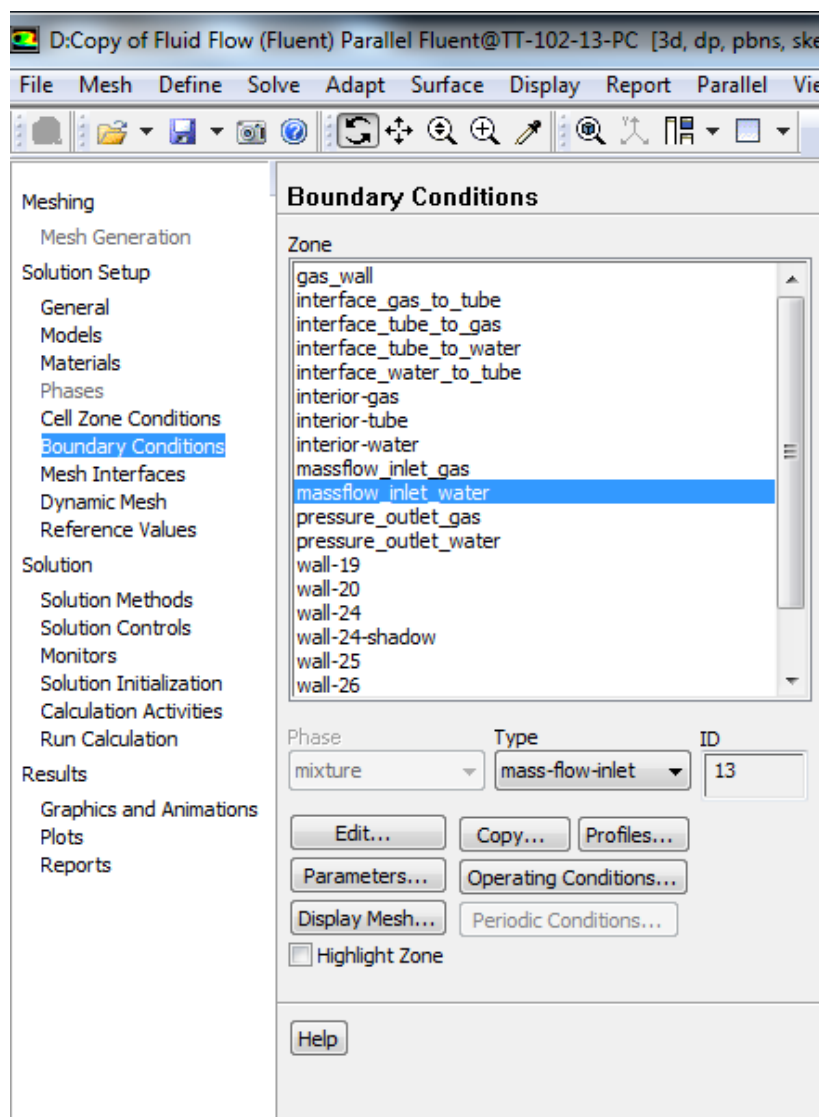


Рисунок 2.10 – Граничные условия (Boundary Conditions)

Название и тип граничного условия представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Граничные условия

№	Название граничного условия	Тип граничного условия (Type)
1	massflow_inlet_gas	pressure-inlet
2	massflow_inlet_water	mass-flow-inlet
3	pressure_outlet_gas	pressure- outlet
4	pressure_outlet_water	pressure- outlet
5	interface_gas_to_tube	interface
6	interface_tube_to_gas	interface
7	interface_tube_to_water	interface
8	interface_water_to_tube	interface

После этого выполняются следующие действия:

Устанавливаются параметры для входного граничного условия massflow_inlet_gas, в соответствии с рисунком 2.11:

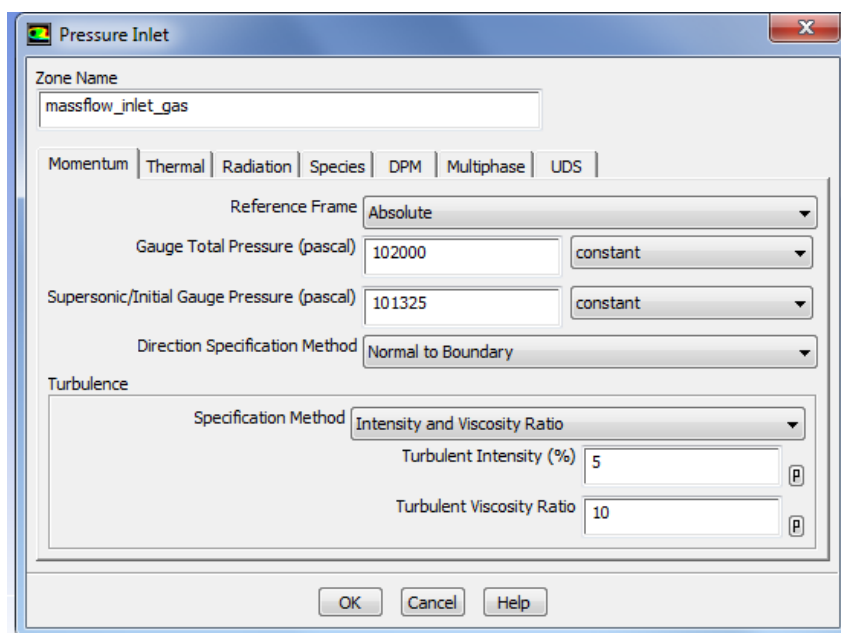


Рисунок 2.11 – Настройка граничных условий для входного сечения газового тракта (massflow_inlet_gas)

Температура газа задаётся в вкладке Thermal и составляет 587⁰K (рисунок 2.12).

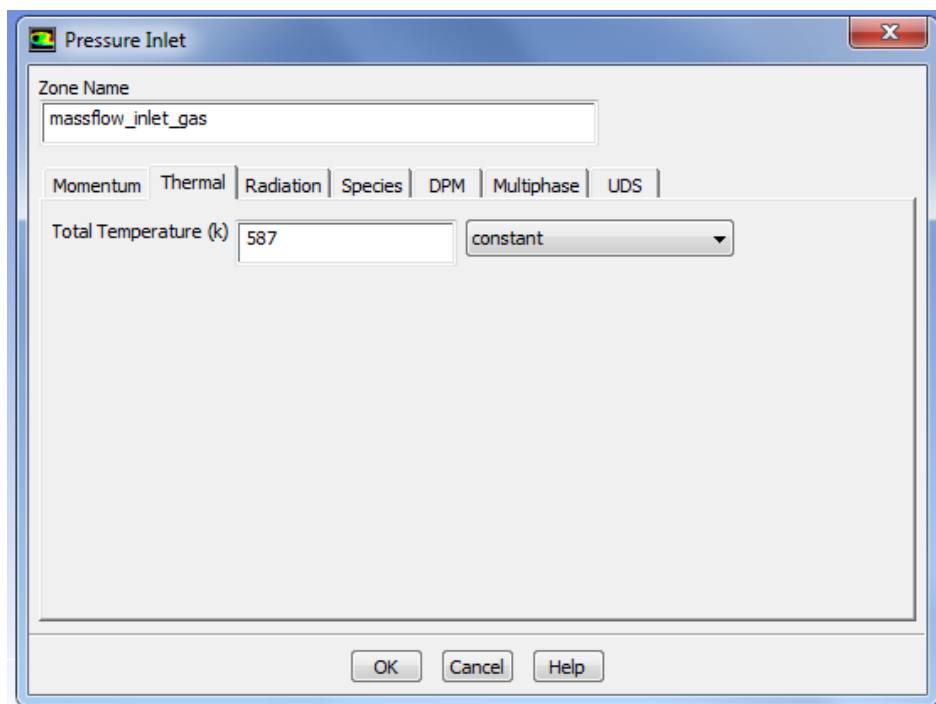


Рисунок 2.12 – Настройка температуры газа на входе

Параметры для выходного граничного условия `pressure_outlet_gas` устанавливаются в соответствии с рисунком 2.13.

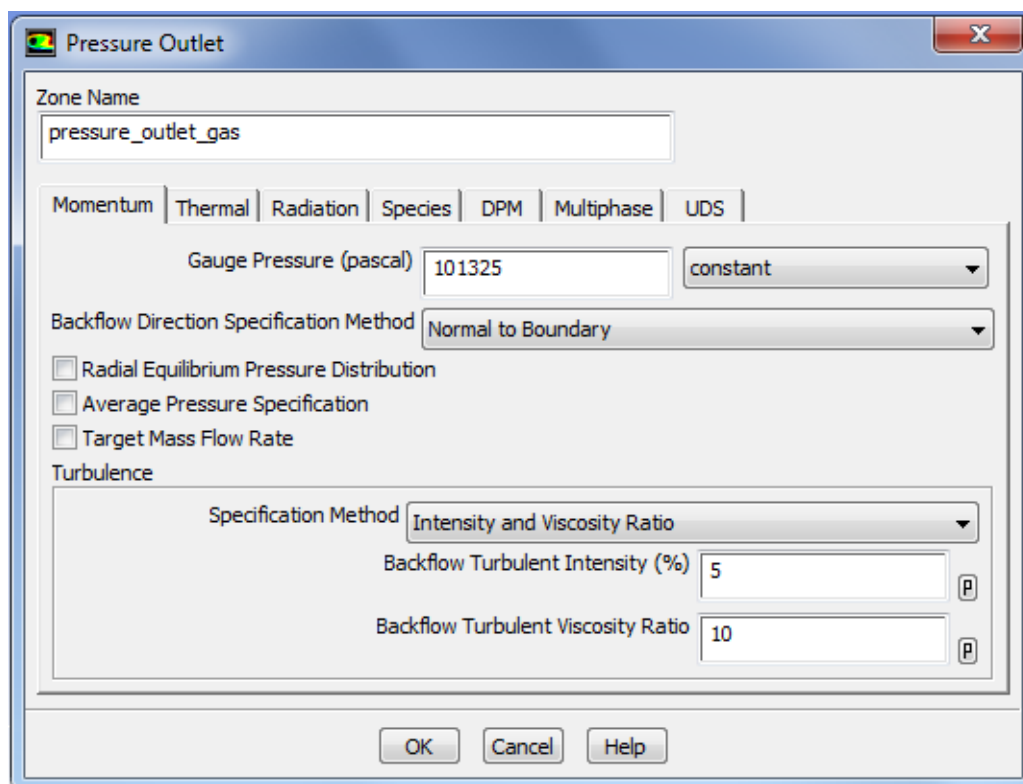


Рисунок 2.13 – Настройка граничных условий для выходного сечения газового тракта (`pressure_outlet_gas`)

Параметры для входного граничного условия `massflow_inlet_water` устанавливаются в соответствии с рисунком 2.14.

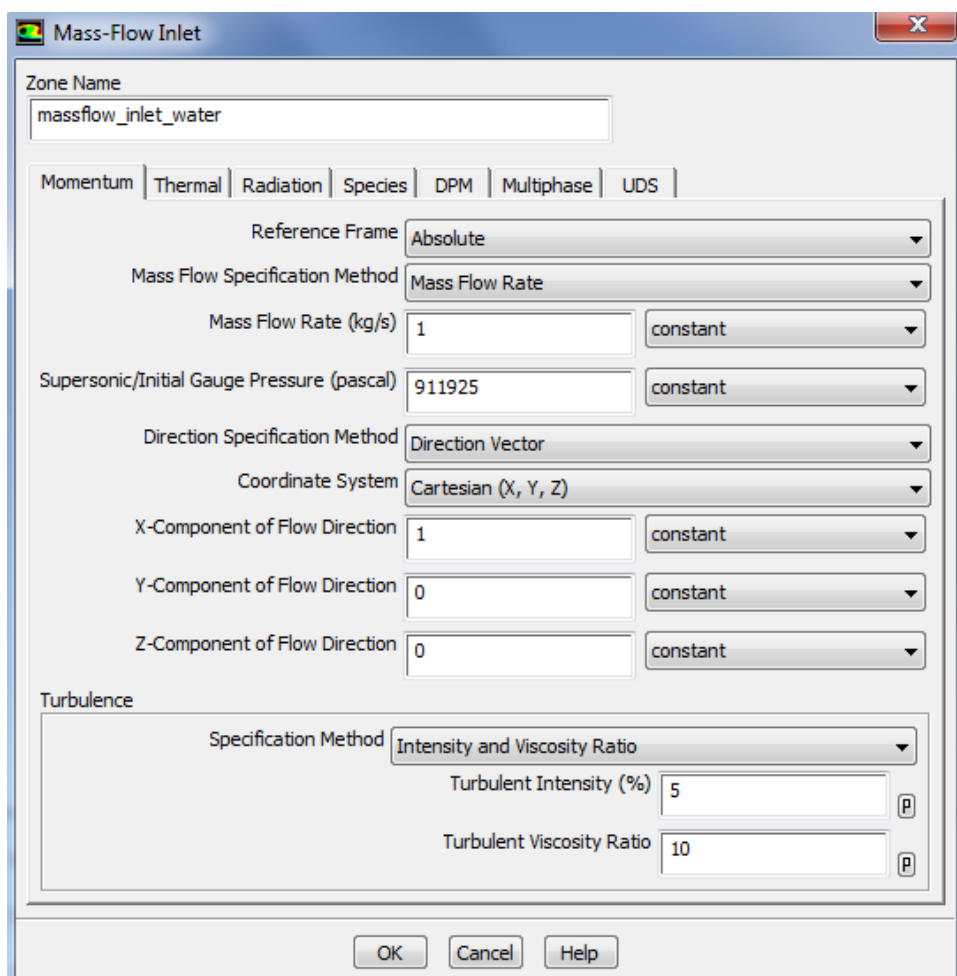


Рисунок 2.14 – Настройка граничных условий для входного сечения
водяного тракта (`massflow_inlet_water`)

Температура газа задаётся в вкладке `Thermal` и составляет 293°K .

Параметры для входного граничного условия `pressure_outlet_water` устанавливаются в соответствии с рисунком 2.15.

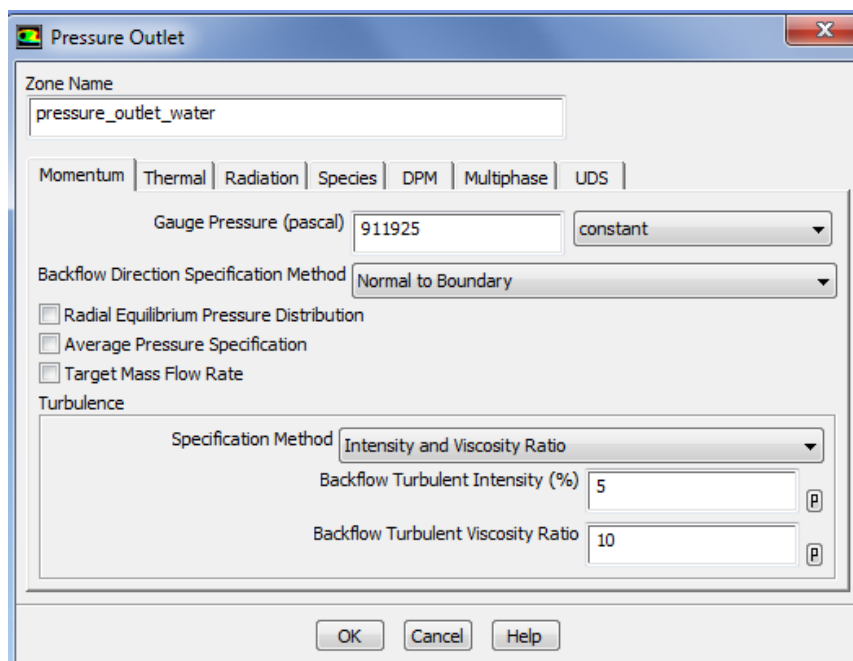


Рисунок 2.15 – Настройка граничных условий для выходного сечения водяного тракта (pressure_outlet_water)

Настройка зон проницаемости между отдельными областями сетки

ANSYS версии 14.5 производит автоматическое создание зон проницаемости, после чего они отображаются в окне Mesh Interfaces (рисунок 2.16):

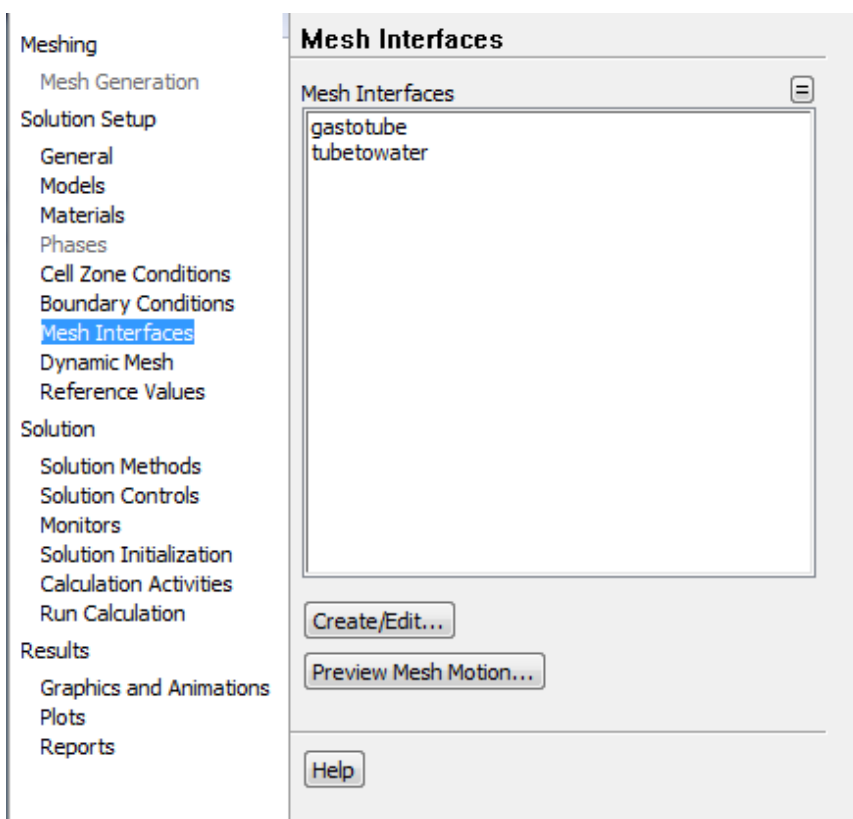


Рисунок 2.16 – Отображение созданных поверхностей

В случае работы в более ранней версии эти зоны необходимо создать. Всего создается 2 зоны проницаемости: от патрубка выхода к улитке и от улитки к трубе.

Для этого нужно в окне Mesh Interfaces нажать Create/Edit. Для создания зоны проницаемости (рисунок 2.17) в графе Mesh interface необходимо указать gastotube, в качестве Interface Zone 1 выбрать interface_gas_to_tube, в качестве Interface Zone 2 - interface_tube_to_gas, после чего нажать ОК. Аналогично создается tubetowater, в качестве Interface Zone 1 - interface_tube_to_water, в качестве Interface Zone 2 - interface_water_to_tube.

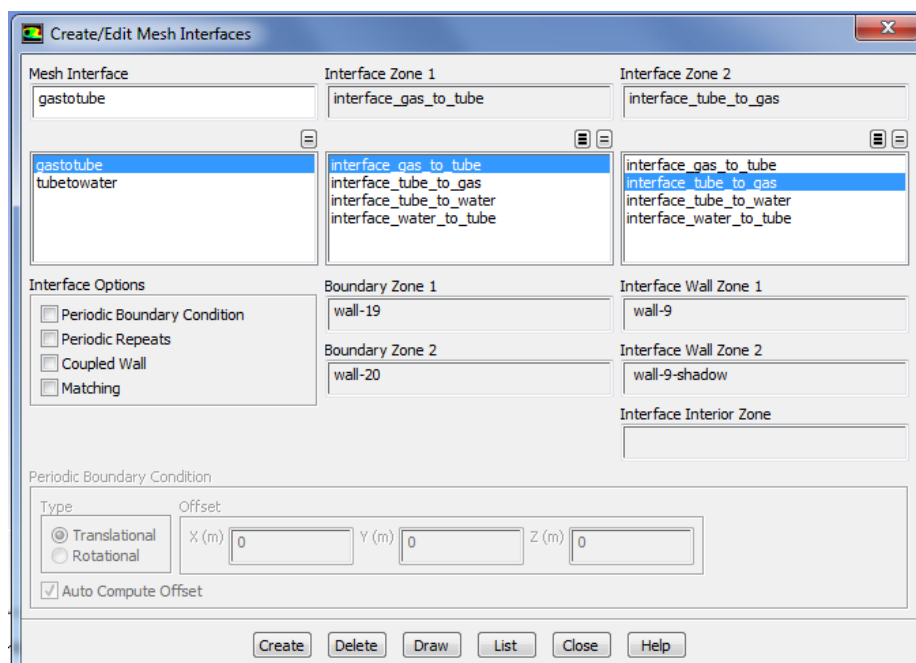


Рисунок 2.17 – Настройка создаваемых зон проницаемости

Настройка процесса решения задачи

Установка параметров расчета

Доступ к меню установки параметров расчета осуществляется с помощью команды:

ГМ: Solve→ Methods

В результате на экране появится меню Solution Methods (рисунок 2.18).

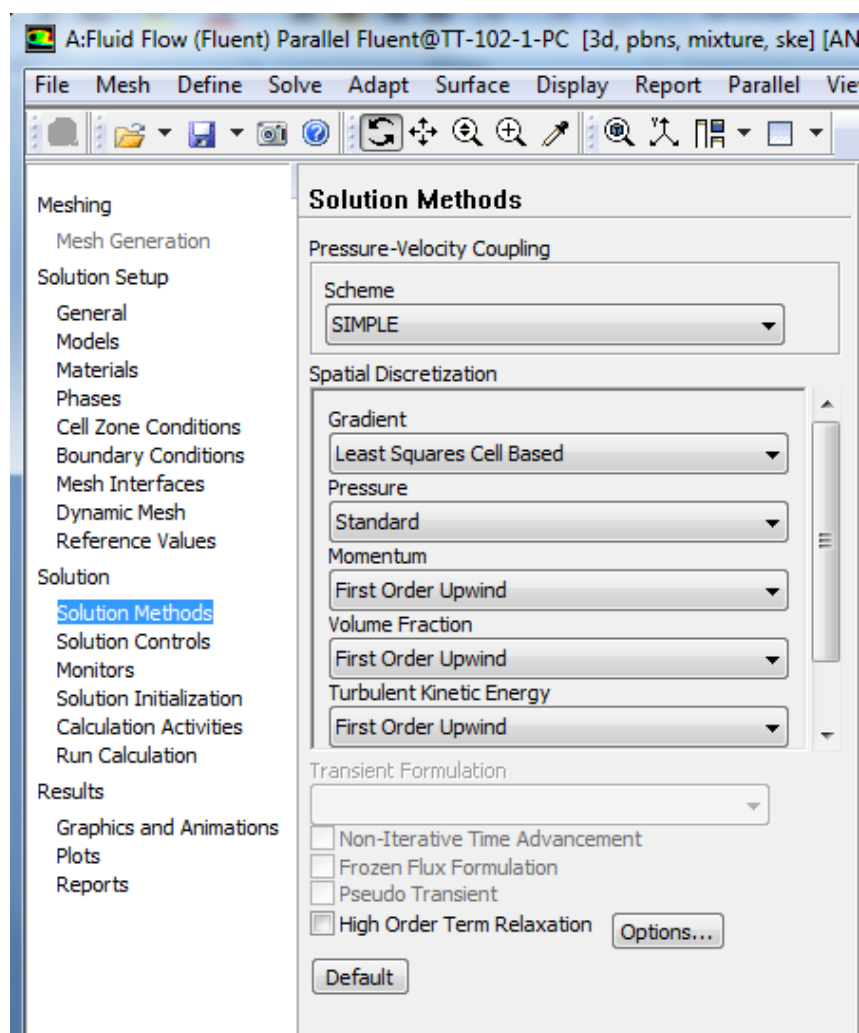


Рисунок 2.18 – Настройка параметров расчета (Solution Methods)

Данное меню состоит из трех основных групп настраиваемых параметров:

Spatial Discretization;

Pressure-Velocity Coupling;

Transient Formulation.

В зоне Spatial Discretization определяются схемы дискретизации соответствующих уравнений, то есть описывается алгоритм построения дискретного аналога дифференциального уравнения в узле конечно-элементной сетки.

Для получения точных решений необходимо использовать дискретизацию второго и выше порядков точности. Однако на первых итерациях такое решение неустойчиво.

Поэтому первые несколько десятков итераций следует проводить на первом порядке дискретизации (First Order), затем его повышать.

В зоне Pressure-Velocity Coupling выбирается алгоритм решения связки уравнения движения и неразрывности для корректного определения полей давления и скорости. Для решения задач течения в межлопаточных каналах целесообразно выбирать алгоритм Coupled (он сходен с алгоритмом расщепления).

Установка начальных значений параметров расчета (инициализация процесса расчета).

При решении задач газовой динамики численными методами перед запуском решения необходимо установить начальные значения параметров в расчетной области. Меню установки начальных условий (рисунок 2.19) вызывается командой:

ГМ: Solve→ Solution Initialization

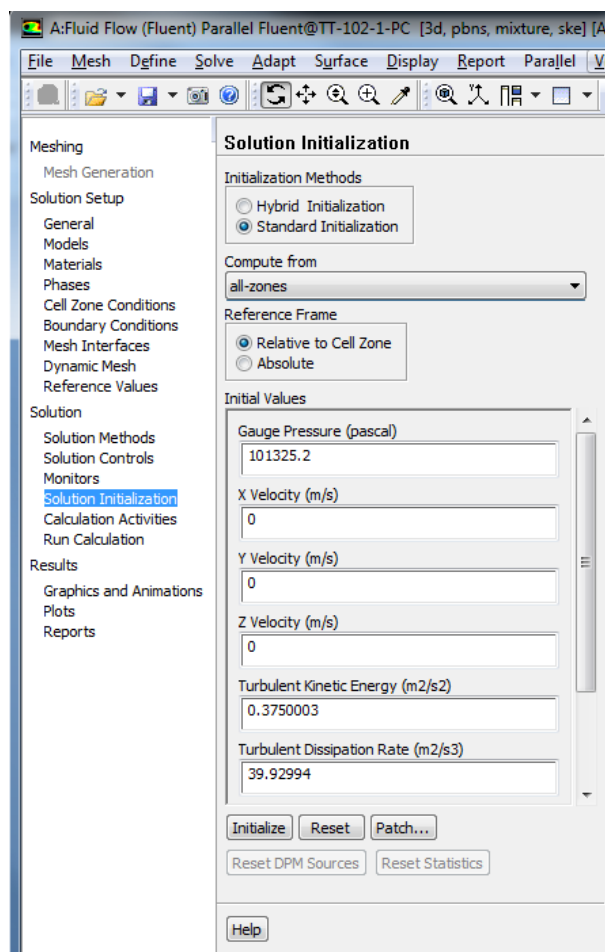


Рисунок 2.19 – Инициализация процесса расчета (Solution Initialization)

В поле данного меню Compute From необходимо выбрать входную границу. В результате рекомендуемые значения начальных параметров будут рассчитаны по входным граничным условиям. Для их принятия следует нажать Initialize.

Настройка отображения процесса решения.

Для того, чтобы отображать невязки в процессе расчета, а также задать критерий остановки решения, необходимо вызвать меню Residual Monitors (рисунок 2.20) с помощью команды:

ГМ: Solve → Monitors → Residual Monitors

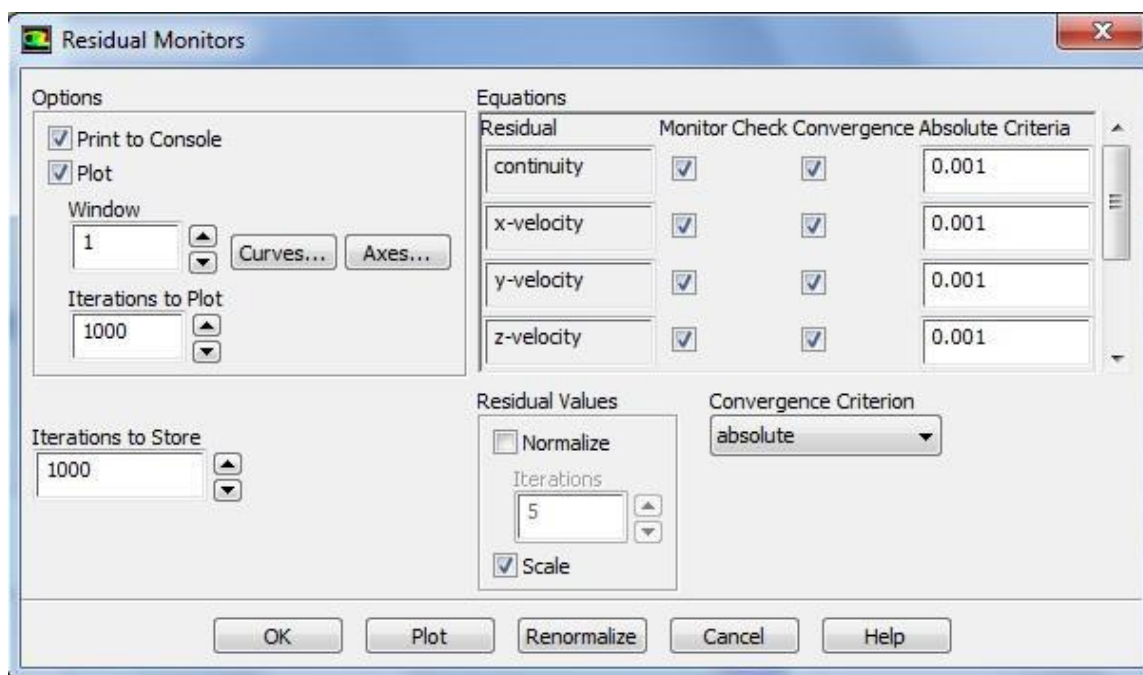


Рисунок 2.20 – Настройка отображения процесса решения (Residual Monitors)

В поле Option необходимо поставить галочки напротив слов Plot и Print. Это приведет к тому, что невязки по всем уравнениям будут печататься в окне сообщения Print и отображаться в виде графиков в графическом окне Plot.

В полях Residual друг над другом перечислены все решаемые уравнения, а напротив каждого из них установлены предельные невязки. Задача считается решенной, когда невязки по всем уравнениям окажутся меньше заданных значений. В этом случае процесс вычисления будет автоматически остановлен. Считается, что для получения точного решения достаточно достижения невязок

10-3 по всем уравнениям. Для сохранения расчетной модели и всех сделанных настроек решателя необходимо вызвать команду:

ГМ: File→ Save Project.

Запускаем расчет для 1000 итераций с помощью следующих действий (рисунок 2.21):

ГМ: Solve → Run Calculation

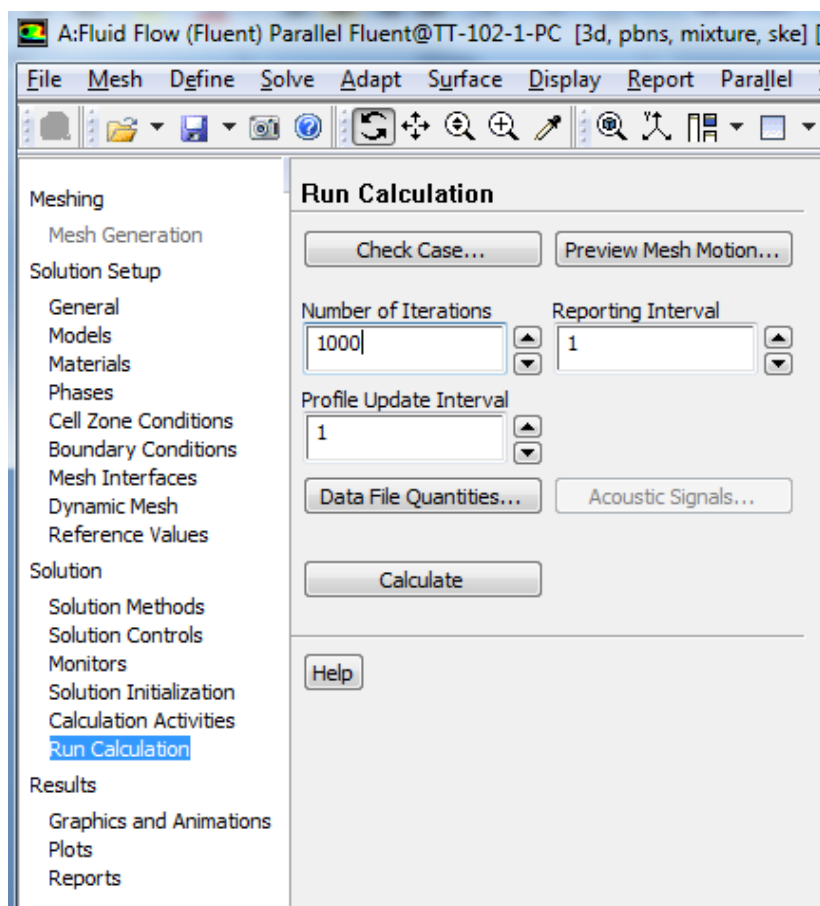


Рисунок 2.21 – Запуск процесса расчета (Run Calculation)

Если условие сходимости будет достигнуто, то процесс счета остановится сам и появиться надпись *solution is converged*. Если заданного числа итераций будет недостаточно для получения решения, то процесс решения можно продолжить. Решение может не сойтись в этом диапазоне итераций. Тогда следует увеличить их количество до 10000. Для более быстрой сходимости можно уменьшить под релаксационные факторы до 0.1.

2.4 Обработка результатов расчета

На данном этапе следует отобразить контуры статического давления в исследуемых местах. Для просмотра полей распределения параметров необходимо запустить команду:

ГМ: Display → Contours

В результате ее выполнения появится меню Contours (рисунок 2.22). Чтобы распределение параметров отображалось в виде полей, необходимо в окошке Filled поставить галочку. В противном случае распределения параметров будут изображаться в виде изолиний. Параметр, изменение которого требуется отобразить, выбирается в поле Contours of. Оно состоит из двух ниспадающих списков. В верхнем выбирается группа, к которой принадлежит нужный параметр (например, давление). В нижнем списке уточняется, какой именно параметр группы требуется определить (например, статическое давление). Это типовая и часто используемая процедура выбора отображаемого параметра в программе ANSYS Fluent. Аналогичным образом, определяется параметр при определении среднеинтегральных значений. В поле Surfaces задаются поверхности, на которых строятся поля распределений параметров. В случае если нужно отобразить параметры по всей расчетной области, выбирается поверхность interior-solid.

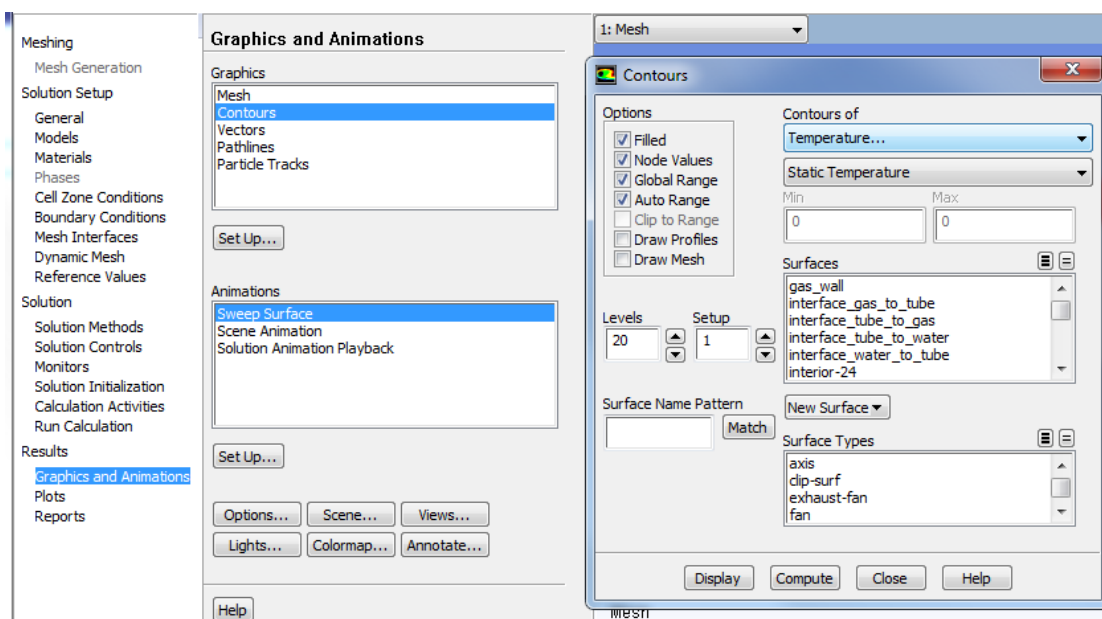


Рисунок 2.22 – Отображение меню Contours

Для подробного исследования, в каком-то конкретном сечении модели, можно создать вспомогательную плоскость по любой выбранной оси. Для этого выполняются следующие действия:

ГМ: Surface → Iso-Surface...

В появившемся окне (рисунок 2.23) в поле Surface of Constant, выбирается Mesh (Сетка) и Z-Coordinate (Координата-Z).

В этом поле можно ввести имя новой поверхности New Surface Name. В данном случае остается по умолчанию.

Вводится координат сечения, в котором проводится исследование, например $Z = 0$ для Iso-Values (Изо-Значение).

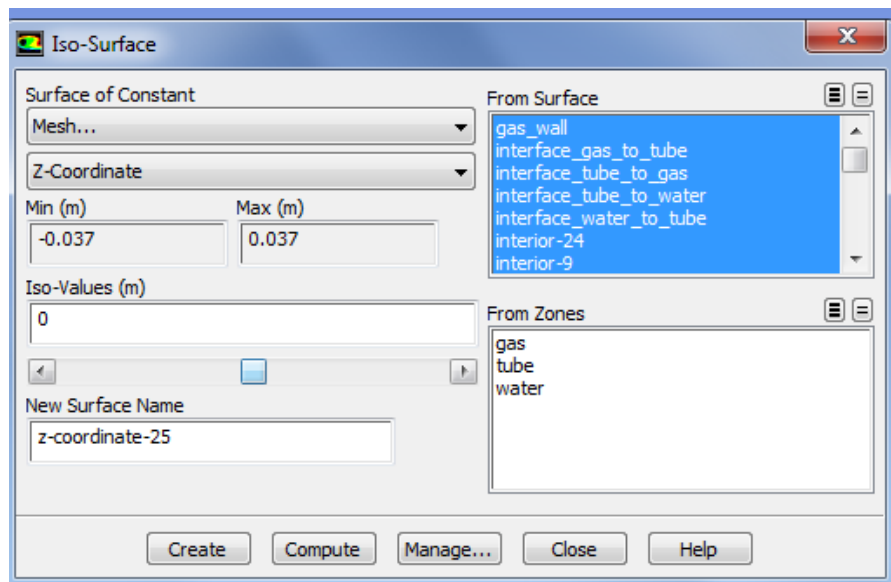


Рисунок 2.23 – Создание вспомогательной плоскости (Iso-Surface)

Затем нажимается кнопка Create (Создать).

Аналогично создаются другие плоскости сечения (рисунок 2.24-2.26).

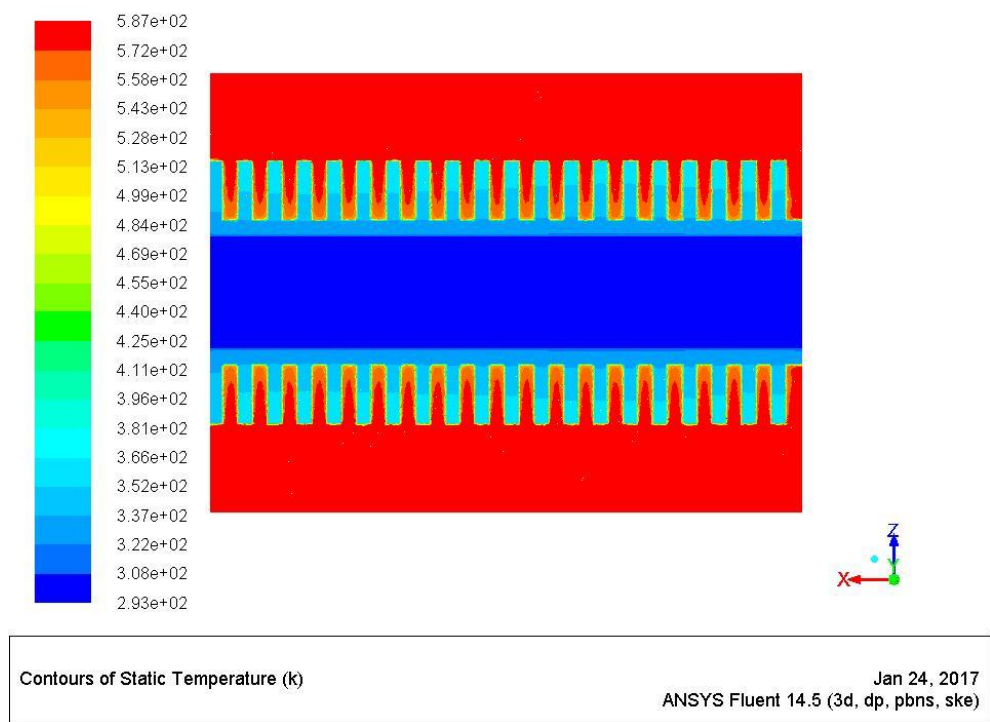


Рисунок 2.24 – Распределение полей температур в продольном сечении теплообменника

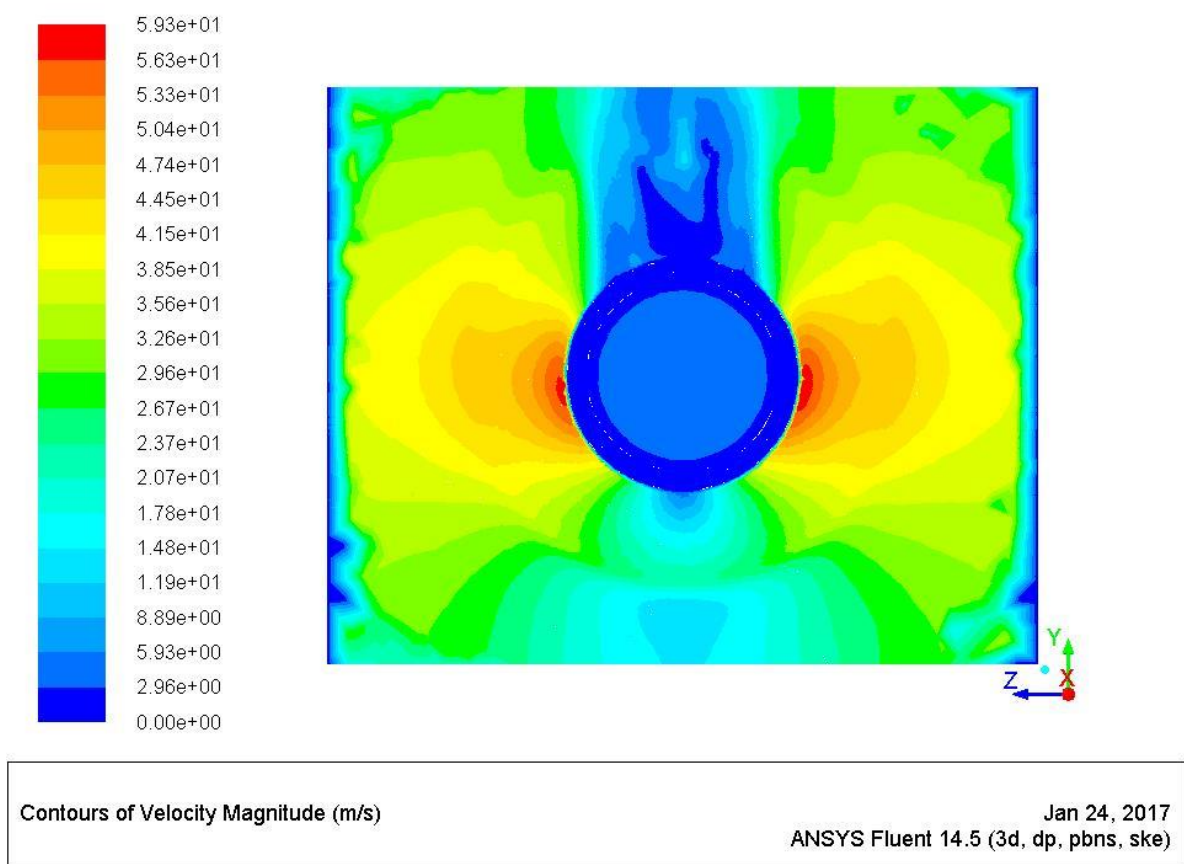


Рисунок 2.25 – Распределение полей скоростей в поперечном сечении теплообменника

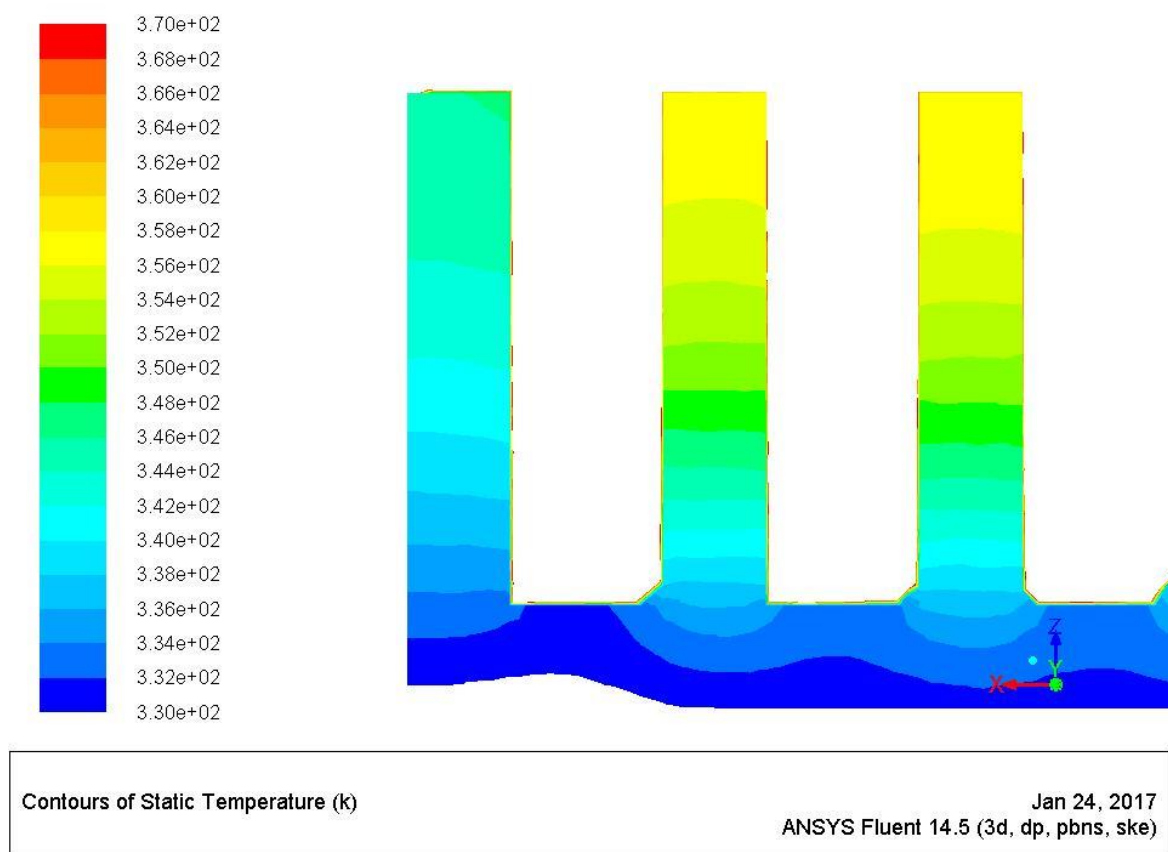


Рисунок 2.26 – Распределение полей температуры в продольном сечении ребра теплообменника

Заключение

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Высокая информативность результатов численного моделирования способствует более глубокому анализу процессов теплопередачи.
2. Моделирование газодинамической структуры потока при обоснованном выборе модели турбулентности позволяет с достаточной для практики точностью получить распределения основных термодинамических параметров при обтекании нагретого шара.

Список литературы

1. Теплотехника [Текст]: метод. указание / Сост. В. Н. Белозерцев, В. В. Бирюк, А. П. Толстоногов.: - Самара: СГАУ, 2001. – 86 с.
2. Толстоногов, А. П. Расчет теплообменника газотурбинного двигателя замкнутого цикла [Текст]: методическое пособие / А. П. Толстоногов. – Куйбышев: КуАИ, 1984. – 16 с.
3. Нагрев и охлаждение трансформаторов [Текст] / Под редакцией Г. Е. Тарле. – М.: Энергия, 1980.
4. Гавр, Т. Г. Тепловой и гидравлический расчет теплообменных аппаратов компрессорных установок [Текст]: учебное пособие / Т.Г. Гавр, П. М. Михайлов, В. В. Рис. – Л.: Ленинградский политех. ин-т им. М. И. Калинина, 1982. – 72 с.
5. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. 3-е изд. [Текст] / Под ред. М. О. Штейнберга. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
6. Батурин О. В. Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса. Часть 3. Работа в программе Fluent/ О. В. Батурин, И. И. Морозов, В. Н. Матвеев – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2008. - 115с.