

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Самарский государственный
аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)» (СГАУ)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ДВС
С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ *FLUENT***

Электронное учебное пособие

УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ
СГАУ РЕГИСТ. № 33-0/11

САМАРА

2011



**ПРИОРИТЕТНЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ
«ОБРАЗОВАНИЕ»**
ПОДДЕРЖКА ВУЗОВ, ВНЕДРЯЮЩИХ ИННОВАЦИОННЫЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ПРОГРАММЫ



Самарский государственный аэрокосмический университет имени
академика С.П. Королёва (национальный исследовательский
университет)

**Авторы: Бирюк Владимир Васильевич,
Коломин Илья Викторович,
Кривцов Александр Васильевич,
Орлов Михаил Юрьевич,
Сайгаков Евгений Аркадьевич,
Угланов Дмитрий Александрович**

Рецензент д-р техн. наук, проф. В.Н. Матвеев

В пособии представлена методика моделирования тепловых и газодинамических процессов в элементах системы охлаждения двигателя внутреннего сгорания с использованием CAD/CAE – технологий. Решение данной проблемы является одной из важнейших инженерных задач в области расчетной газодинамики.

Учебное пособие предназначено для подготовки специалистов по специальности 141100.62 «Двигатели летательных аппаратов», специализирующихся по направлению «САЕ системы в механике жидкости и газа», «Системы охлаждения ДВС», «Теория рабочих процессов» и по специальности 160700.68 «Менеджмент энергосберегательных технологий», специализирующихся по направлению «Численное моделирование газодинамических процессов».

Оно может быть использовано не только при изучении теоретического материала, но и при выполнении дипломных проектов студентами 4 - 6 курсов. Может быть полезно для инженерно-технических работников авиадвигателестроительных ОКБ, научных работников, занимающихся расчетом, проектированием и доводкой ДВС.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ, СОКРАЩЕНИЙ И СИМВОЛОВ.....	5
ВВЕДЕНИЕ	6
1 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ НАСОСЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ.....	7
1.1 Построение 3-D модели внутреннего канала насоса.....	7
1.1.1 Подготовка к импортированию	7
1.1.2 Запуск программы Gambit.....	8
1.1.3 Построение расчетной модели.....	9
1.2 Моделирование газодинамических процессов в центробежном насосе с помощью программного комплекса FLUENT	17
1.2.1 Запуск программы Fluent и ее особенности	18
1.2.2 Настройка решения задачи. Проверка качества сетки	19
1.2.3 Настройка параметров модели расчета	24
1.2.4 Задание свойств рабочего тела и справочного давления	27
1.2.5 Установка модели кавитации.....	28
1.2.6 Граничные условия	30
1.2.7 Настройка процесса решения задачи без кавитации	34
1.2.8 Обработка результатов расчета без кавитации	39
1.2.9 Решение задачи с учетом процесса кавитации.....	43
2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННИКА СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДВС	46
2.1 Построение 2D модели теплообменника.....	47
2.2 Проведение расчета процессов в теплообменнике в формате 2D	58
2.3 Построение 3D модели теплообменника.....	74
2.4 Проведение 3D моделирования тепловых процессов в теплообменнике	81
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	91
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	92

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ, СОКРАЩЕНИЙ И СИМВОЛОВ

D, d – диаметр, м;

F – площадь, м^2 ;

G – массовый расход, кг/с ;

P – давление, Па;

Π – площадь, м^2 ;

T – температура, К;

V – объем, м^3 ;

W – скорость, м/с ;

X, Y, Z – текущие координаты, м;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 ;

ρ – плотность, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

t – время, с;

n – частота вращения, об/мин;

ДВС – двигатель внутреннего сгорания;

ТВС – топливно-воздушная смесь;

КВ – коленчатый вал;

РВ – распределительный вал;

ГМ – главное меню;

ОС – операционная система;

2D – двухмерная задача;

3D – трехмерная задача;

CAE (Computer-aided engineering) – компьютерный инженерный анализ;

CAD (Computer-aided design) – система автоматизированного проектирования;

CFD (Computational fluid dynamics) – вычислительная гидродинамика;

k - ε – двухпараметрическая модель турбулентности.

Z-Coordinate – координата-Z.

ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы моделирование тепловых и газодинамических процессов в элементах системы охлаждения двигателя внутреннего сгорания, таких как радиатор и насос. Данное моделирование должно производиться на основе результатов расчета системы охлаждения в соответствии методикой [1]. Отдельное внимание в работе уделено процессу моделирования кавитации в центробежном насосе. Решение последней задачи требует использования в программном комплексе FLUENT модели движущейся системы отсчета и модели кавитации.

При этом также рассмотрены следующие аспекты использования программы FLUENT: применение $k-\epsilon$ моделей турбулентности, выбор модели смеси, создание расчетной кавитационной модели, расчет задачи без кавитации в потоке и с кавитацией.

В работе показано как производится моделирование тепловых процессов в радиаторе. При этом вначале моделируется течение охлаждающей жидкости в двухмерной модели радиатора для определения значения его коэффициента теплопередачи. Затем проводится расчет и моделирование всех процессов на трехмерной модели проектируемого радиатора.

1 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ НАСОСЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

1.1 Построение 3-D модели внутреннего канала насоса

После выполнения расчетов в соответствии с методикой [1] и построения схемы профиля лопатки насоса создается расчетная модель в какой-либо CAD-программе (например, *Компас*, *SolidWorks*). На рисунке 1 показан результат построения геометрической модели в программе *Solid Works* по заданным параметрам.

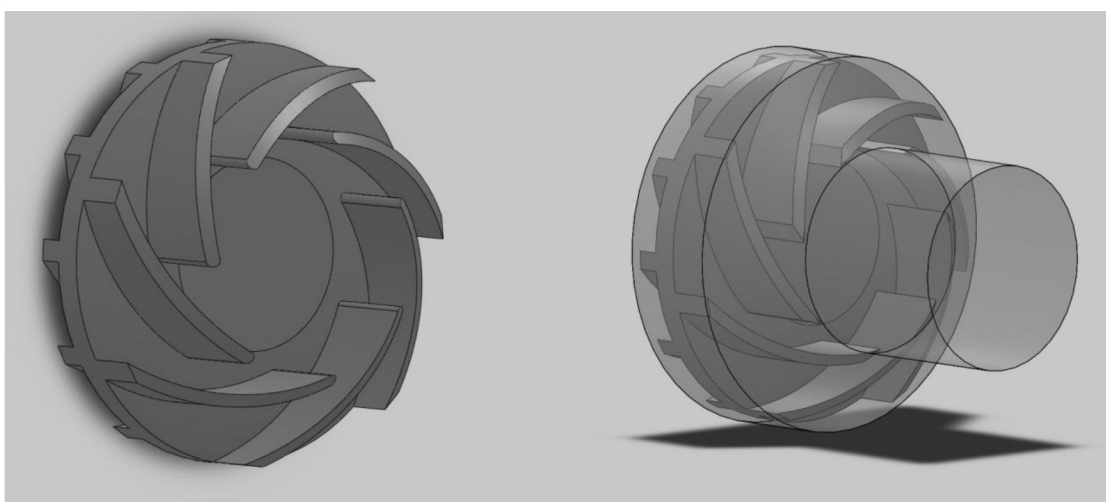


Рисунок 1 – Построение геометрической модели

Полученная модель затем импортируется в постпроцессор *Gambit*, в котором проводятся дополнительные построения, а также её разбиение сеткой и задание граничных условий. Для импортирования необходимо сохранить модель в одном из поддерживаемых постпроцессором *Gambit* форматов: *PARASOLID*, *ACIS*, *STEP* или *IGES*.

1.1.1 Подготовка к импортированию

Как было сказано выше, модель сохраняется в формате *Parasolid* в том CAD-пакете, в котором она создавалась (рисунок 2).

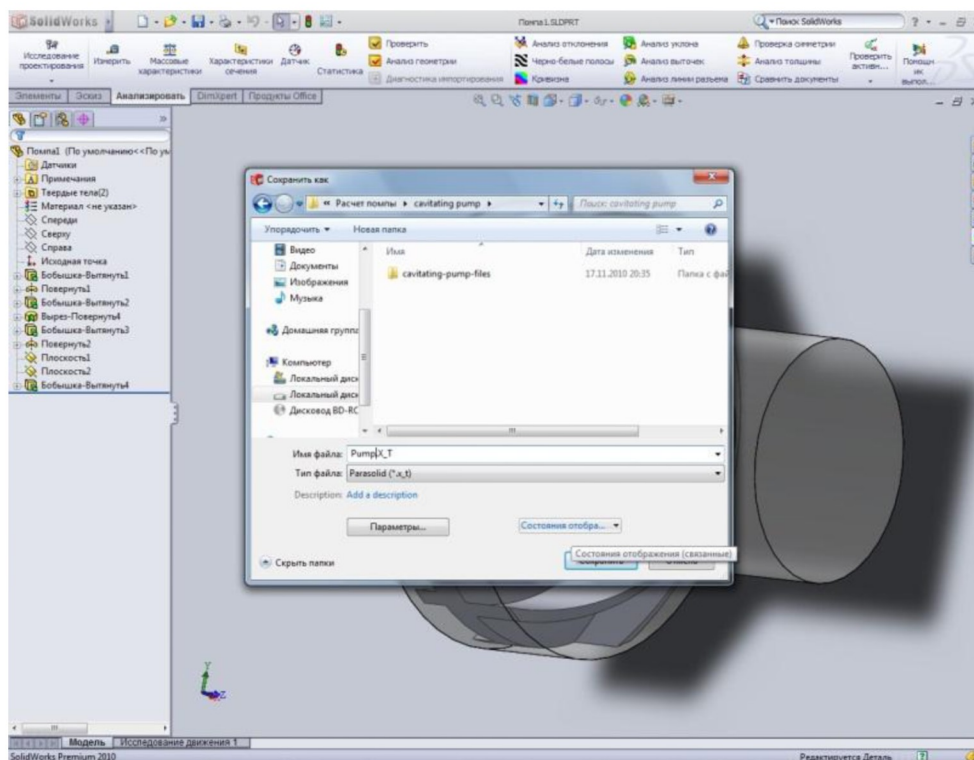


Рисунок 2 – Сохранение модели

При этом модели присваивается соответствующее название, например *pump.X_t*.

1.1.2 Запуск программы Gambit

Запуск данной программы осуществляется нажатием на соответствующий ярлык на рабочем столе или из меню *Пуск ОС Windows*:

Пуск → Все программы → Fluent Inc Products → Gambit 2.3.16 → Gambit 2.3.16

В результате этого действия появится окно, изображенное на рисунке 3. В нем в поле *Working Directory* необходимо выбрать папку, в которой будут сохраняться модели в данной сессии.

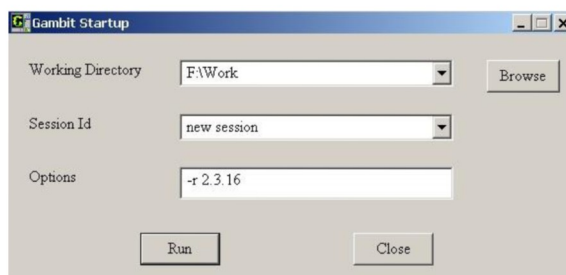


Рисунок 3 – Стартовое окно программы Gambit

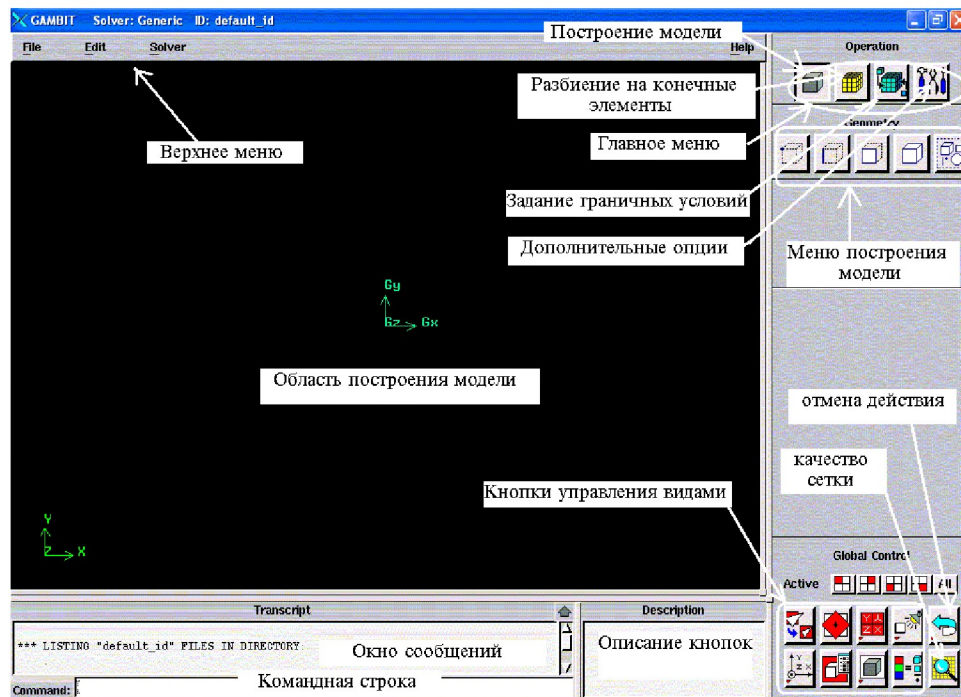


Рисунок 4 – Рабочее окно программы *Gambit*

После этого следует нажать кнопку *Run*. Это приведет к появлению окна программы *Gambit*. Оно показано на рисунке 4.

1.1.3 Построение расчетной модели

Далее импортируется сохраненная модель *pump.x_t* в постпроцессор *Gambit* (рисунок 5, 6): *File* → *Import* → *Parasolid*

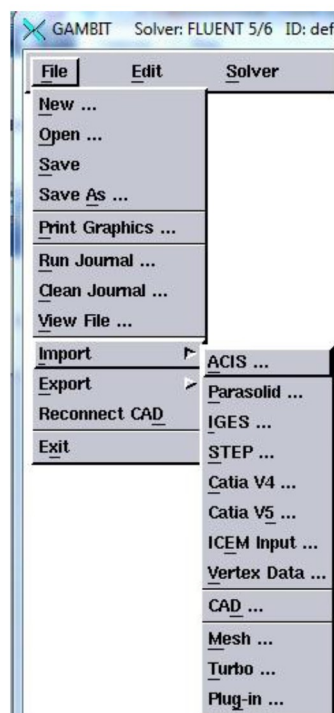


Рисунок 5 – Поддерживаемые форматы импортирования в *Gambit*

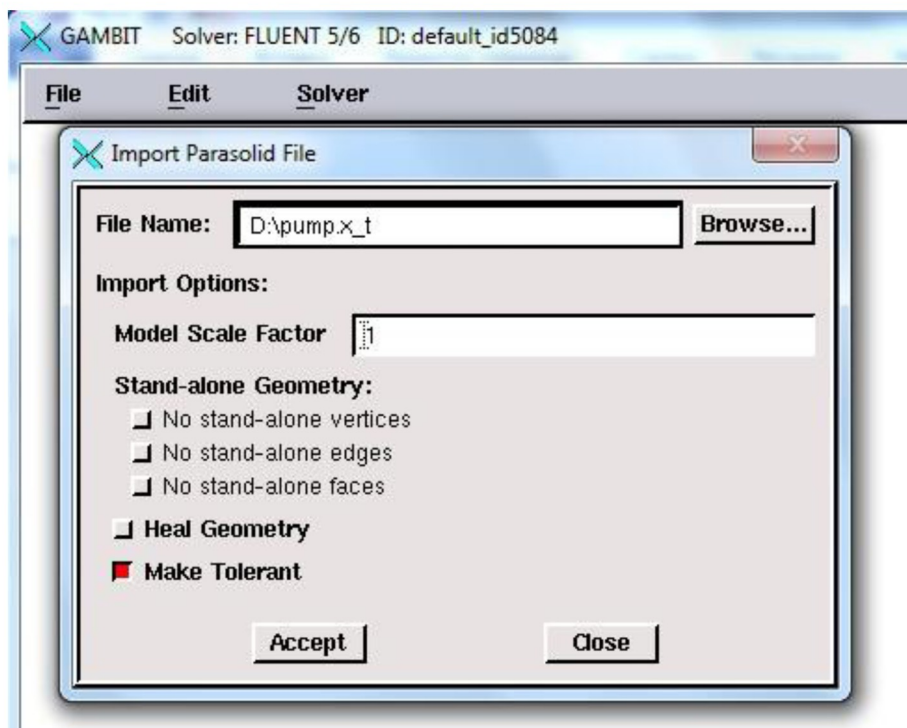


Рисунок 6 – Импорт модели

При этом получается модель, состоящая из двух объемов: крыльчатки и корпуса (рисунок 7).

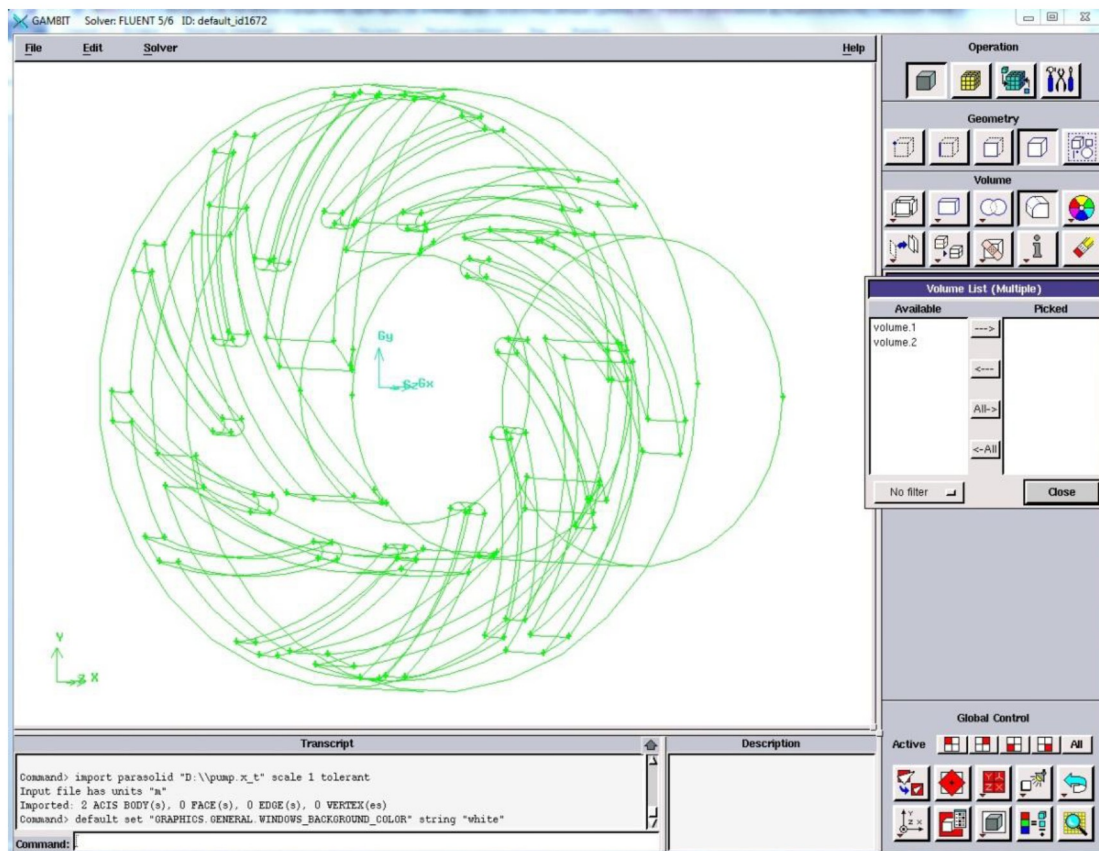


Рисунок 7 – Импортированная модель

Следующим действием создается расчетный канал насоса. Для этого вычитается объем рабочего колеса из корпуса (рисунок 8) с помощью следующих манипуляций:

Geometry
(Геометрия)  → **Volume**
(Объем)  → **Subtract**
(Вычесть) 

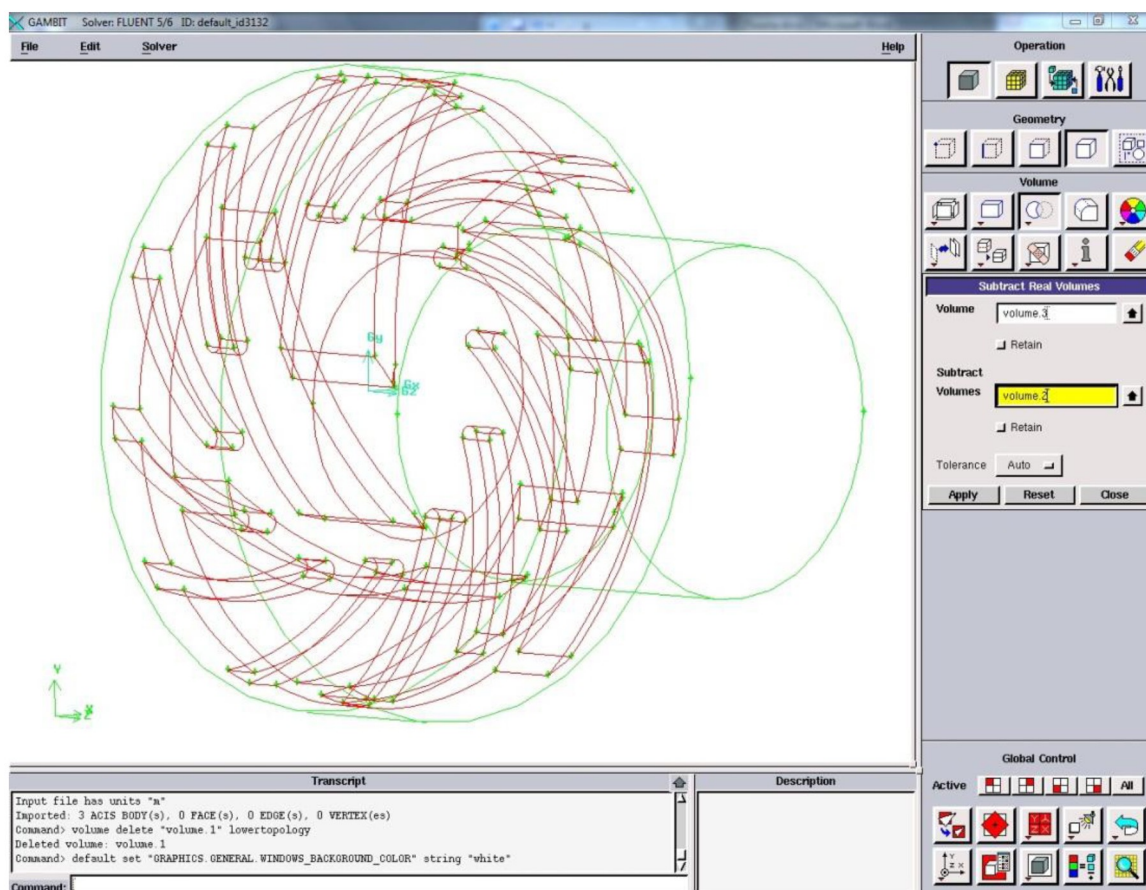


Рисунок 8 – Удаление объема крыльчатки из расчетного объема

Далее необходимо разбить на несколько частей выходную поверхность для правильного наложения граничных условий. Для этого строим 4 вспомогательные точки. Меню построения точек по координатам (рисунок 9) вызывается в главном меню с помощью команды:

Geometry
(Геометрия)  → **Vertex**
(Точка)  → **Create vertex**
(Создание точки) 

В появившемся меню в поле *Global* (в глобальной системе координат) следует ввести координаты требуемой точки, например (0; -33,5; 50).

Подтверждается построение точки нажатием кнопки *Apply*. Аналогичным образом следует ввести все необходимые точки.

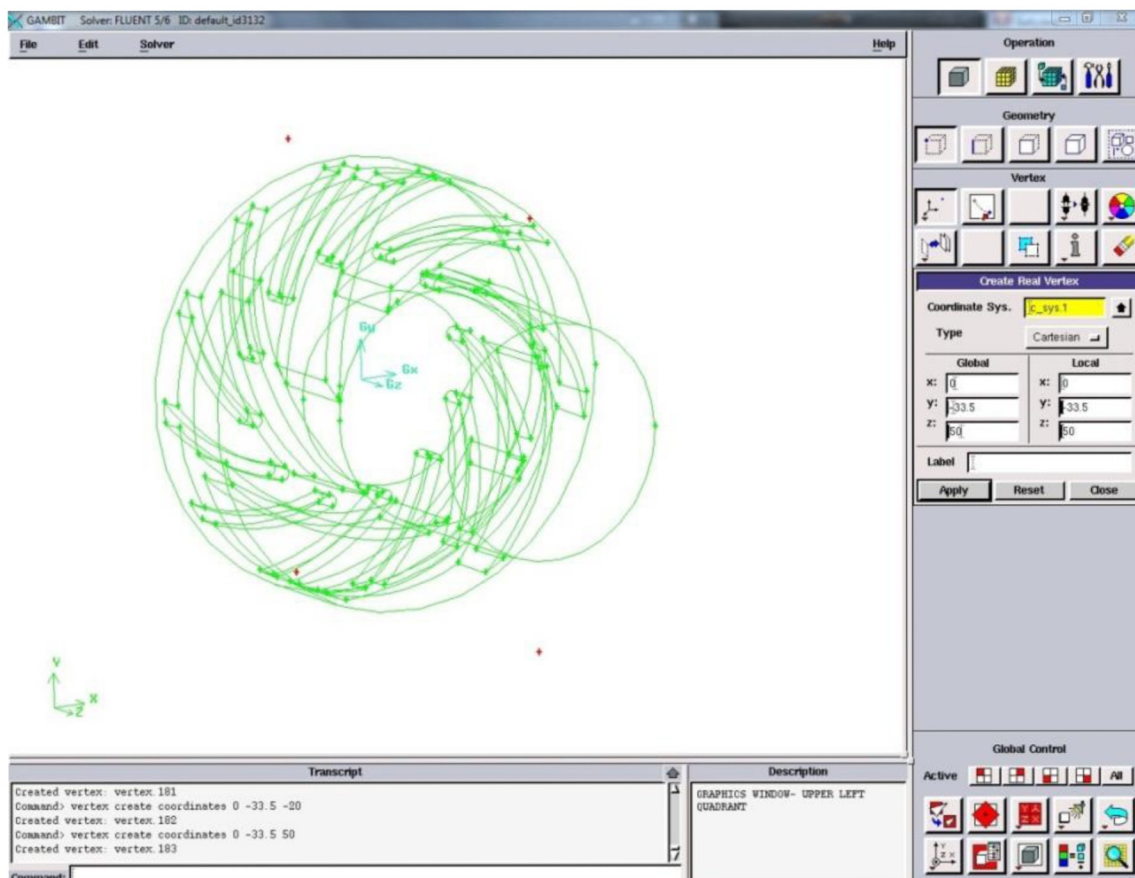


Рисунок 9 – Построение вспомогательных точек

Через полученные точки строятся 2 вспомогательных линии (рисунок 10) с помощью выполнения следующих действий:

Geometry (Геометрия) → **Edge** (Линия) → **Create edge** (Создание линии)

Затем с помощью построенных линий разбивается требуемая плоскость (рисунок 11):

Geometry (Геометрия) → **Face** (Плоскость) → **Split Face** (Разделение плоскости)

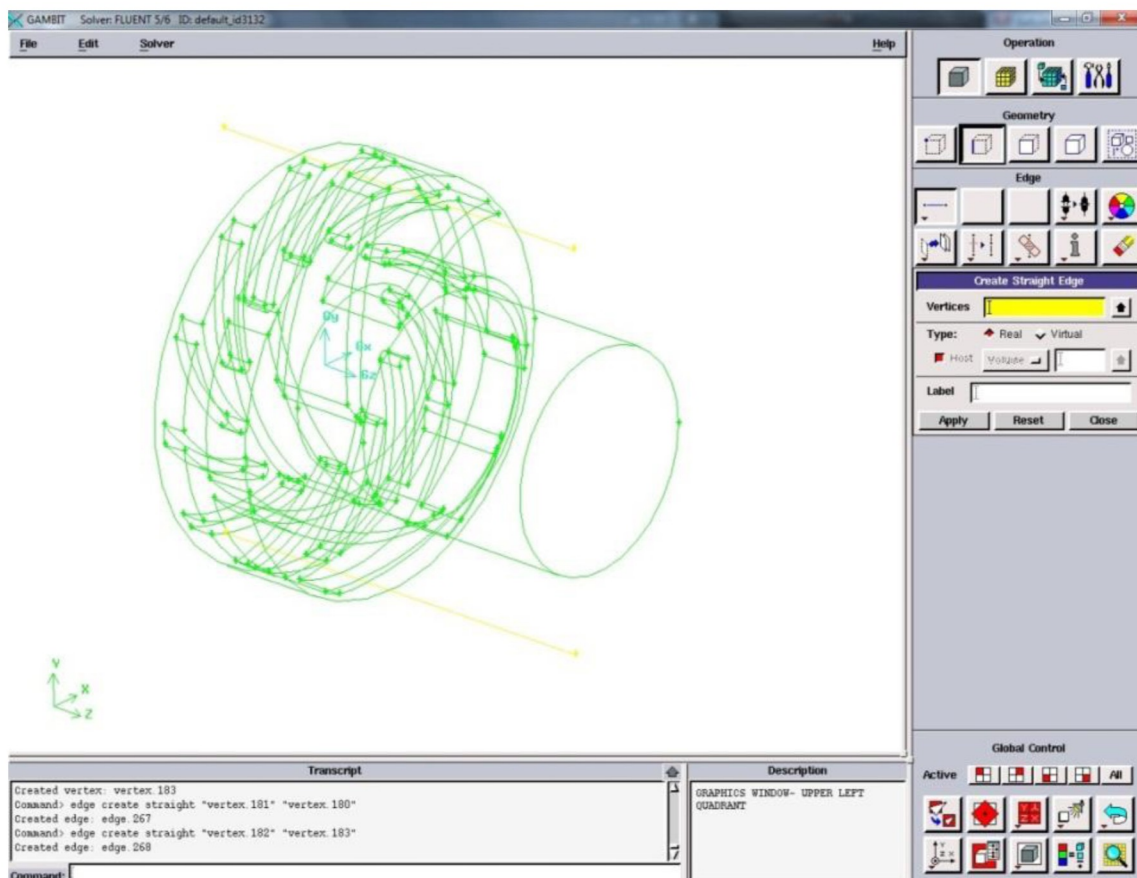


Рисунок 10 – Построение вспомогательных линий

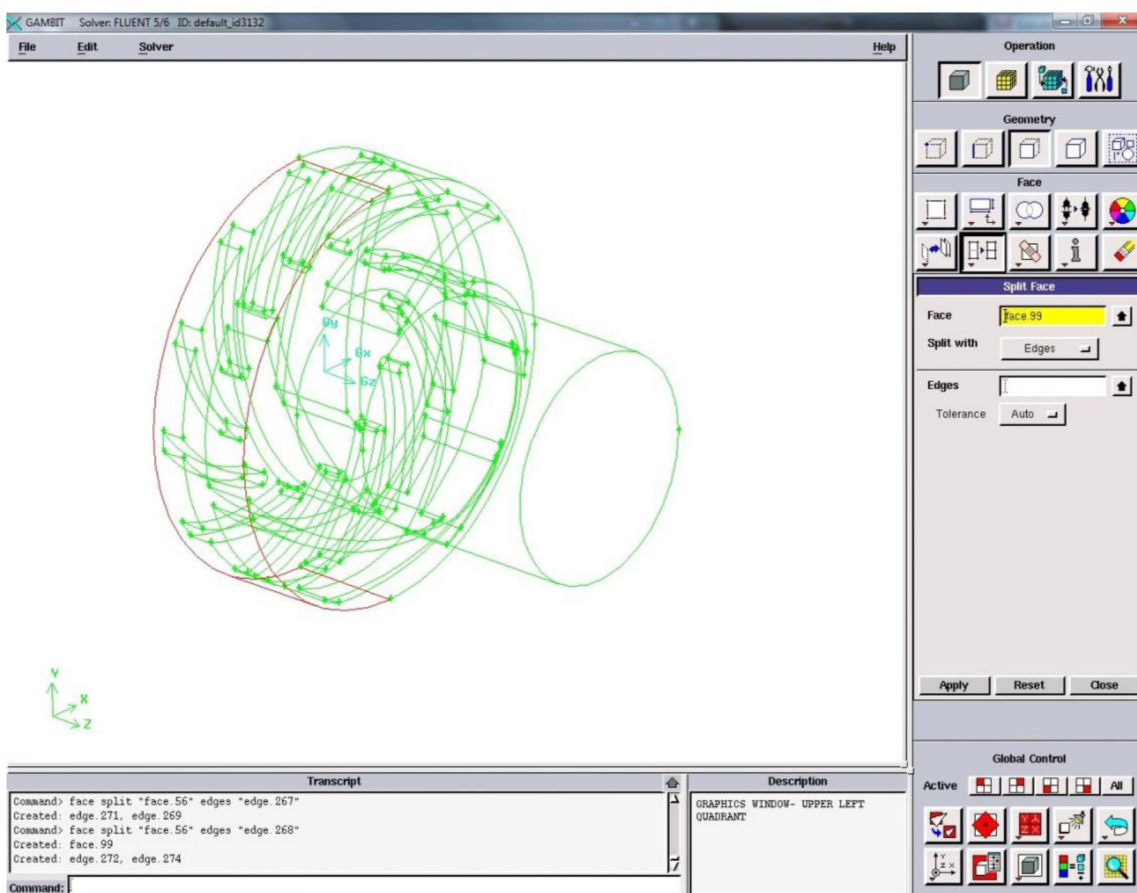


Рисунок 11 – Разбиение выходной поверхности

В меню *Face* выбирается выходная поверхность, а в поле *Split with* выбирается *Edges* (разбить линией), в которой выбирается одна из построенных линий. Аналогичная операция выполняется и со второй линией. После выполнения всех данных действий следует перейти к разбиению модели на конечные элементы.

Накладывается тетра гибридная сетка с размером ячеек 0.8 (рисунок 12) за счет выполнения следующих действий:

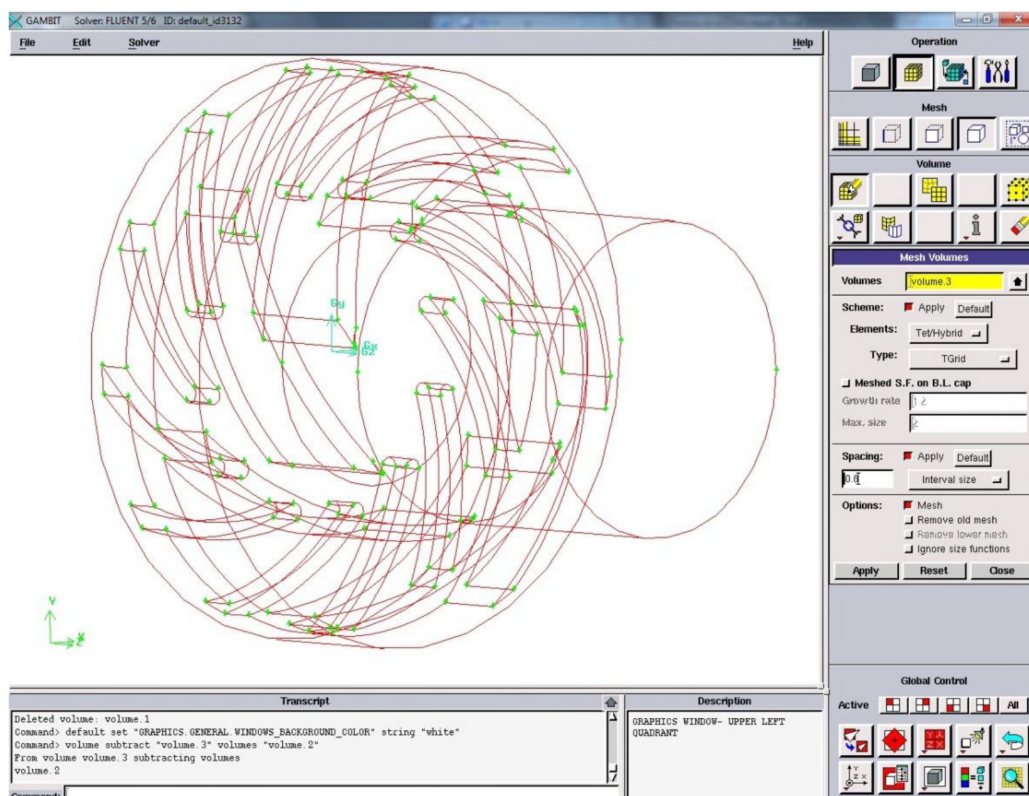
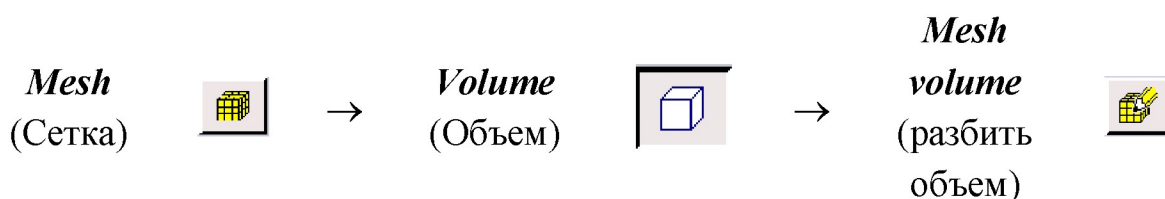


Рисунок 12 – Настройка процесса построения сетки

В поле *Volume* выбирается исследуемый объем, а в поле *Elements* выбирается *Tet/Hybrid*. В меню *Spacing* (размер ячейки) устанавливается значение 0.8. Для подтверждения всех настроек нажимается кнопка *Apply*.

После успешного разбиения переходим к заданию граничных условий (рисунок 13).

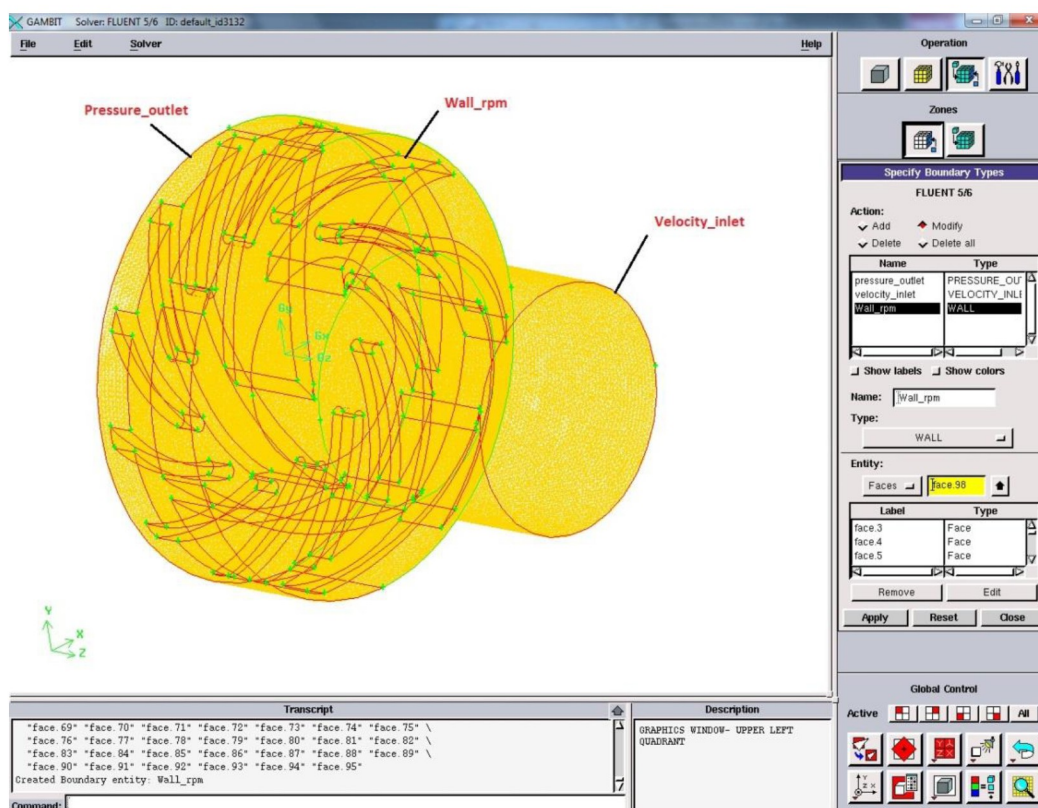


Рисунок 13 –Задание граничных условий

В программе *Gambit* осуществляется предварительное указание линий и поверхностей расчетной области, к которым будут приложены граничные условия. Численные значения граничных условий задаются в программе *Fluent*. Поверхности, которые не будут указаны как граничные, по умолчанию считаются стенками и к ним применяется соответствующее граничное условие. Указанный в программе *Gambit* тип граничного условия в случае ошибок или изменения стратегии решения можно поменять во *Fluent*. Для выхода в меню задания граничных условий (рисунок 14) следует нажать следующие кнопки в главном меню:

Zones

(зоны)



Specify Boundary Types

(Задать тип граничных условий)



Для определения входной границы в нем необходимо произвести следующие действия:

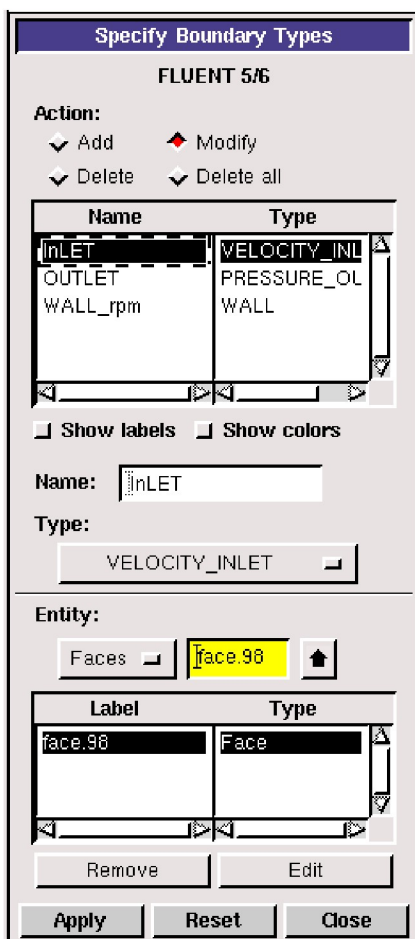


Рисунок 14 – Меню задания граничных условий

- В поле *Action* необходимо нажать кнопку *Add*. Это действие укажет на то, что будет задана новая граничная поверхность.
- В графе *Name* можно задать наименование граничного условия латинскими буквами. Если поле оставить пустым, то имя будет назначено автоматически в соответствии с типом граничного условия.
- Нажать кнопки *Show labels* и *Show colors*. В результате в окне построения созданные граничные условия будут подписываться и выделяться цветом.
- Щелкнуть мышью по кнопке *Type*. В результате откроется доступ к списку доступных граничных условий. Содержание списка зависит от расчетной программы, которая была выбрана в начале построения модели. Для задания входного граничного условия нужно выбрать *velocity inlet*(скорость на входе).
- Поскольку решаемая задача трехмерная, то

граничные условия будут задаваться на плоскости. Для того, чтобы определить это, необходимо щелкнуть мышью на кнопке в области *Entity* и в появившемся списке выбрать *Faces*.

- Поставить курсор в поле напротив кнопки *Faces* и с помощью мыши выбрать входную границу расчетной области. Если произошла ошибка, то удалить поверхность из списка можно, нажав кнопку *Remove*.
- Выбранные настройки границы подтверждаются нажатием кнопки *Apply*.

В результате выполнения команды в списке в верхней части меню появится название созданного граничного условия, а в области построения оно будет выделено цветом и высветится его имя.

Аналогично на выходной границе расчетной области задается граничное условие *pressure outlet* (давление на выходе), а для поверхностей рабочего колеса устанавливается граничное условие *Wall*, но ему присваивается название *Wall_rpm* для удобства использования этой группы поверхностей в программе *Fluent*.

На остальных ограничивающих модель поверхностях, которые не были отмечены как граничные, по умолчанию будет установлено граничное условие стенки (*Wall*).

1.2 Моделирование газодинамических процессов в центробежном насосе с помощью программного комплекса FLUENT

Исследуемый центробежный насос вращается с частотой $n=5600$ об/мин (может быть и другая частота вращения). Рабочая жидкость – вода (может быть Тосол и другие хладоносители). Поток считается устойчивым и несжимаемым. Свойства жидкости:

- плотность жидкости = 1000 кг/м^3 ;
- вязкость жидкости = $0.001 \text{ Па}\cdot\text{С}$;
- плотность пара = 0.0192 кг/м^3 ;
- вязкость пара = $8.8 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{С}$;
- поверхностного натяжения = 0.0717 Н/м .

Моделирование будет выполняться с использованием фиксированного массового расхода жидкости 3 кг/с на входе. Кроме того, поток будем считать полностью турбулентным, интенсивность турбулентности равна 5%.

Абсолютная величина статического давления на входе зависит от заданного давления на выходе. Следовательно, выходное давление будет неявно определять уровень кавитации (по отношению к минимальному давлению со стороны всасывания крыльчатки).

В данном случае, давление на выходе устанавливается до $160\,000 \text{ Па}$. Для того, чтобы кавитации развивалась в управляемом режиме, решение без

кавитации вычисляется в первую очередь. Затем модель кавитации активируется и выполняется настройка процесса зарождения и развития кавитации.

1.2.1 Запуск программы *Fluent* и ее особенности

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

Запуск программы осуществляется нажатием на соответствующий ярлык на рабочем столе или из меню *Пуск* ОС *Windows*:

Пуск → *Все программы* → *Fluent Inc Products* → *Fluent 6.3.23* → *Fluent 6.3.23*

Или

Пуск → *Все программы* → *ANSYS 12.1* → *Fluid Dynamics* → *Fluent*

Перед открытием рабочего окна программы появится меню (рисунок 15), предлагающее выбрать параметры для решения задачи:

2D, 3D, Working directory, Display options, Параметры обработки (Выбрать *Parallel* в случае расчета на многоядерном процессоре).

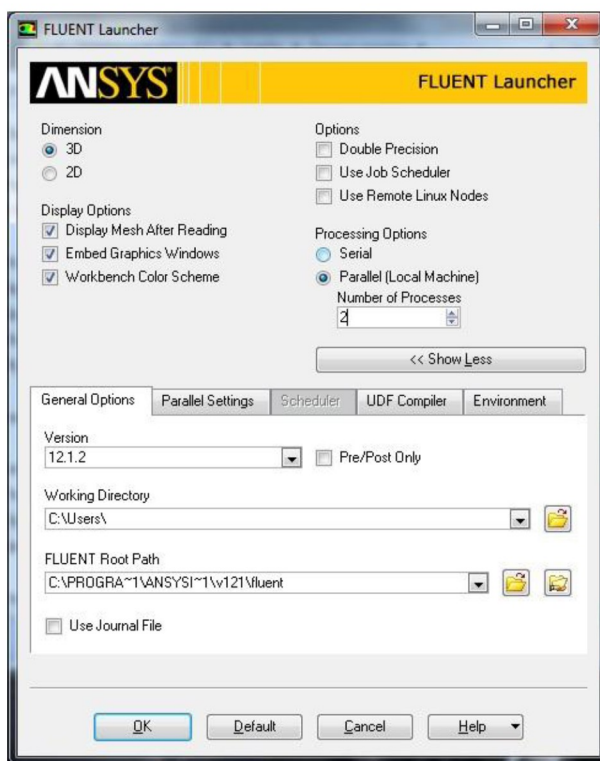


Рисунок 15 – Меню запуска программы *Fluent* (*Fluent Launcher*)

В рассматриваемом случае задача является трехмерной. После выбора нужно нажать кнопку *OK*. В результате на экране компьютера появляется рабочее окно программы *Fluent* (рисунок 16).

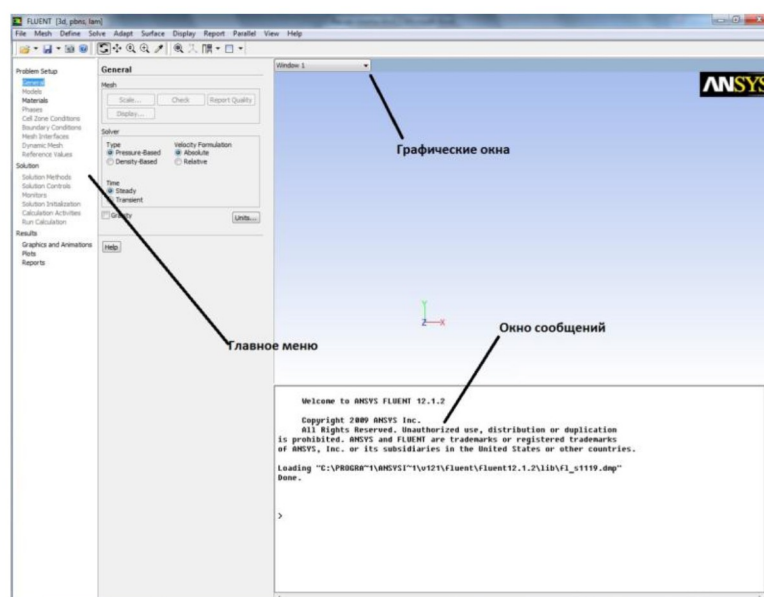


Рисунок 16 – Рабочее окно программы *Fluent*

Окно программы достаточно простое и состоит из трех основных элементов:

- *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. Число графических окон может быть любым.

1.2.2 Настройка решения задачи. Проверка качества сетки

1. Считывается mesh файл - *pump.msh*

Чтобы прочитать созданную расчетную модель, необходимо в главном меню выбрать:

ГМ: File → Read → Mesh

В появившемся стандартном окне проводника ОС *Windows* нужно найти место, где был сохранен файл обмена, выбрать его и подтвердить выбор кнопкой *OK*. При чтении файла в окне сообщений *Fluent* появятся

полные сведения о модели, содержащейся в читаемом файле: размеры, количество и тип конечных элементов и т.п.

2. 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 17), а в окне сообщения появятся полные сведения о конечно-элементной сетке. Если будет найдена ошибка, то будет выдано соответствующее сообщение. В этом случае необходимо вернуться в программу *Gambit*, найти ошибку и исправить ее.

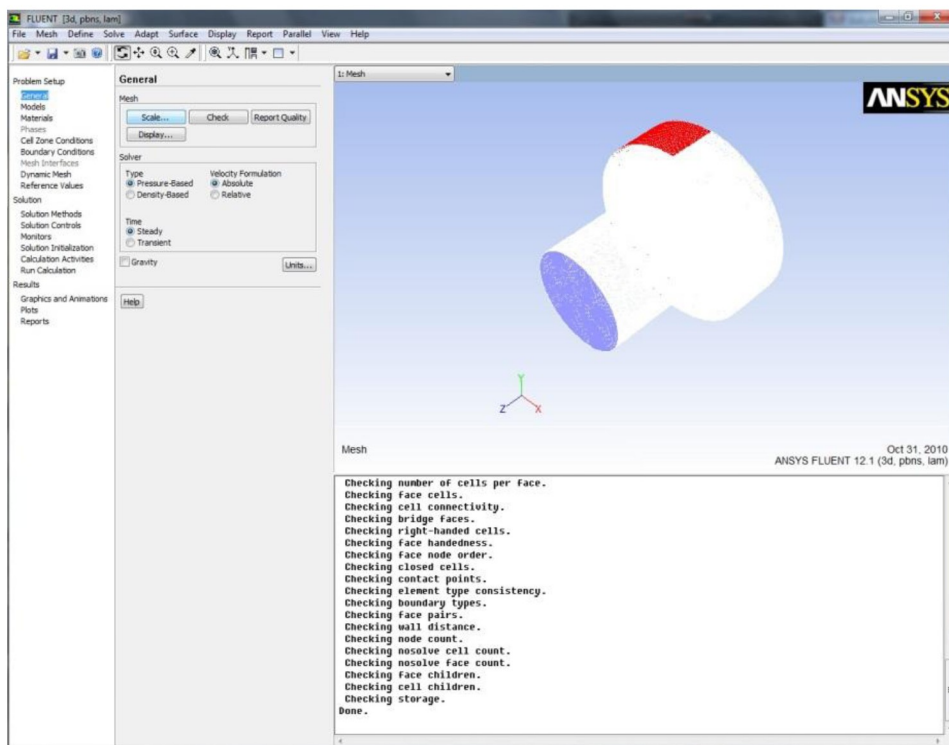


Рисунок 17 – Отображение Сетки (*Mesh Display*)

3. Масштабирование конечно-элементной сетки

Размеры расчетных моделей в программе *Fluent* должны быть обязательно заданы в метрах. Так как рассматриваемая модель межлопаточного канала насоса была создана в миллиметрах, то поэтому построенную сетку нужно уменьшить в *1000* раз. Для этого в программе есть

удобная команда масштабирования *Scale Mesh* (рисунок 18). Она вызывается из главного меню командой:

ГМ: *Mesh*→*Scale*

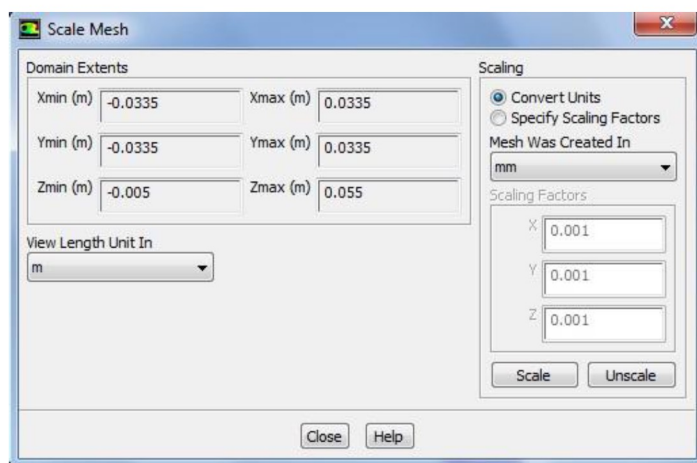


Рисунок 18 – Меню настройки масштаба (*Scale Mesh*)

В поле *Domain Extents* меню приведены максимальные координаты модели. В меню *Scale Mesh* в поле *Grid was created in* (сетка была создана в...) нужно выбрать миллиметры *mm* (или другую единицу измерения, в которой была создана расчетная модель), а затем нажать кнопку *Scale*. Модель будет автоматически приведена в соответствующий масштаб. Следует обратить внимание на то, что в поле *Domain Extents* размеры модели примут правильные значения. Отменить масштабирование в случае ошибки можно с помощью кнопки *Unscale*. После завершения операции меню необходимо закрыть с помощью кнопки *Close*.

4. Просмотр конечно-элементной сетки.

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

ГМ: *Mesh*→*Display*

В появившемся меню *Mesh Display* (рисунок 19) в окне *Surfaces* требуется выбрать все граничные поверхности, которые пользователь хочет просмотреть. Следует обратить внимание на то, что имена в списке совпадают с именами граничных условий, заданных в *Gambit*. Для просмотра выбранных элементов сетки нужно нажать кнопку *Display*.

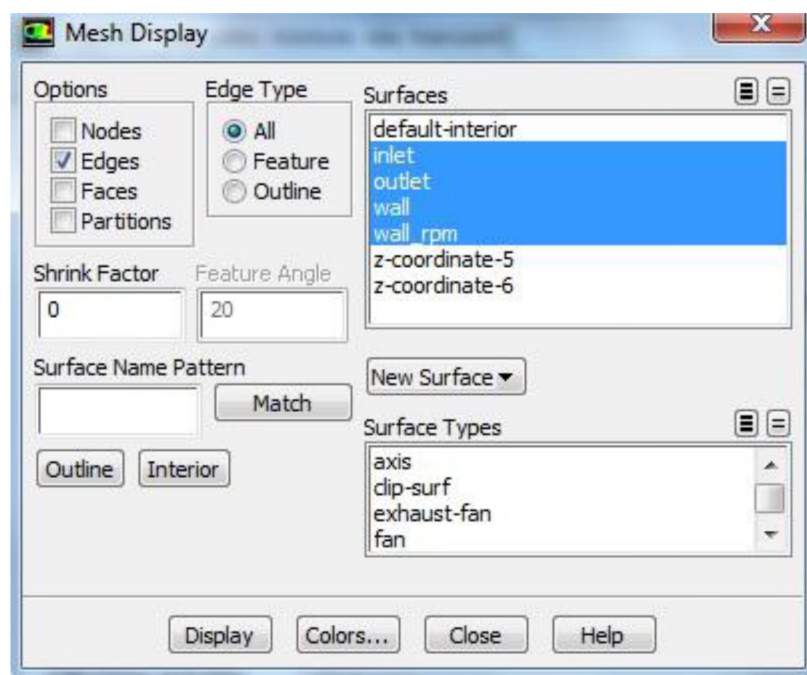


Рисунок 19 – Отображение сетки (*Mesh Display*)

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

Примечание: В результате масштабирования, модель может не отобразиться на экране, так как имеет малый размер. Для того, чтобы изучить конечно-элементную сетку внимательнее, нужно использовать мышь. Движение мыши с нажатой левой кнопкой вызывает сдвиг модели. Движение мыши с нажатой средней кнопкой вызывает появление рамки, с помощью которой можно приблизить (если рамку вытягивать слева направо) выделенный фрагмент модели или, наоборот, отдалить (если рамку вытягивать справа налево). Если в окне *Surfaces* снять выделение с пункта *default – interior*, то в окне можно будет увидеть только контур модели, без расчетной сетки.

5. Преобразование сетки

Начиная с версии 6.3, программа *Fluent* поддерживает новый тип ячейки – многогранные ячейки (*polyhedral cell*). Преимуществами многогранных ячеек заключаются в следующем:

- многогранные ячейки обладают несколькими дополнительными свойствами, включая высокую точность решения с использованием

стандартных конечных элементов и хорошую связанность соседних ячеек;

- увеличение количество связей ячейки улучшает сходимость по сравнению с треугольной сеткой;
- расчет модели, разбитой сеткой с многогранными ячейками часто может быть гораздо быстрее, чем модели с сопоставимой треугольной сеткой с эквивалентной точностью;
- многогранники могут быть использованы локально для улучшения качества существующей тет/гибридной сетки;
- нет необходимости в специальных генераторах сетки (достаточно существующей тет/гибридной сетки, которая используется в программе *Fluent*).

Преобразование ячеек сетки в многогранные (рисунок 20) выполняется следующим образом:

ГМ: Mesh → Polyhedra → Convert Domain

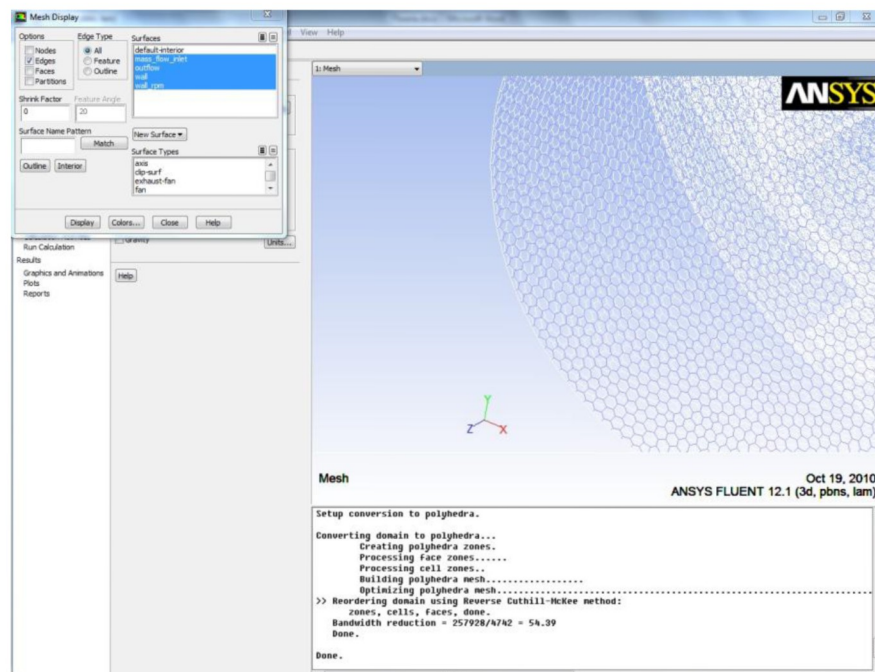


Рисунок 20 – Отображение многогранной сетки

6. Изменение единицы измерения угловой скорости

Выполнение данной операции осуществляется следующим образом:

ГМ: Units...

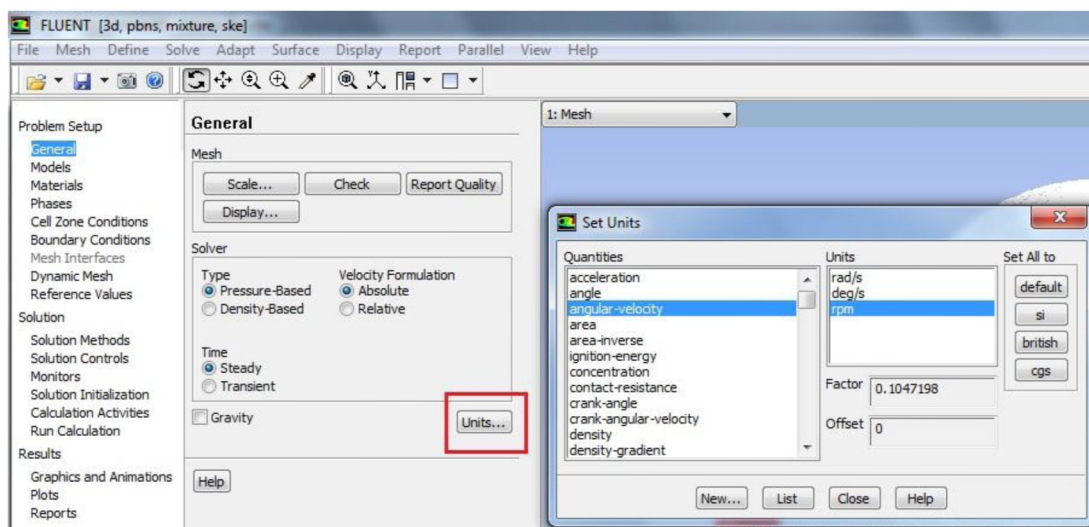


Рисунок 21 – Изменение единиц измерения (*Set Units*)

В появившемся окне *Quantities* выбирается параметр *angular-velocity* и происходит изменение единицы измерения на *rpm* (рисунок 21).

1.2.3 Настройка параметров модели расчета

1. 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: Solver

В меню *Solver* (рисунок 22) нужно обратить внимание на следующие моменты. Программа *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*.

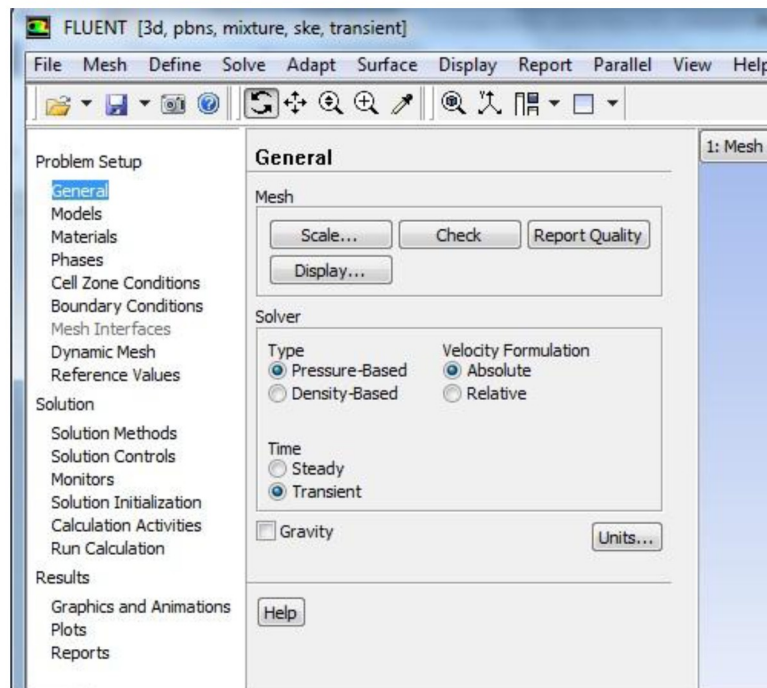


Рисунок 22 – Меню настройки решателя (*Solver*)

В поле *Time* описывается, будет ли решение стационарным *Steady* или нестационарным *Transient*. То есть, будут ли параметры потока зависеть от времени или нет. Рассматриваемая задача является двухмерной нестационарной.

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 насоса целесообразно использовать модель турбулентности *k-epsilon*, поскольку она позволяет получать решения с приемлемой точностью, и для этой модели она хорошо сходится (рисунок 23).

ГМ: *Models* → *Viscous*.

3. Настройка параметров двухфазного состояния

В рассматриваемой задаче будут присутствовать две фазы состояния – жидкость и газ (рисунок 24).

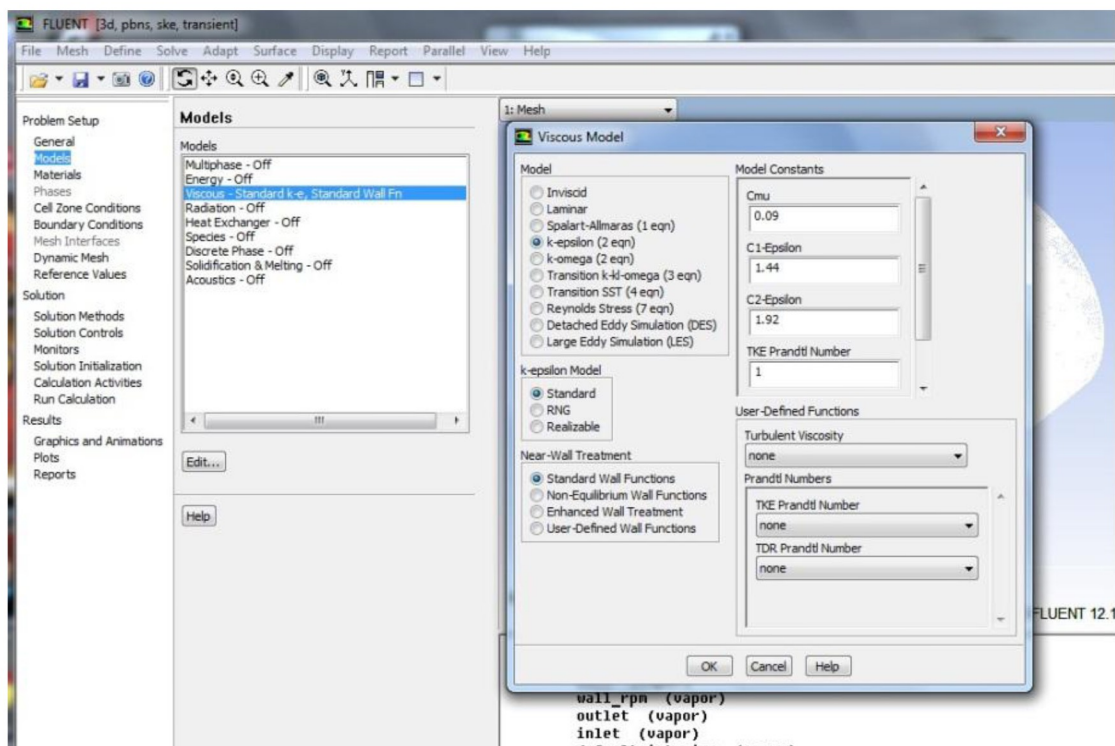


Рисунок 23 – Настройка параметров турбулентности (*Viscous*)

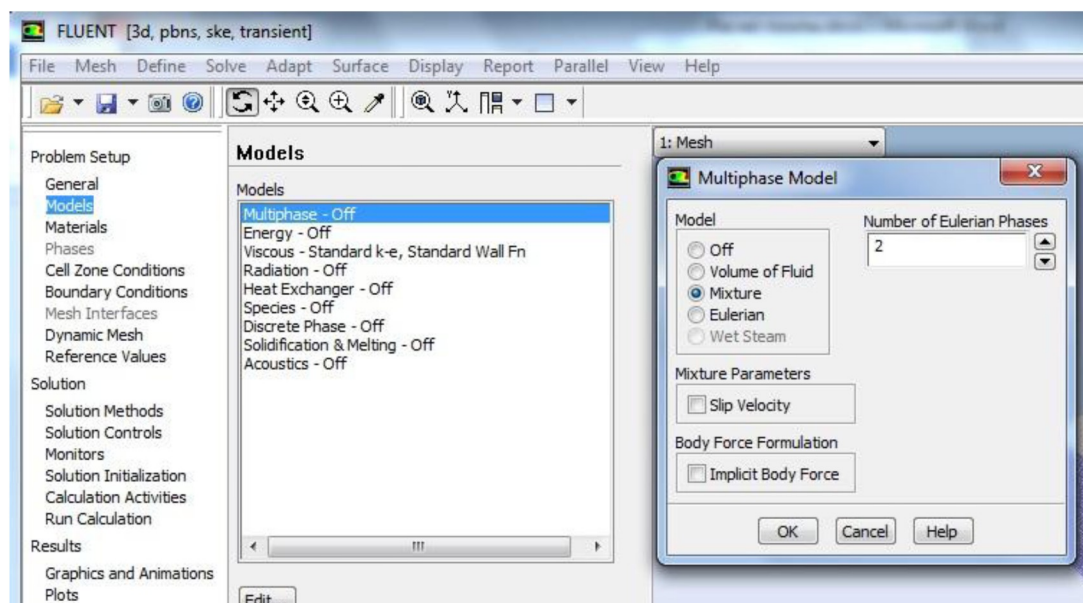


Рисунок 24 – Меню настройки параметров двухфазного состояния (*Multiphase*)

Опция активируется в меню *Multiphase*, где количество фаз (*Number of Eulerian Phases*) задается равной двум. Также в данном меню необходимо отключить скорость скольжения (*Slip Velocity*) с помощью следующих действий:

ГМ: *Models* → *Multiphase*

1.2.4 Задание свойств рабочего тела и справочного давления

Задание свойств рабочего тела осуществляется в меню *Materials* (рисунок 25), которое вызывается командой:

ГМ: *Define*→*Materials*

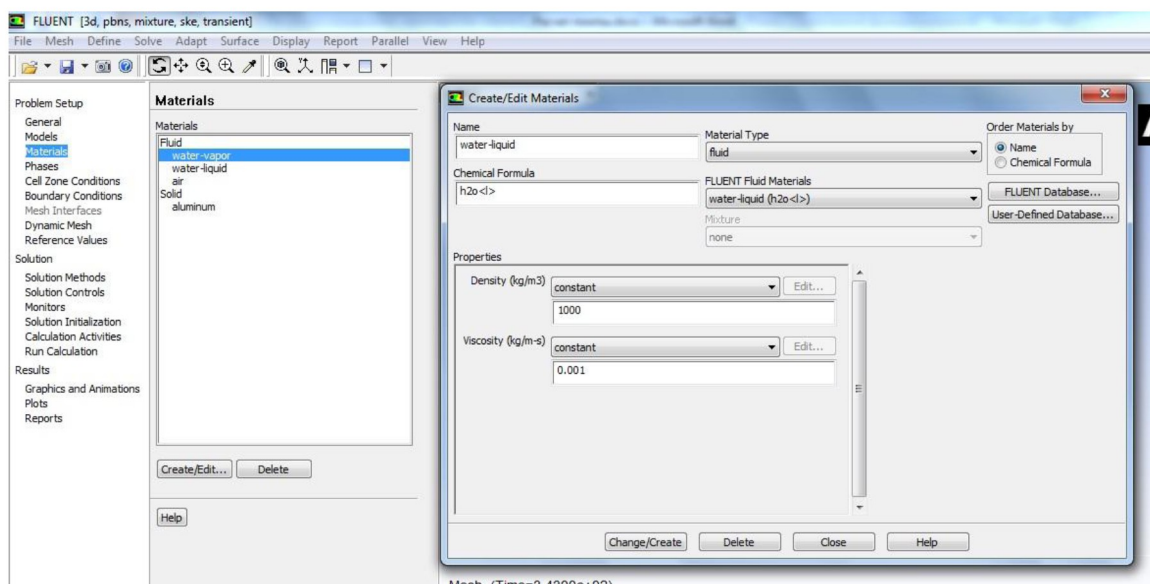


Рисунок 25 – Меню материалы (*Materials*)

В рассматриваемой задаче в качестве рабочего тела используется вода и водяной пар. Для того, чтобы осуществить эту установку, в меню *Materials* необходимо нажать кнопку *FLUENT Data Bases*, далее в появившемся списке *FLUENT Fluid Materials* выбрать необходимые материалы:

1. Задать в опции ***fluid*** water-liquid из базы с плотностью (*Density*) и вязкостью (*Viscosity*) 1000 и 0.001 соответственно.
2. Задать в опции ***fluid*** water-vapor из базы с плотностью и вязкостью 0.01927 и $8.8 \cdot 10^{-6}$ соответственно.

Особенность программы *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 26), которое появится в результате выполнения команды:

ГМ: Define → Operating Conditions

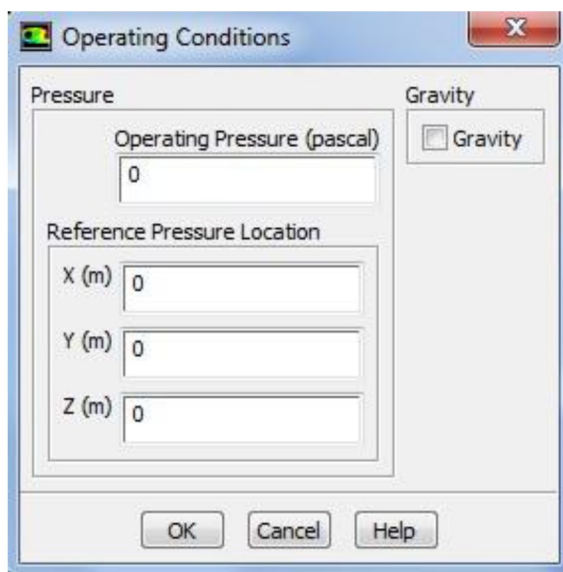


Рисунок 26 – Справочное давление (*Operating Conditions*)

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

1.2.5 Установка модели кавитации

Для настройки данного процесса необходимо присвоить заданным рабочим средам соответствующие фазы:

ГМ: Define → Phases

Далее необходимо выполнить следующие действия:

- установить phase-1 – **water-liquid** (рисунок 27);
- установить phase-2 – **water-vapor**.

Затем необходимо определить взаимодействие между фазами. Для этого выполняется следующая последовательность действий:

- чтобы открыть панель взаимодействия фаз *Interaction...*, проводится манипуляция:

ГМ: Define → Phases → Interaction...

- во вкладке *Mechanism* выбирается кавитация (*cavitation*);

- устанавливается значение давления насыщенных паров *Vaporization Pressure* до 2650 и сохраняются значения по умолчанию для других параметров (рисунок 28).

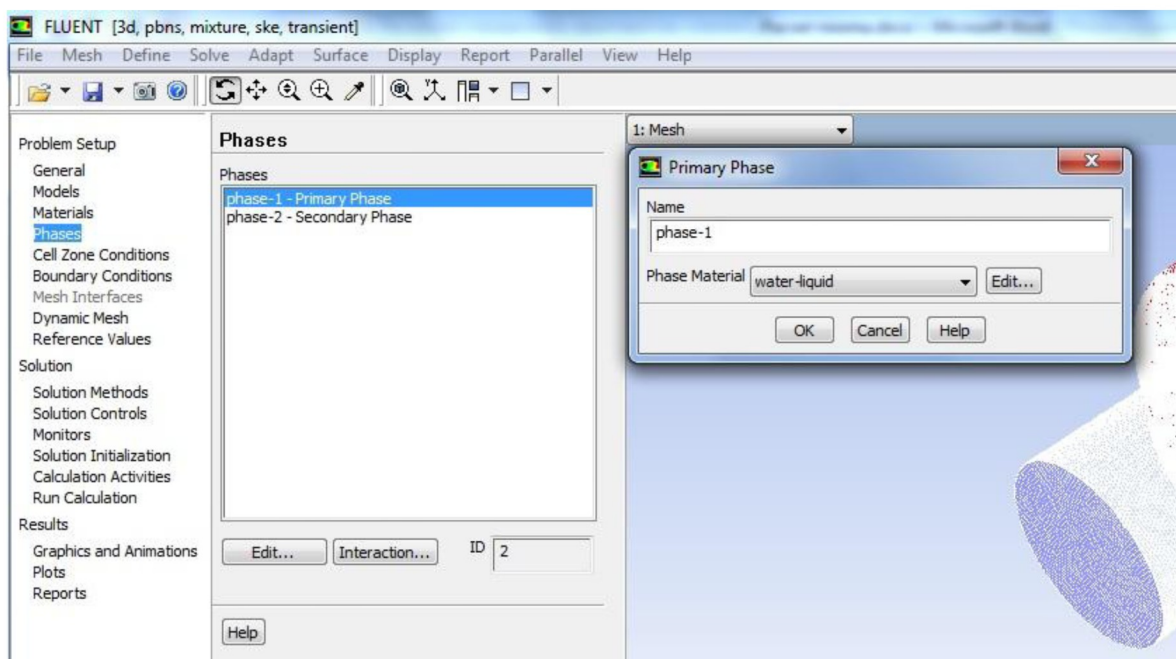


Рисунок 27 – Выбор и установка фаз (*Phases*)

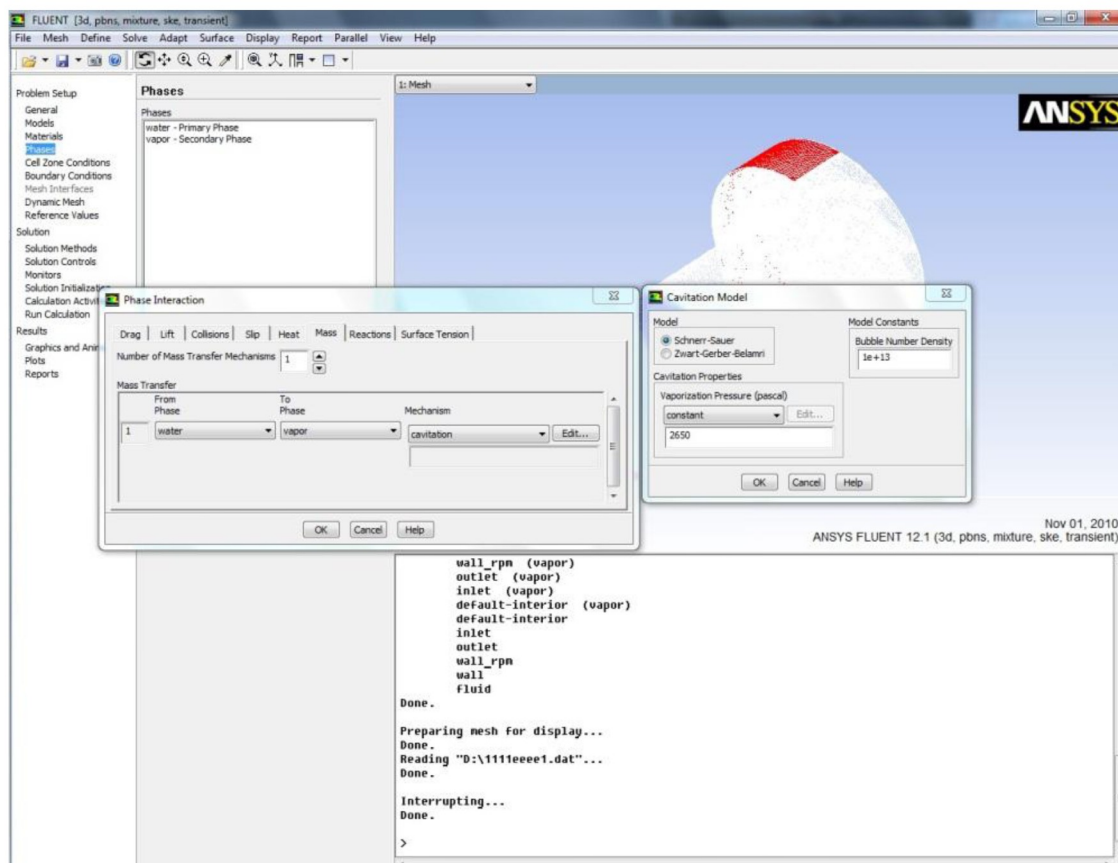


Рисунок 28 – Панель взаимодействия фаз (*Phase Interaction*)

1.2.6 Граничные условия

Первоначально следует войти в опцию *Cell Zone Conditions* (рисунок 29) и выполнить следующие действия, связанные с настройкой и учетом вращательным движением лопастей насоса:

- Rotation-Axis Direction - $X=0$, $Y=0$, and $Z=1$.
- Motion Type - Moving Reference Frame.
- Speed - 5600.

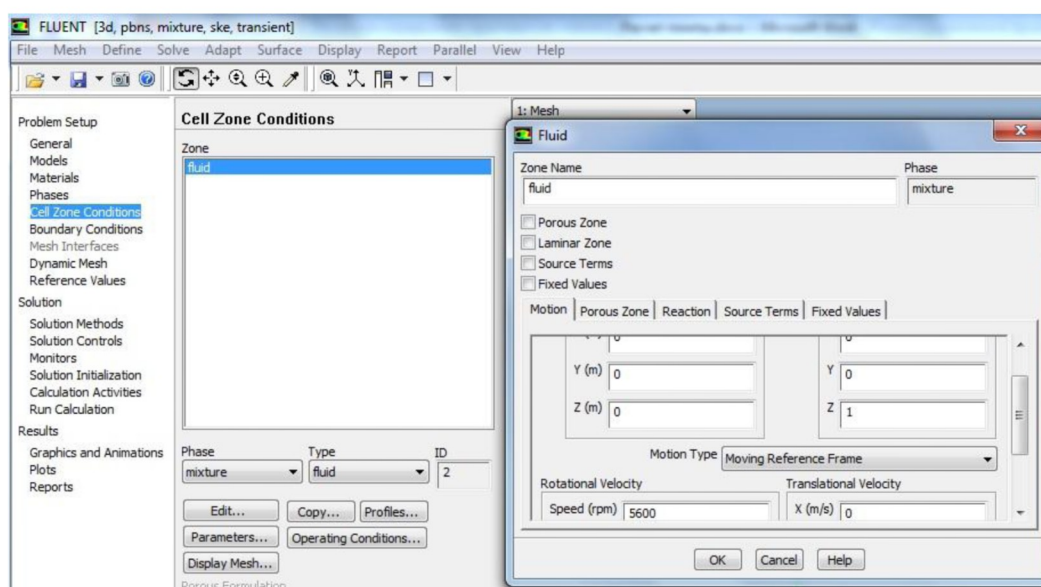


Рисунок 29 – Меню *Cell Zone Conditions*

Затем вызывается меню задания граничных условий (рисунок 30) вызывается командой:

ГМ: Define → Boundary Conditions

В поле *Zone* находится список всех граничных условий, определенных в *Gambit*. Если выбрать имя одного из них, например *inlet*, 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, и затем нажать *Edit...* После этого выполняются следующие действия:

1. Устанавливаются параметры для входного граничного условия (*inlet*), согласно рисунку 31:

- Velocity magnitude - 3;
- Velocity Specification method - Magnitude, Normal to Boundary;
- Turbulence Specification Method - Intensity and Hydraulic Diameter;
- Turbulence Intensity - 5;
- Hydraulic Diameter - 0.0366 (диаметр входного сечения).

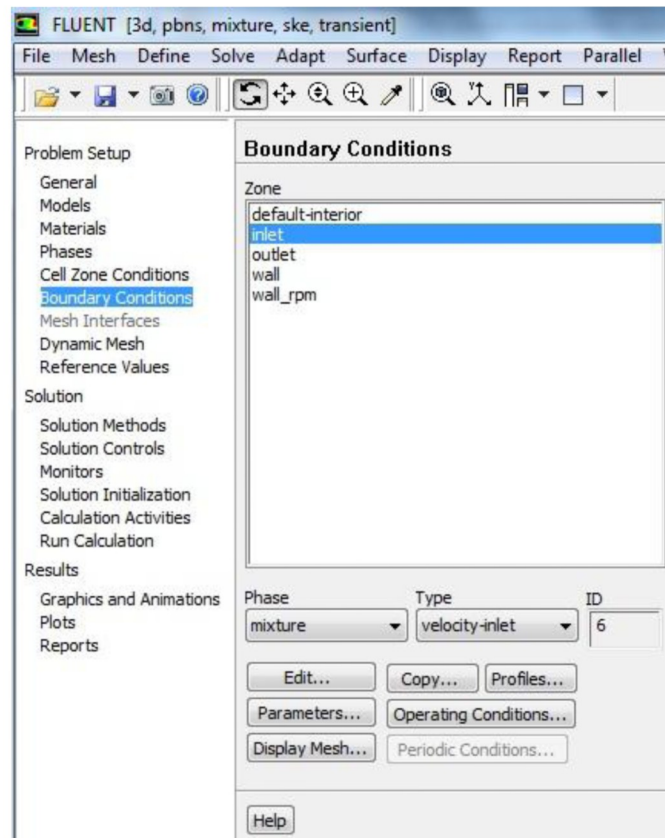


Рисунок 30 – Граничные условия (*Boundary Conditions*)

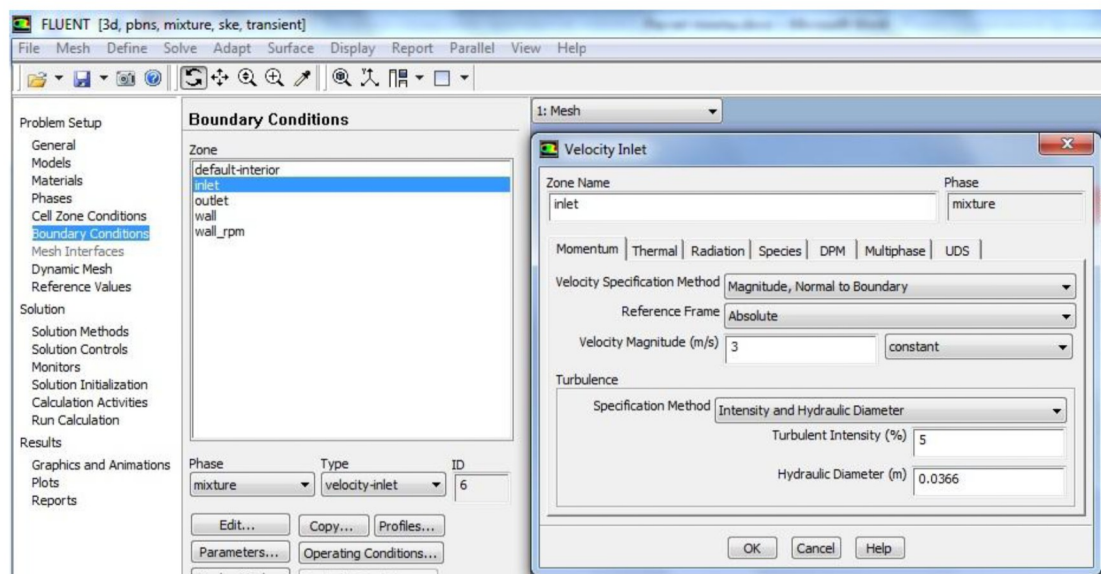


Рисунок 31 – Настройка граничных условий для входного сечения (*inlet*)

2. Затем проводятся настройки параметров выходного сечения (*outlet*), согласно рисунку 32:

- Gauge Pressure - 160000;
- Turbulence Specification Method - Intensity and Viscosity Ratio;
- Backflow Turbulence Intensity - 5;
- Backflow Turbulence Viscosity Ratio - 10.

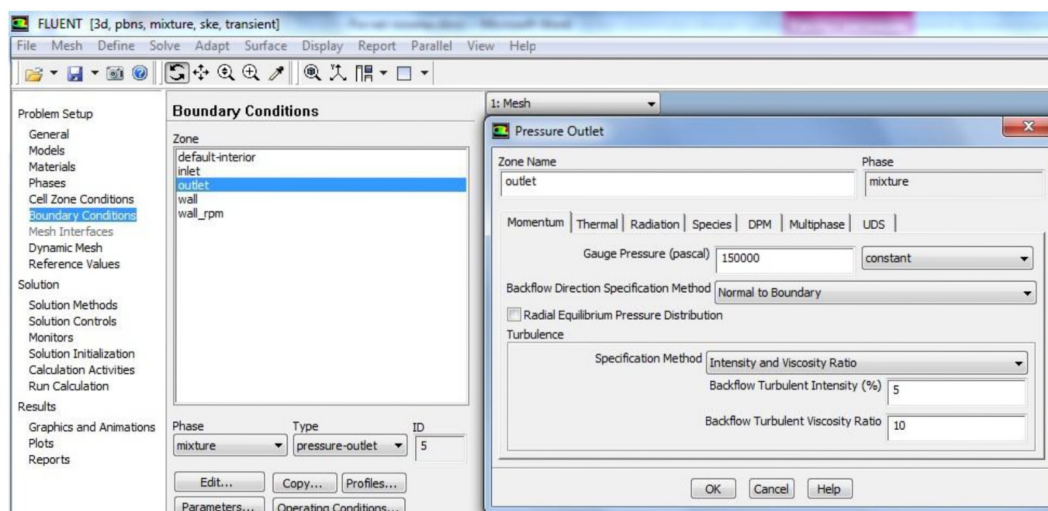


Рисунок 32 – Настройка граничных условий для выходного сечения (*outlet*)

3. Настройка параметров вращающихся элементов насоса *wall_rpm* осуществляется следующим образом (рисунок 33):

- В опции выбора движения стенки (*Wall Motion*) установить *Moving Wall*.
- В опции выбора типа движения стенки выбрать вращательный вид – *Rotational*.
- Выбрать направление вращения по оси Z (в окне *Rotation-Axis Origin* установить 0 для данной оси, а в окне *Rotation-Axis Direction* для данной оси установить значение 1), а для скорости установить значение, равное 0.

4. Настройка параметров стационарных стен насоса *wall* осуществляется следующим образом (рисунок 34):

- В опции выбора движения стенки (*Wall Motion*) установить *Moving Wall*.
- В опции выбора типа движения стенки выбрать *Absolute and Rotational*.
- Выбрать направление вращения по оси Z (в окне *Rotation-Axis Origin* установить 0 для данной оси, а в окне *Rotation-Axis Direction* для данной оси установить значение 1), а для скорости установить значение, равное 0.

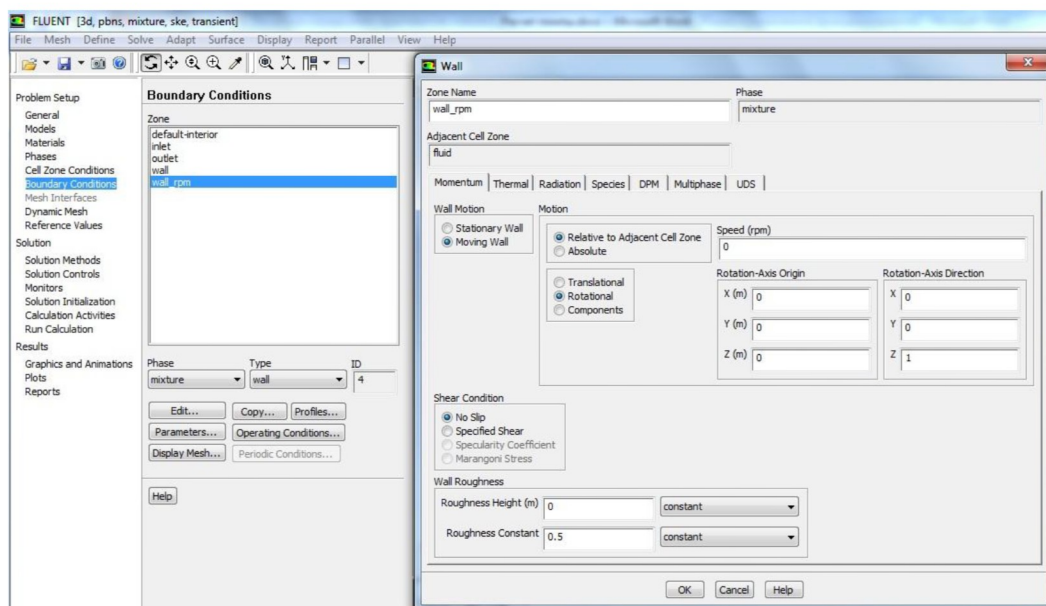


Рисунок 33 – Настройка граничных условий вращающегося рабочего колеса насоса

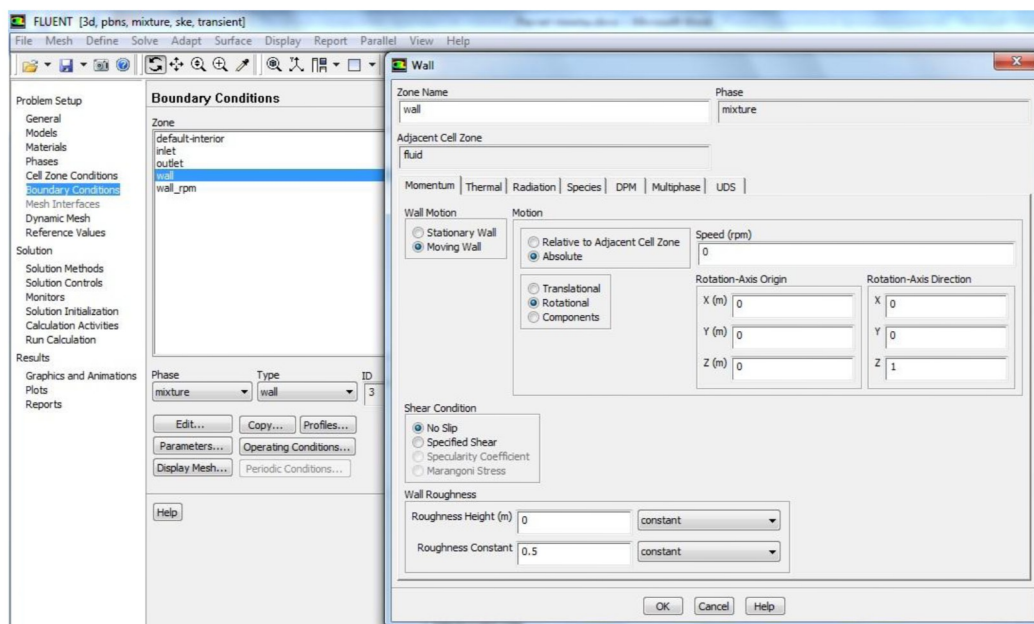


Рисунок 34 – Настройка граничных условий неподвижных стенок насоса

1.2.7 Настройка процесса решения задачи без кавитации

1. Установка параметров расчета

Доступ к меню установки параметров расчета осуществляется с помощью команды:

ГМ: Solve → Solution Methods

В результате на экране появится меню *Solution Methods* (рисунок 35).

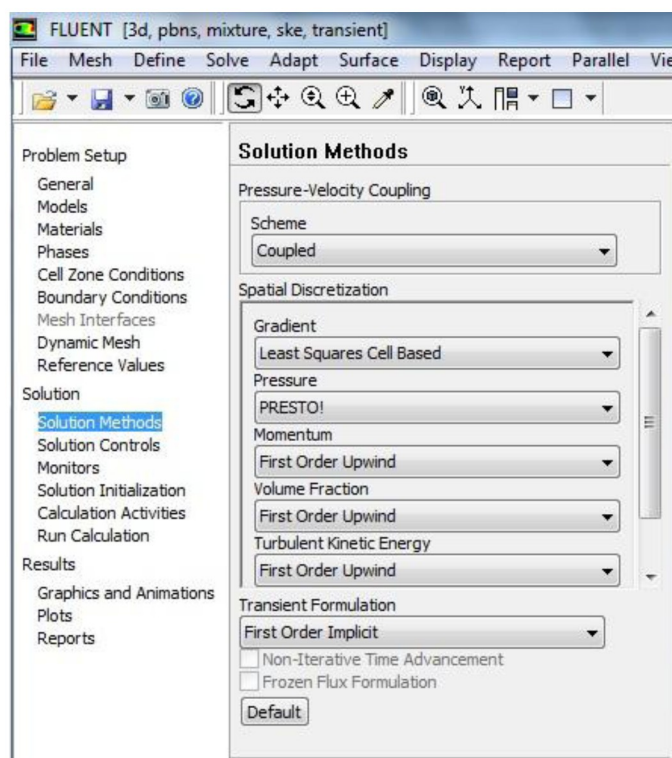


Рисунок 35 – Настройка параметров расчета (*Solution Methods*)

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).

2. Установить факторы релаксации, как показано на рисунке 36 с помощью команды:

FM: Solve → Solution Controls

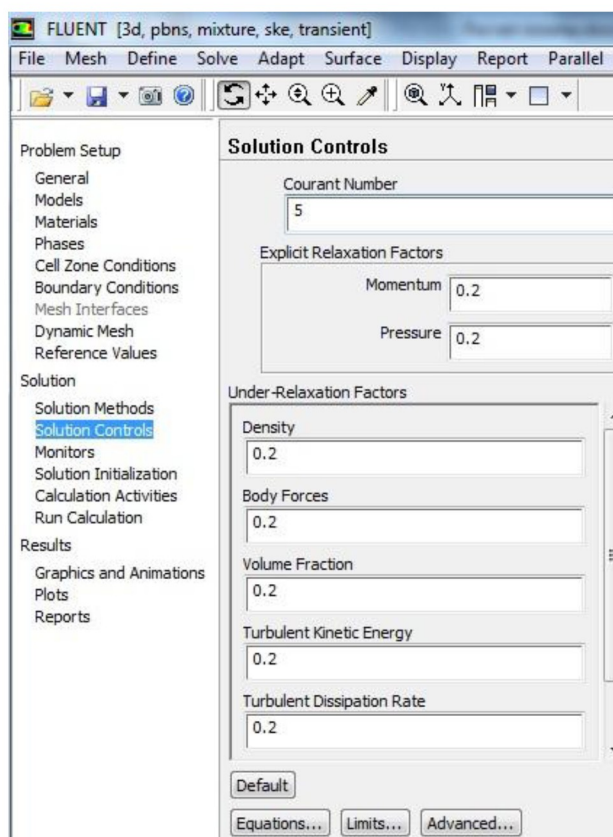


Рисунок 36 – Меню настройки контроля процесса расчета (*Solution controls*)

Для улучшения устойчивости и сходимости число Куранта (*Courant number*) уменьшить до 5 в окне меню *Solution Controls*.

В области настройки параметров *Under-Relaxation Factors* задаются коэффициенты релаксации при решении соответствующих уравнений.

Уменьшение коэффициентов улучшает сходимость решения, но заметно увеличивают время счета. Снижение коэффициента релаксации широко применяется при проблемах с запуском расчета задачи, но их выбор требует определенного опыта.

3. 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 37) вызывается командой:

ГМ: Solve → Solution Initialization

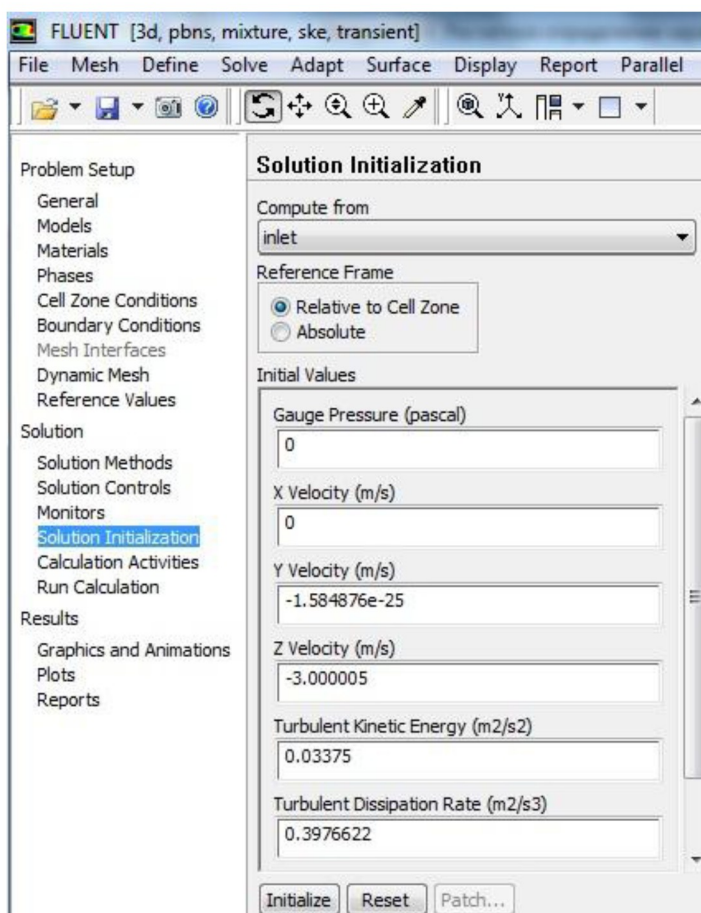


Рисунок 37 – Инициализация процесса расчета (*Solution Initialization*)

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*.

4. Настройка отображения процесса решения.

Для того, чтобы отображать невязки в процессе расчета, а также задать критерий остановки решения, необходимо вызвать меню *Residual Monitors* (рисунок 38) с помощью команды:

ГМ: Solve → Monitors → Residual Monitors

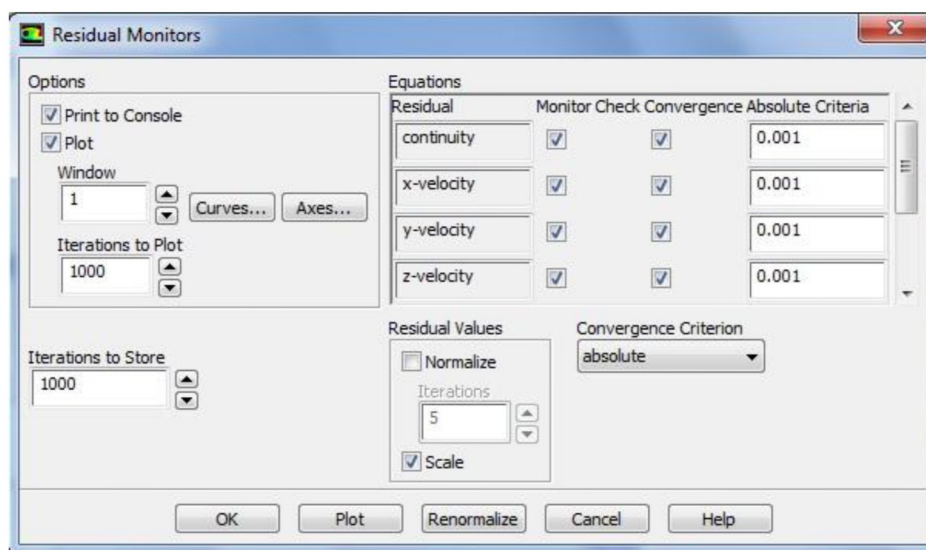


Рисунок 38 – Настройка отображения процесса решения (*Residual Monitors*)

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. Изменение разности расходов между входной и выходной границей в процессе решения можно визуализировать. Для этого нужно вызвать команду:

ГМ: Solve → Monitors → Surface.

Появится меню, изображенное на рисунке 39.

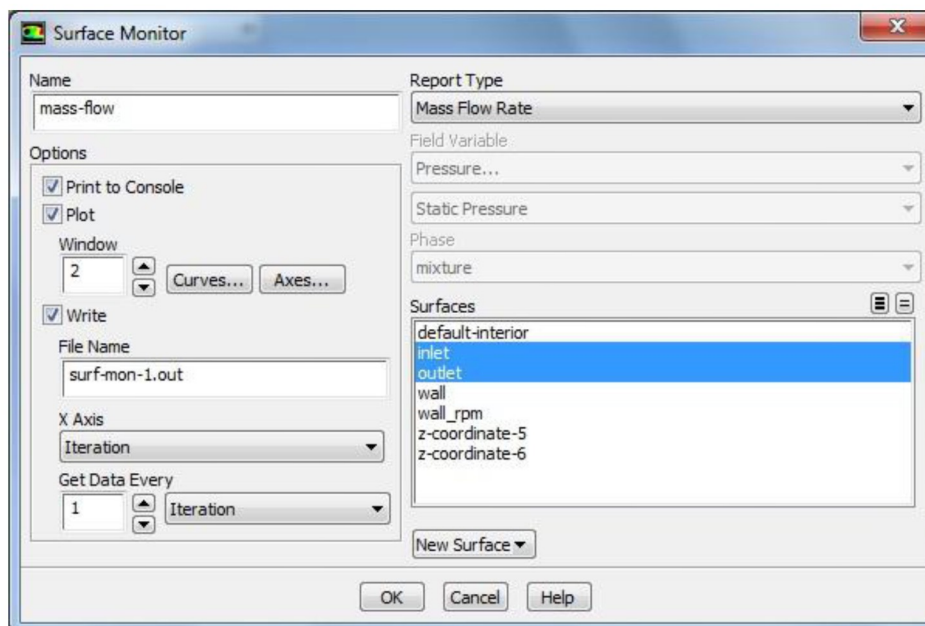


Рисунок 39 – Меню визуализации процесса расчета (*Surface Monitors*)

Далее в данном меню выполняются следующие действия:

- активировать *Plot*, *Print* и *Write* для *Surface Monitors*;
- ввести число два в окно *Window* (создать второе окно для отображения данных);
- определить параметр наблюдения в окне №2 – массовый расход:
 - в ниспадающем меню *Report Type* выбрать *Mass Flow Rate*;
 - в области *Surface* выбрать *Inlet and Outlet*.

5. Далее необходимо исключить из расчета процесс кавитации:

ГМ: Define → Phases...

После этого следует нажать кнопку *Interaction*, для того чтобы открыть панель взаимодействия фаз и в ней во вкладке *Mass* выключить кавитацию

6. Для сохранения расчетной модели и всех сделанных настроек решателя необходимо вызвать команду:

ГМ: File → Write → Case.

В появившемся окне проводника необходимо выбрать место, где будет сохранена модель и ее имя. После нажатия кнопки *OK* в указанном месте появится файл модели с расширением **.cas*.

7. Запускаем расчет для 1000 итераций с помощью следующих действий (рисунок 40):

ГМ: Solve → Run Calculation

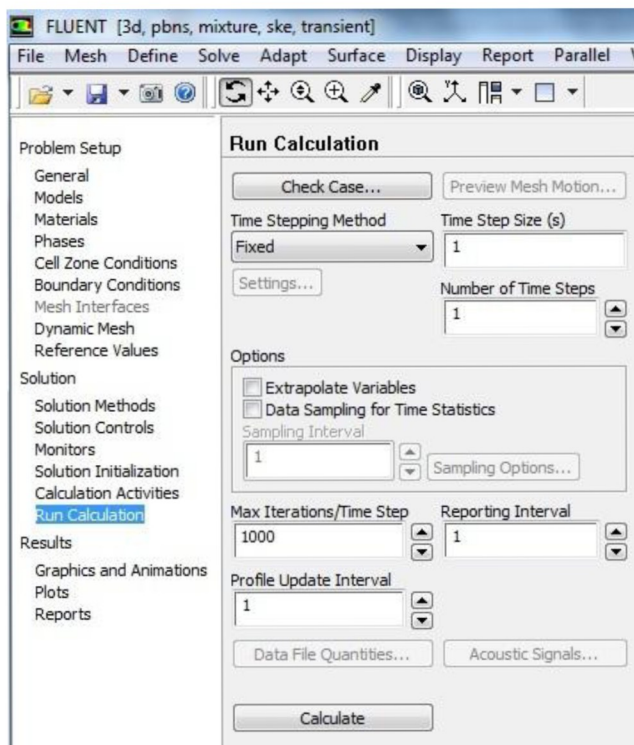


Рисунок 40 – Запуск процесса расчета (*Run Calculation*)

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 10 000. Для более быстрой сходимости можно уменьшить под релаксационные факторы до 0.1.

8. Сохраняем *case* и *data* файлы.

1.2.8 Обработка результатов расчета без кавитации

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 41). 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 *Fluent*. Аналогичным образом, определяется параметр при определении среднеинтегральных значений. В поле *Surfaces* задаются поверхности, на которых строятся поля распределений параметров. В случае, если в этом окне ничего не выбирать, то поле будет построено по всей расчетной области.

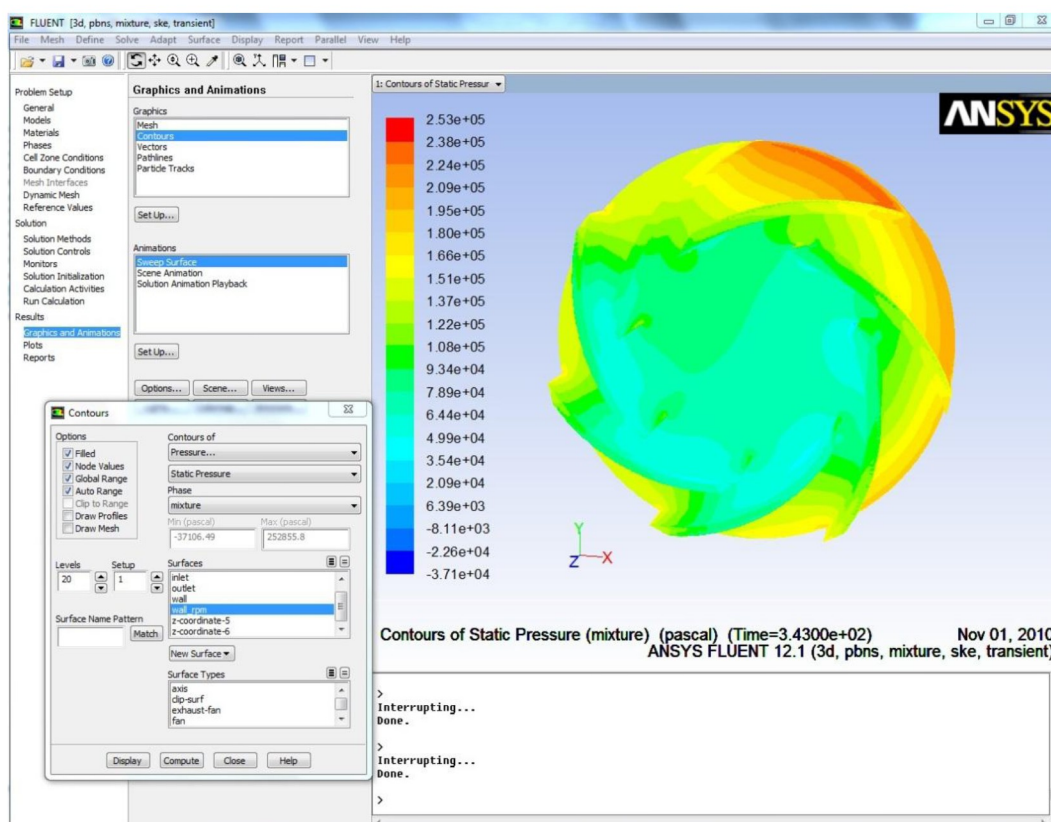


Рисунок 41 – Отображение полей статического давления (*Contours*)

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 42) 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 $Z = 0.002935$ для *Iso-Values* (Изо-Значение).
- Затем нажимается кнопка *Create* (Создать).

Аналогично создаются другие плоскости сечения.

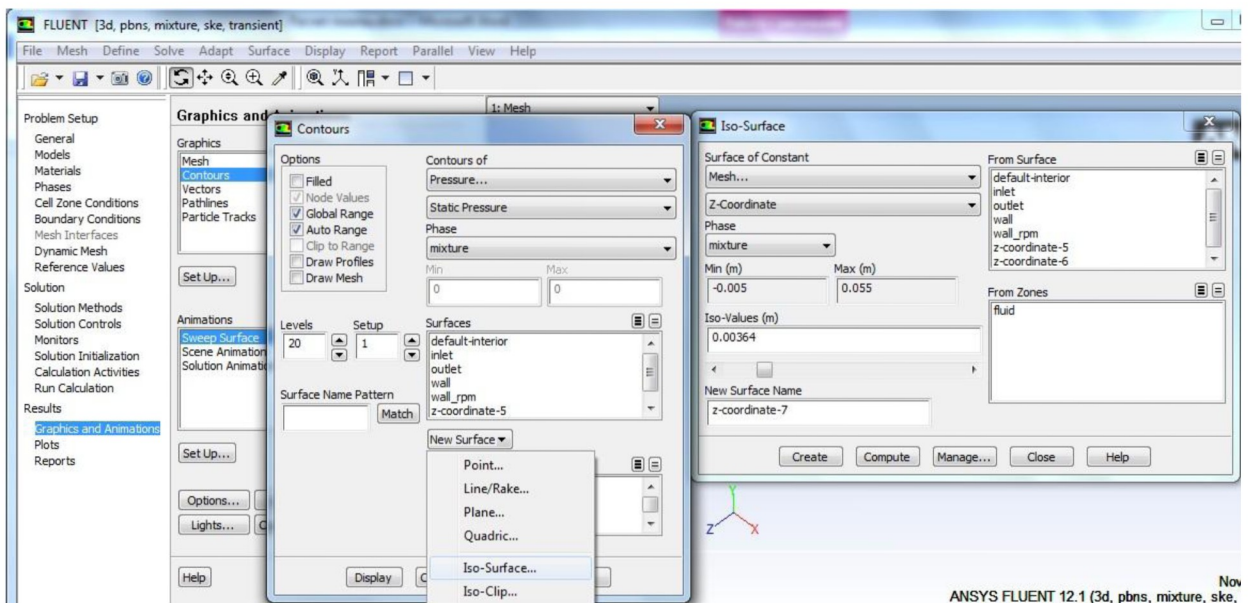


Рисунок 42 – Создание вспомогательной плоскости (*Iso-Surface*)

После этого проводится визуализация векторов скоростей в расчетной области. Для этого необходимо запустить команду:

FM: Display → *Vectors*.

В результате ее выполнения появится меню *Vectors*. В этом меню в поле *Surfaces* нужно выбрать поверхность или границу, где необходимо отобразить векторы. В зоне *Color by* задается закономерность окраски векторов (рисунок 43). Цвет вектора в каждой точке расчетной области будет соответствовать величине параметра, определенного в зоне *Color by*. Если размеры векторов окажутся маленькими, их можно увеличить, задав большее число в поле *Scale* (рисунок 44).

Если векторов будет слишком много и они будут мешать анализу результатов, то их количество можно уменьшить, задав в поле *Skip* число, отличное от нуля. Это число определяет, сколько векторов не будет отображаться. Например, если в поле *Skip* стоит число 2, то это значит, что два из трех векторов не будут показаны в графическом окне.

1.2.9 Решение задачи с учетом процесса кавитации

1. Включить настройку решателя, учитывающую процесс кавитации в потоке (п. 1.2.5).
2. Запустить расчет для 1000 итераций (п. 1.2.7).
3. Сохранить *Case* и *data* файлы.

Обработка результатов расчета с кавитацией производится аналогично п. 1.2.8. На рисунках 45 и 46 представлены результаты расчета.

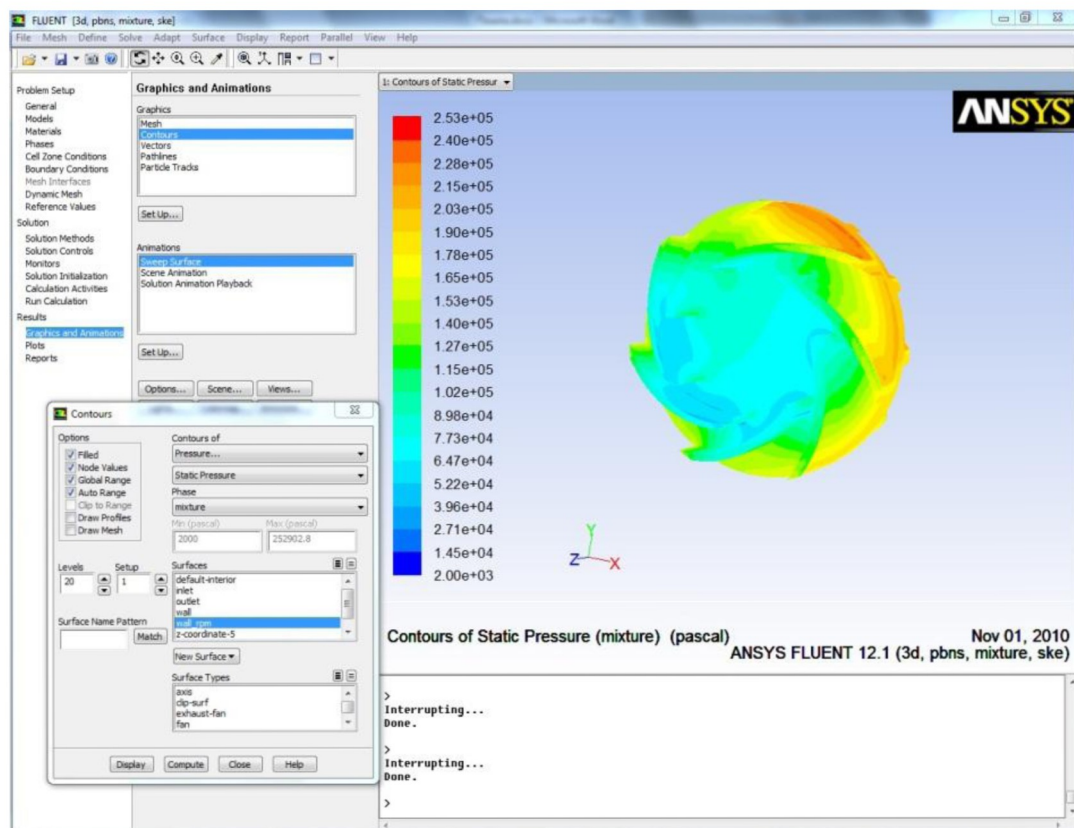


Рисунок 45 – Отображение полей статического давления в сечение *Wall_rpm*

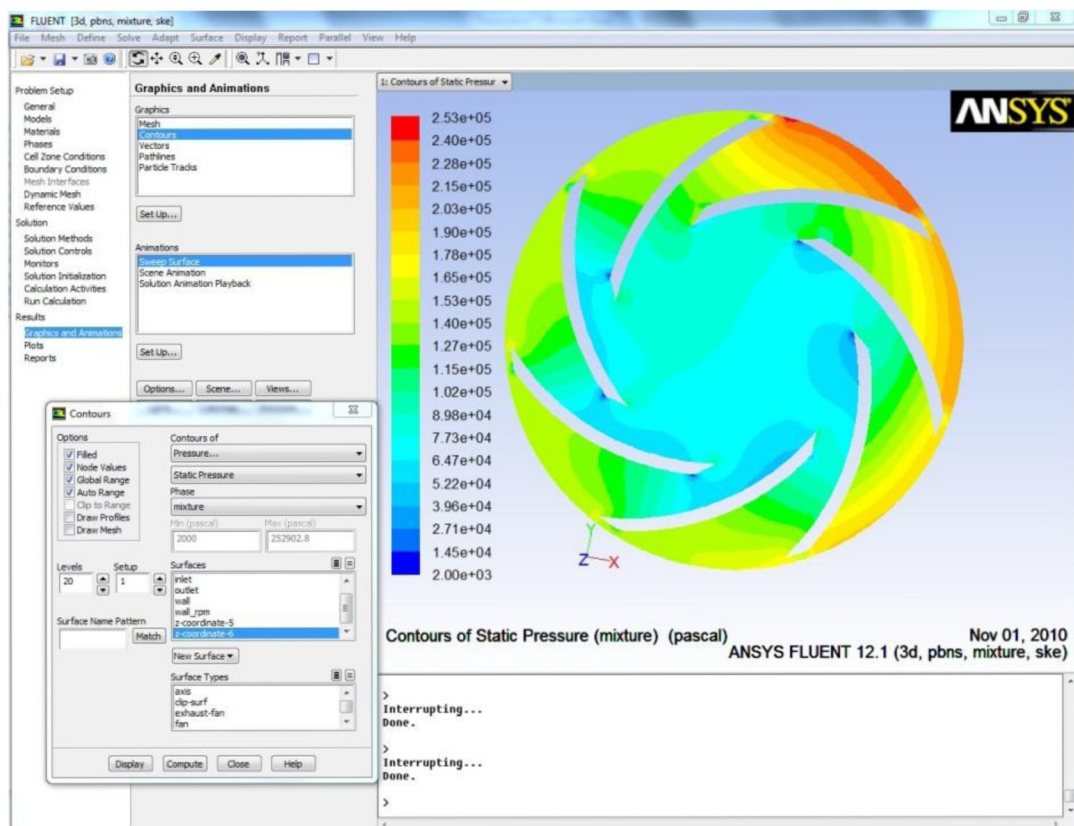


Рисунок 46 – Статическое давление в межлопаточных каналах крыльчатки насоса (сечение *z-coordinate-6*)

Затем следует отобразить контуры объемной доли фазы-2 (водяного пара) на рабочем колесе насоса (рисунок 47). Для этого в поле *Contours of* в верхнем ниспадающем списке выбирается группа *Phases*, а в нижнем списке выбирается *Vapor*.

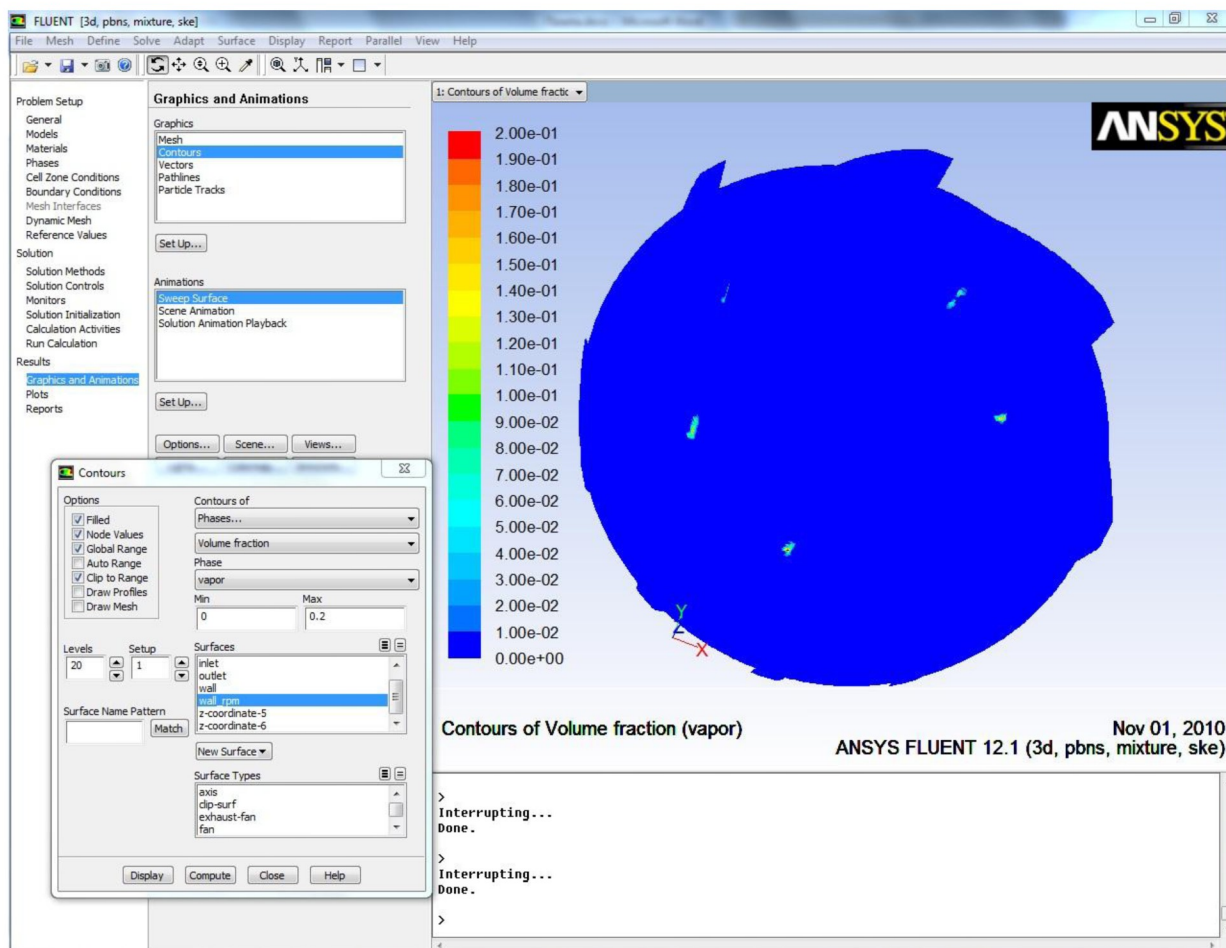


Рисунок 47 – Объемная доля водяного пара на кромке рабочего колеса

Примечание: Из последнего рисунка видно, что в данном случае кавитация не значительна. Уровнем кавитации можно управлять с помощью величины давления на выходе. Для увеличения скорости парообразования и, следовательно, размера парового пузырька, необходимо уменьшить давление на выходе до желаемого уровня.

2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННИКА СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДВС

Для решения данной задачи с помощью программы *Fluent* сначала строится двухмерная модель трубки трубчато – ленточного радиатора. Затем проводится моделирование течения охлаждающей жидкости на данном участке теплообменника, на котором находится значение коэффициента теплопередачи для данной конструкции. Затем на трехмерной модели остова радиатора происходит численное моделирование тепловых процессов для данной выбранной заранее конструкции теплообменника.

Первоначально выполняется построение модели. Для решения этой задачи удобно использовать различные графические редакторы (*Solid Works*, *Unigraphics*, *Компас*). Двухмерная модель представляет собой две соседние трубки, соединенные вместе, между которыми находится лента оребрения. Проводим построение участков трубок длиной около половины всей длины (рисунок 48).

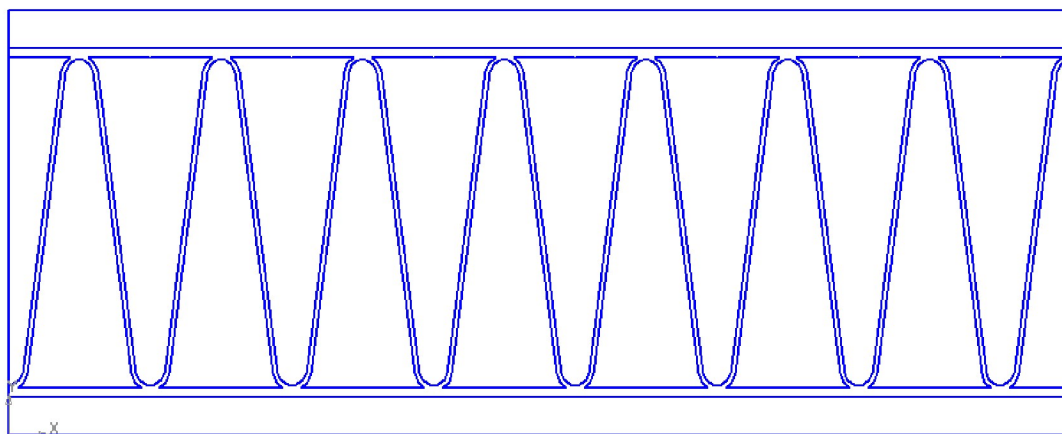


Рисунок 48 – Общий вид двухмерной модели

Трехмерная модель представляет собой остов радиатора без оребрения с бочками, подводящим, отводящим каналами (рисунок 49). Далее модель импортируется в *Gambit*, где выполняются с ней дополнительные построения, она разбивается сеткой и задаются граничные условия.

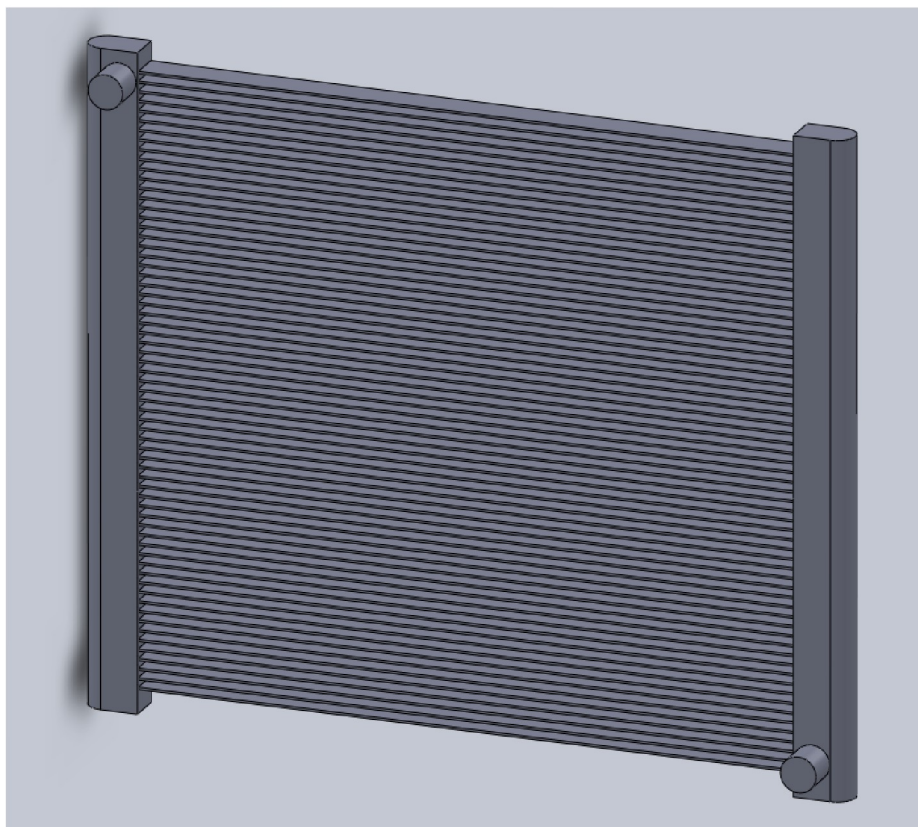


Рисунок 49 – Общий вид трехмерной модели

Для импорта в *Gambit* необходимо в названии модели использовать только латинские буквы или цифры, предпочтительным форматом записи для файлов является *Parasolid.x_t*.

2.1 Построение 2D модели теплообменника

1. Запускается предпроцессор *Gambit*. При этом необходимо при выполнении данной процедуры выбрать рабочую папку и нажать кнопку *Run* (рисунок 50).

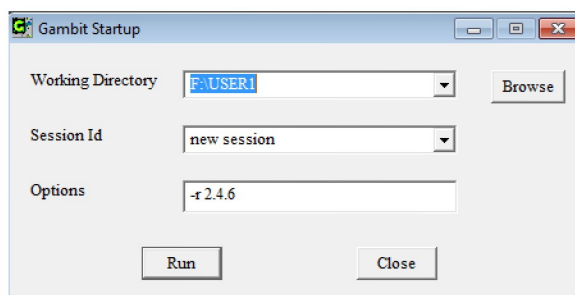


Рисунок 50 – Запуск предпроцессора *Gambit*

2. Затем импортируется готовая модель в препроцессор *Gambit*:

File → *Import* → *Parasolid*

Выбирается файл, например, *radiator2d.x_t*, а затем нажимается кнопка *Accept* (рисунок 51).

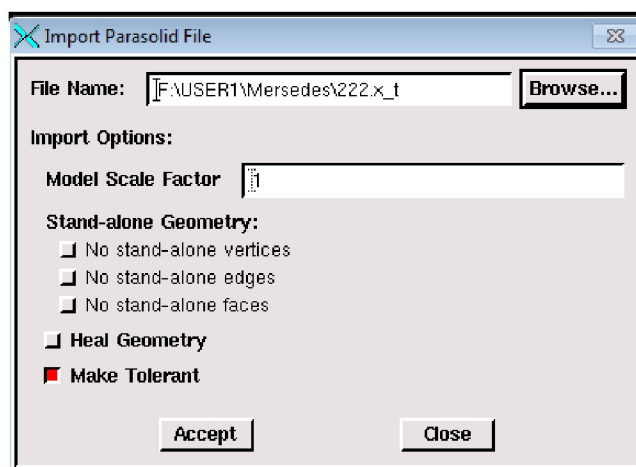


Рисунок 51 – Процесс импортирования модели в предпроцессор *Gambit*

3. Объединение четырех внешних линии в поверхность.

Для выполнения данного действия выбирается меню *Create Face from Wireframe*, а затем, удерживая клавишу *SHIFT*, поочередно выбираются 4 внешних линии и нажимаем *Apply* (рисунок 52).

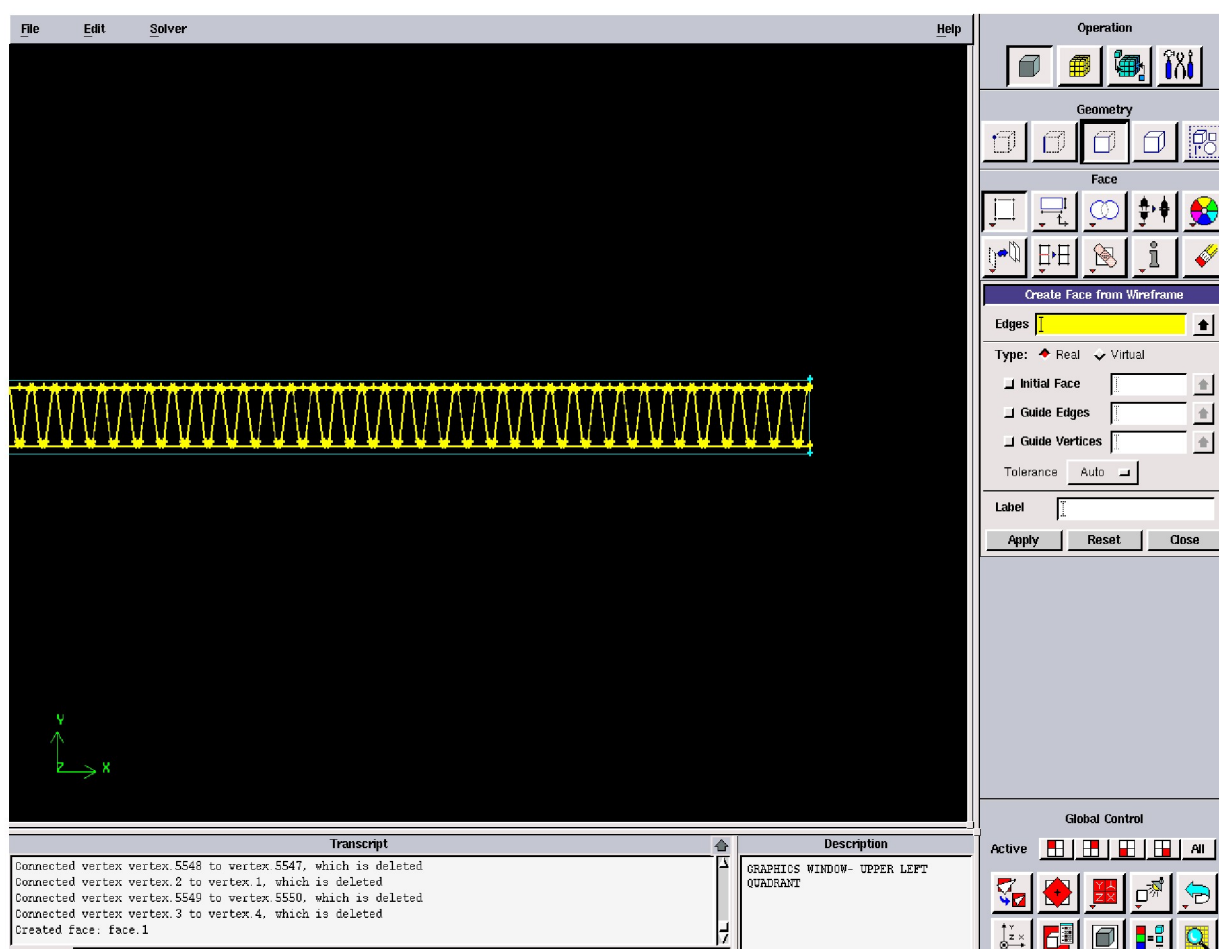


Рисунок 52 – Процесс объединения четырех внешних линии в поверхность

4. Процесс разделения созданной поверхности линиями.

В меню выбираем *Split Face*. В поле *Face* указывается созданная поверхность (не забывая нажать *SHIFT*), выбирается *Split with* → *edge*, а затем в поле *Edges* отмечается линия по стрелке 1 и нажимается кнопка *Apply* (рисунок 53). Данная операция повторяется, при этом разделяется большая из образовавшихся поверхностей линией по стрелке 2.

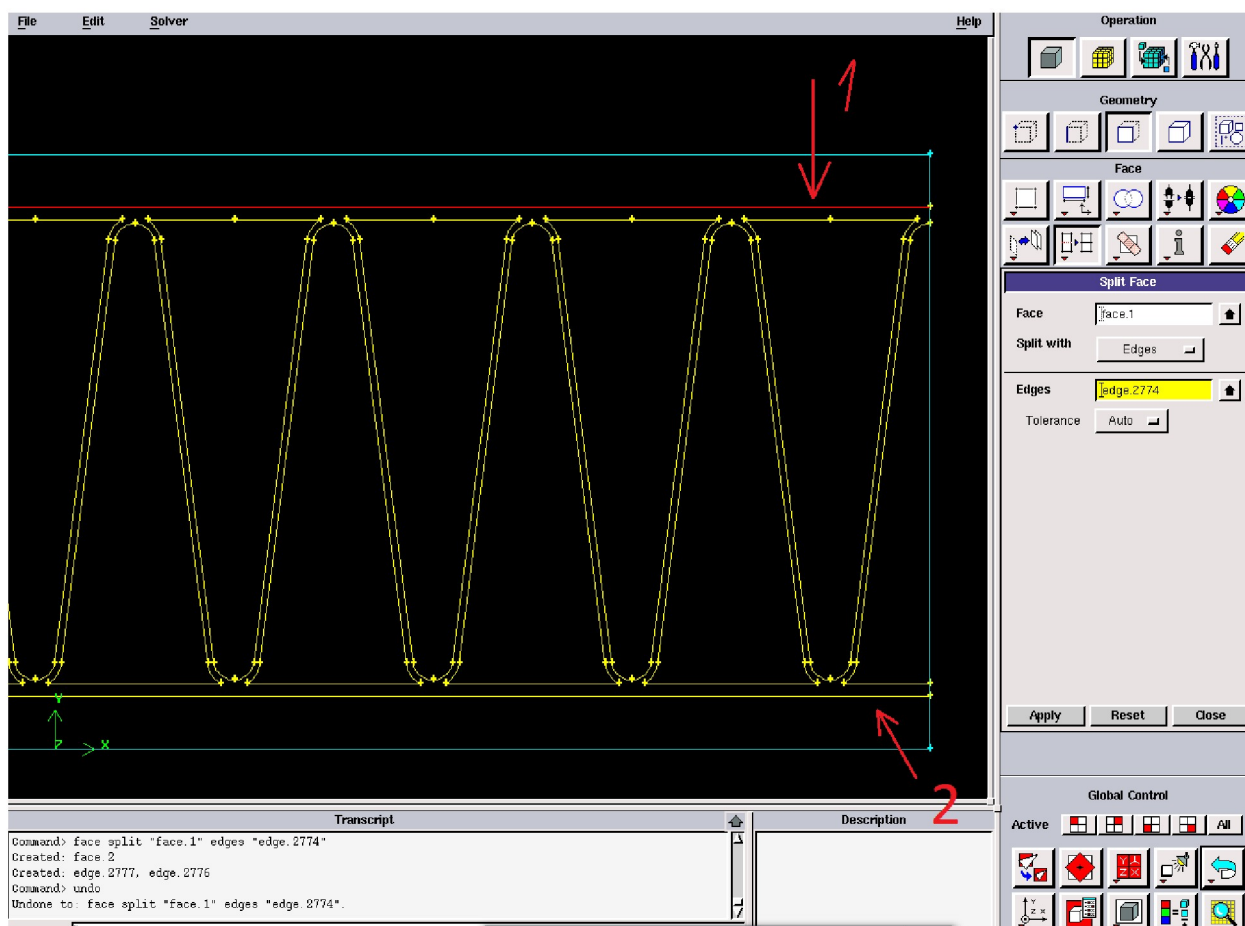


Рисунок 53 – Процесс разделения созданной поверхности линиями

5. Дополнительное построение двух линий.

Выбирается меню *Create Straight Edge*, а затем также отмечаются последовательно две точки, как показано на рисунке 54 слева, и затем нажимается кнопка *Apply*. Затем создается еще одна линия, выбираются точки, выделенные на рисунке 54 справа.

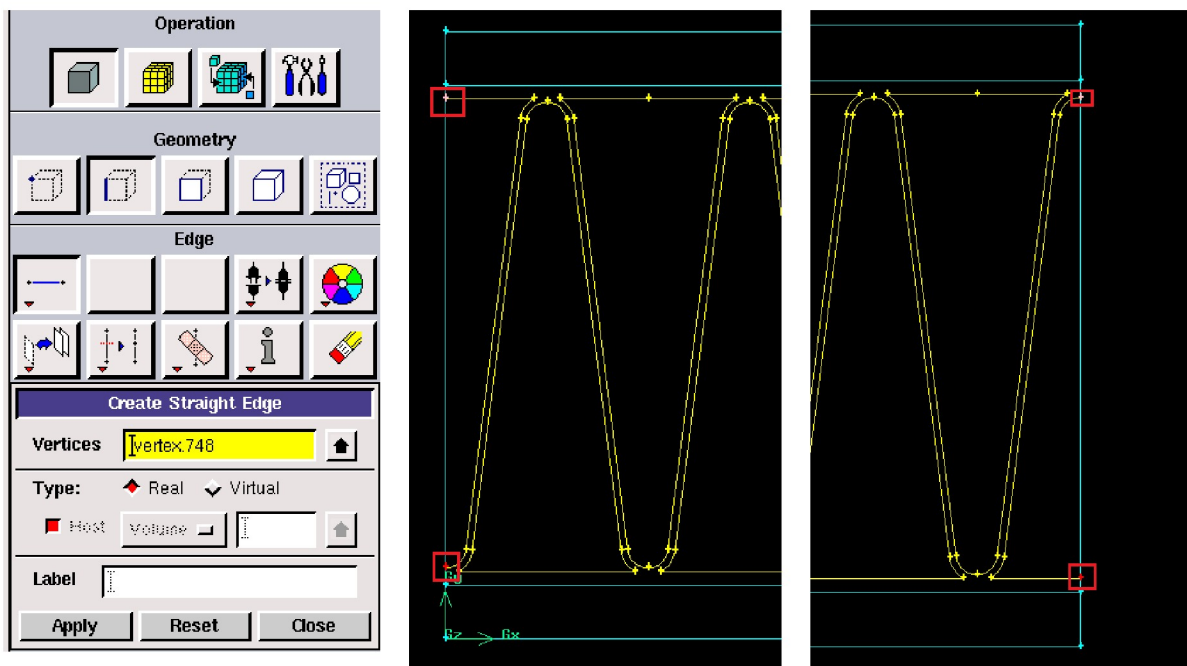


Рисунок 54 – Дополнительное построение двух линий

6. Создание вспомогательной поверхности.

Открывается меню *Create face* из *Wireframe* и выбираются линии, образующие замкнутый контур, как показано на рисунке 55, и нажимается кнопка *Apply*. Далее строятся еще три поверхности, при этом выбираются соответствующие линии, показанные на рисунках 56.

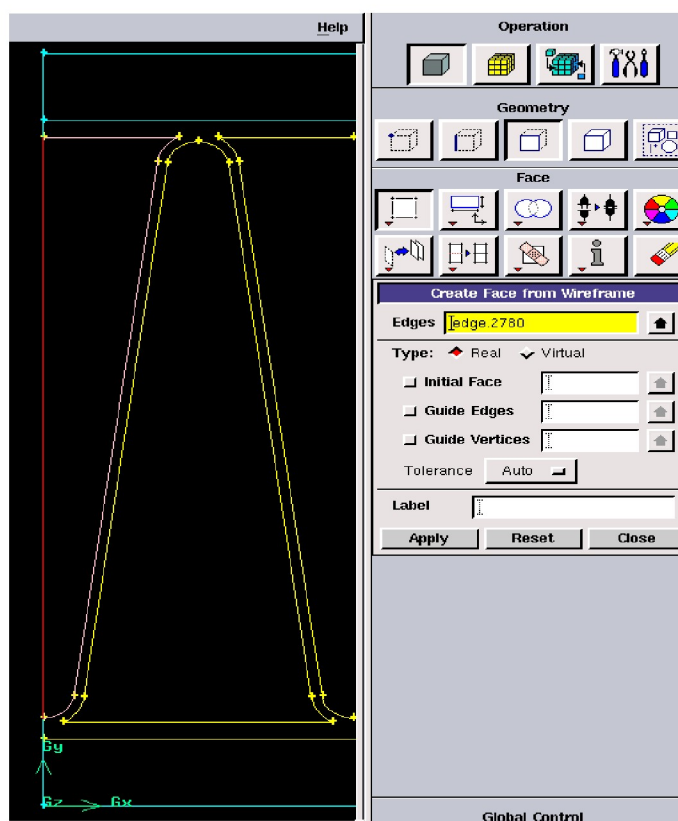


Рисунок 55 – Дополнительное построение вспомогательной поверхности

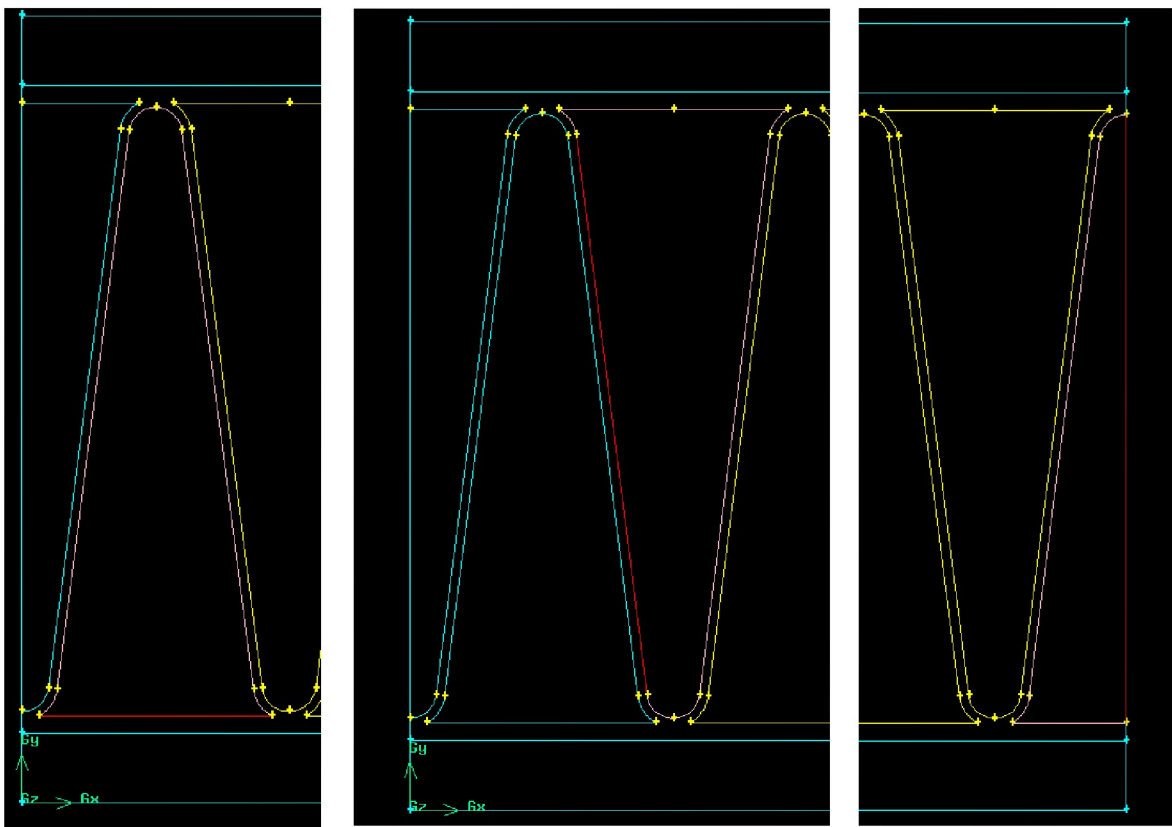


Рисунок 56 – Дополнительное построение вспомогательной поверхности

7. Удаление линий.

Для выполнения удаления открывается меню *Delete Edges* и выделяется полностью вся модель и нажимается кнопка *Apply* (рисунок 57). После этого будут удалены все лишние линии, не объединенные в поверхности.

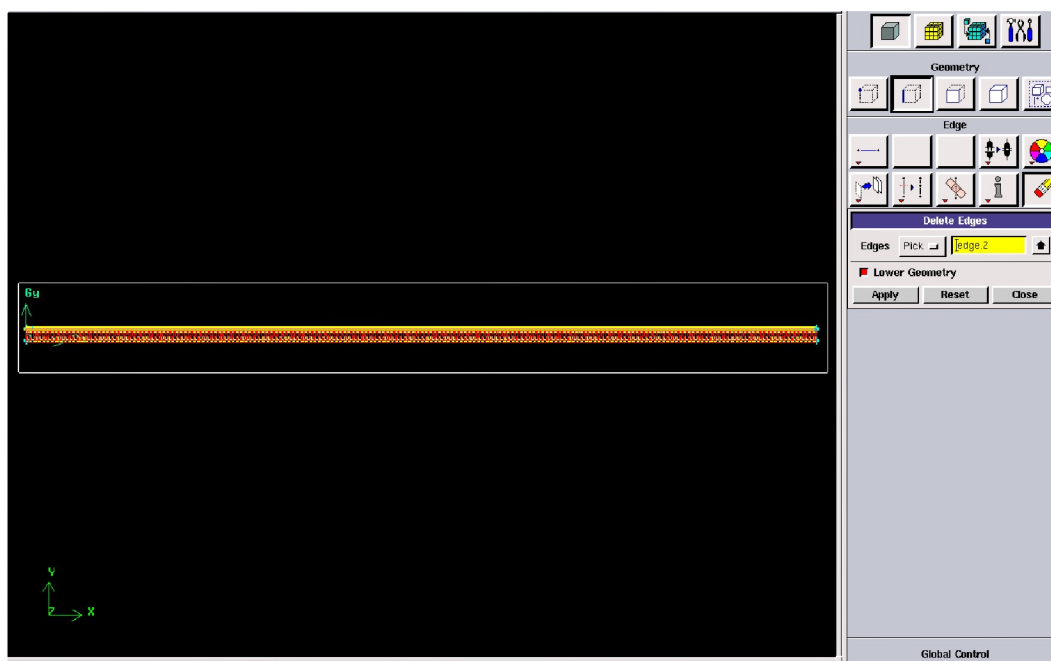


Рисунок 57 – Процесс удаление линий

8. Копирование вспомогательных поверхностей.

Выполнение данного действия требует активизации меню *Move/Copy Faces*, в котором выбираются две поверхности (рисунок 58). Затем ниже выбирается опция *Copy* и вводится число копий 182, в поле *Global* устанавливается шаг по оси X, равный 3, и затем нажимается кнопка *Apply*.

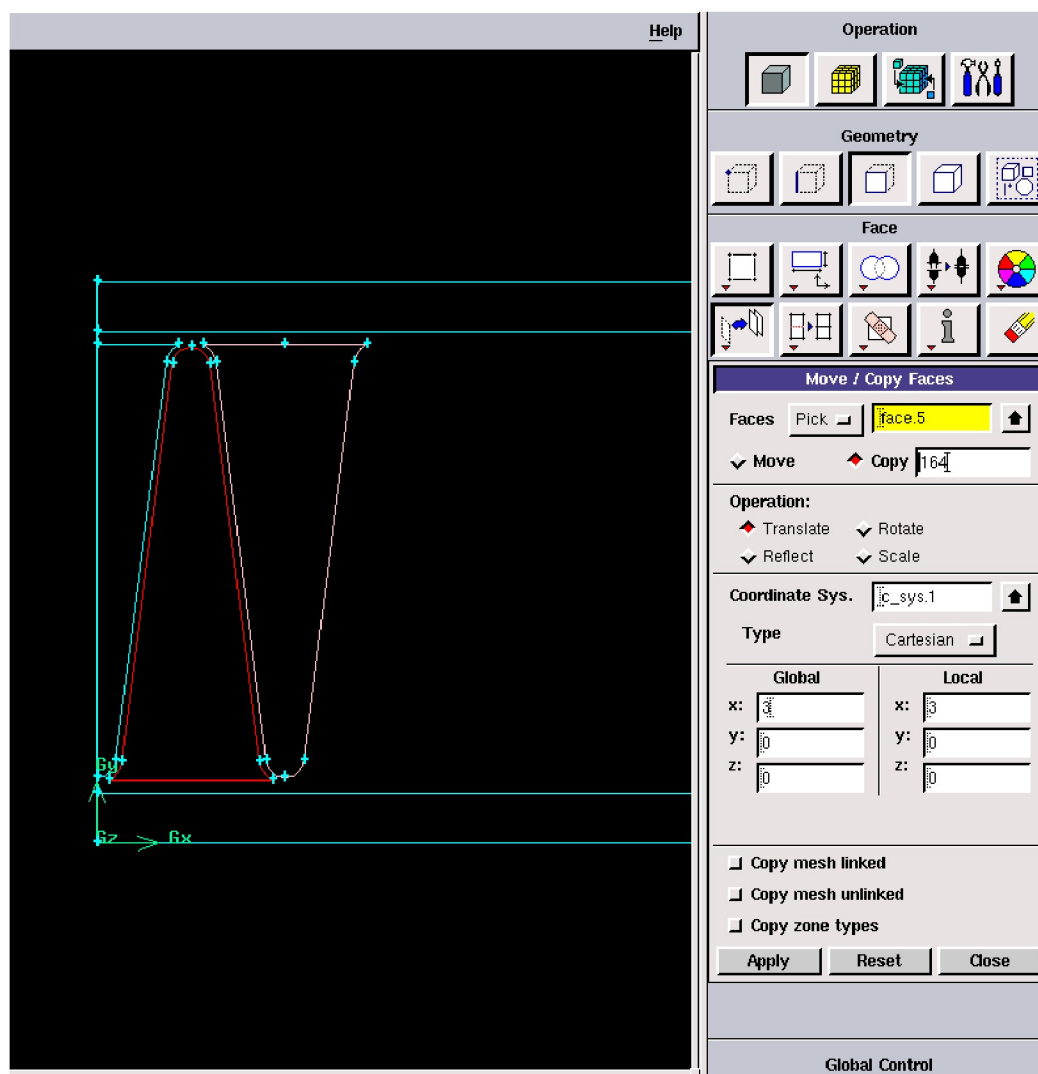


Рисунок 58 – Процесс копирования поверхностей

9. Разделение средней поверхности вспомогательными поверхностями.

Открывается меню *Split Face*, а затем в поле *Face* выбирается средняя поверхность, выбирается опция *Split with* → *Faces* и в ней в поле *Faces* выбираются все внутренние вспомогательные поверхности в форме скругленных треугольников и их половинок (рисунок 59). Необходимо также активизировать функцию *Connected*. После выполнения всех вышеуказанных настроек нажимается кнопка *Apply*.

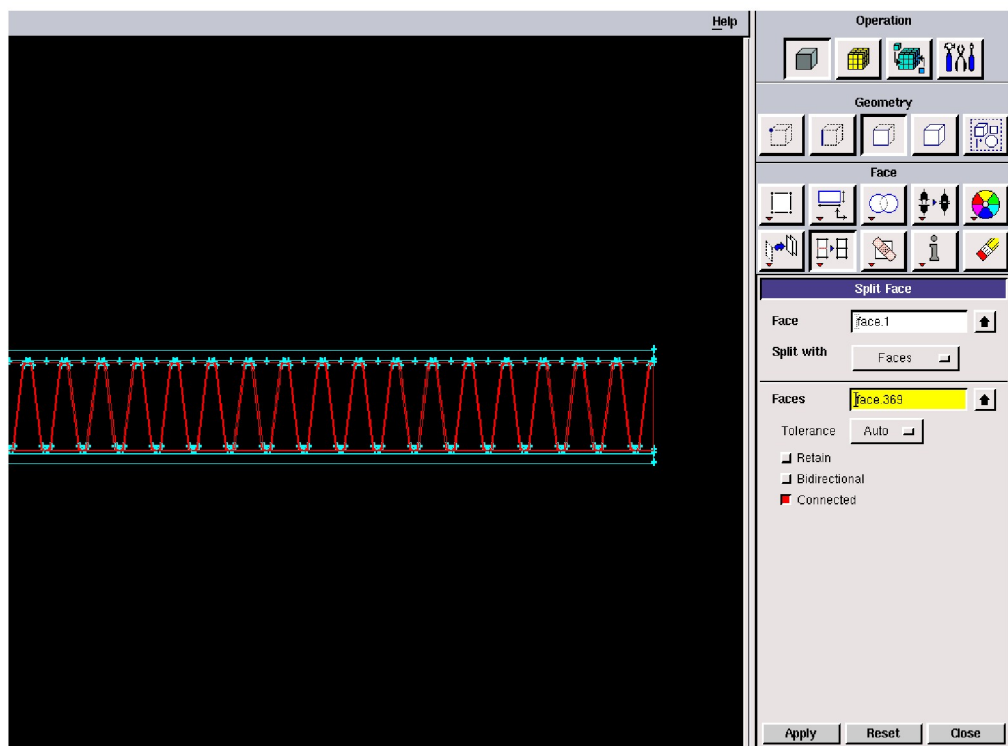


Рисунок 59 – Процесс разделения средней поверхности вспомогательными поверхностями

10. Объединение линий для одинакового разбиения сеткой (рисунок 60).

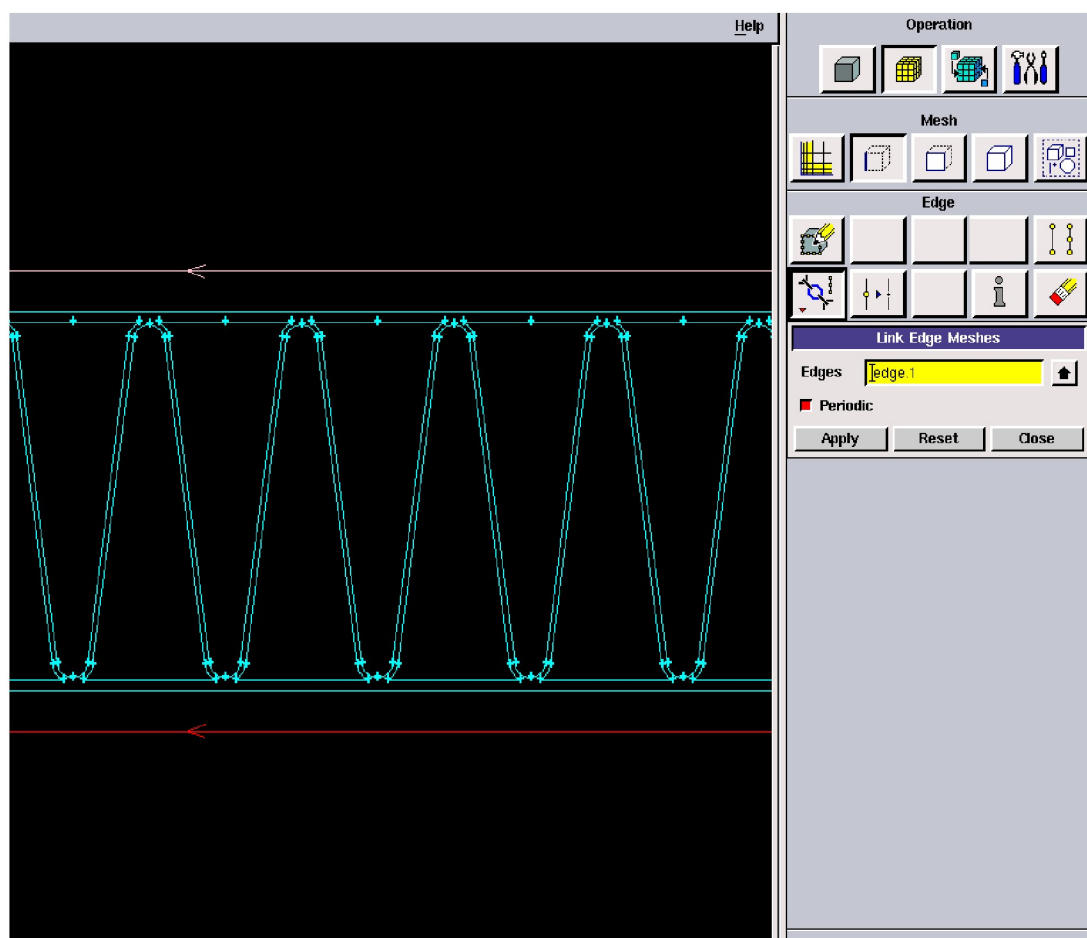


Рисунок 60 – Процесс объединение линий

Для выполнения данного действия открывается меню *Link Edge Meshes*, затем выбирается верхняя и нижняя линии (рисунок 60). Для выполнения процесса объединения нажимается кнопка *Apply*.

11. Построение сетки.

Разбиение модели на элементарные ячейки осуществляется следующим образом: открывается меню *Mesh Faces*, выбираются поверхности, показанные на рисунке 61. В поле *Spacing* устанавливается размер ячейки равный 0.1 (Важно ставить именно знак точки «.»), в поле *Elements* выбирается *Quad*, в поле *Type* – *Map*. Для выполнения процесса наложения сетки нажимается кнопка *Apply*.

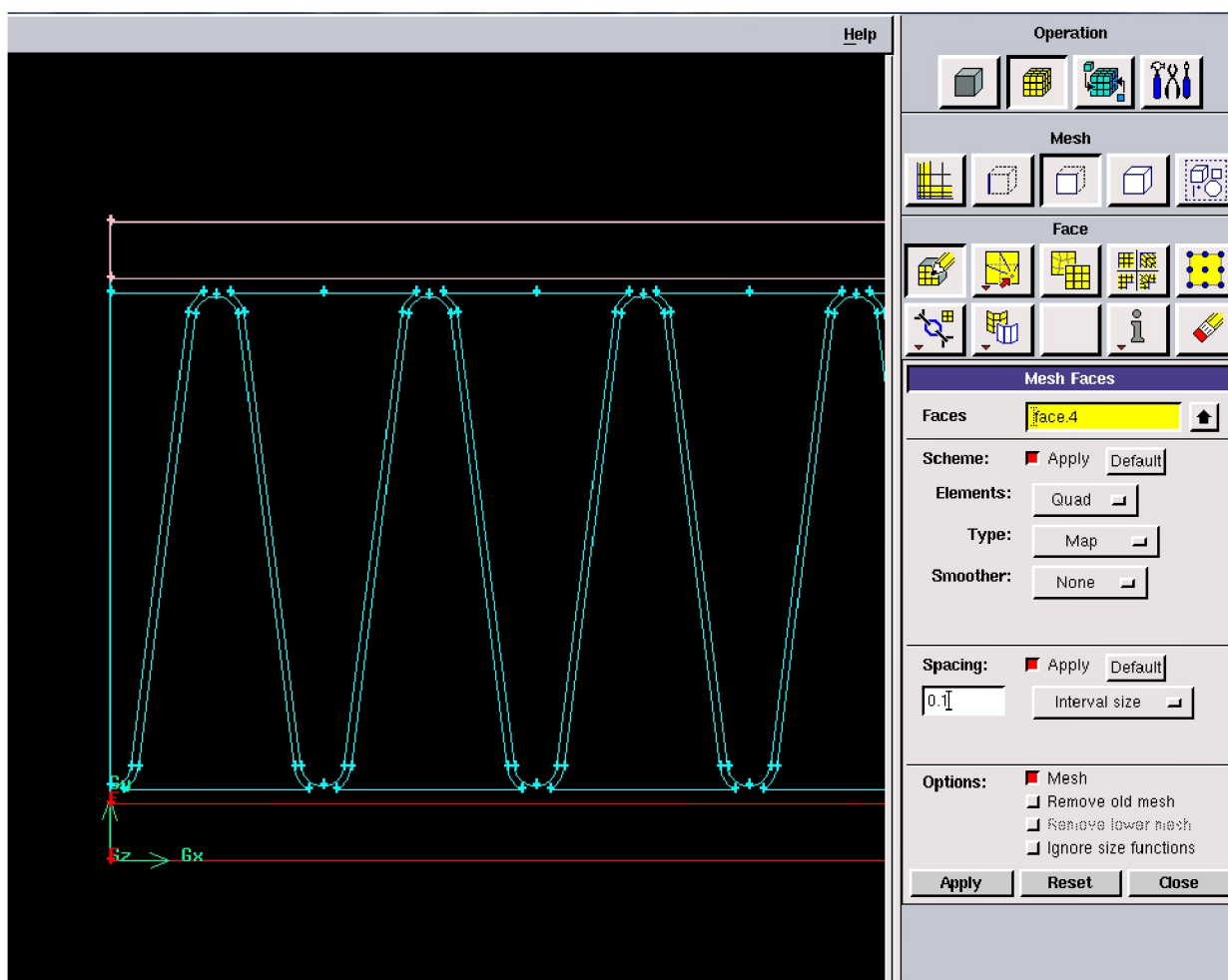


Рисунок 61– Процесс настройки параметров сетки

12. Построение основной сетки

Перед выполнением данного действия рекомендуется сохранить модель следующей манипуляцией: *File* → *Save As* (и следует ввести имя файла и нажать кнопку *Accept*). В том же меню *Mesh Faces* в опции *Faces*

выбираются все оставшиеся неразбитые поверхности. В поле *Elements* выбираем *Tri*, а в поле *Type* – *Pave*. В поле *Spacing* устанавливается размер ячейки, равный 0.1, а затем нажимается кнопка *Apply* (рисунок 62).

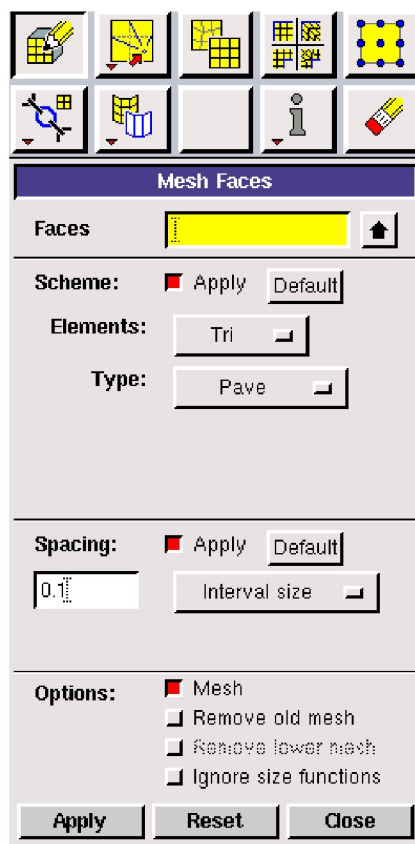


Рисунок 62– Процесс настройки параметров основной сетки

13. Назначение граничных условий.

Открывается меню *Specify Boundary Types* и в нем выбираются линии соответствующие входу жидкости в теплообменник, а затем в поле *Type* задается тип границы – *Pressure_inlet* и нажимается кнопка *Apply*. Устанавливаются границы как показано на рисунке 63. После выполнения данных действий открывается меню *Specify Boundary Types*, в котором выбираются линии соответствующие выходу жидкости из теплообменника, а затем в поле *Type* выбирается тип границы – *Pressure_outlet* (рисунок 64). Для подтверждения вышеуказанных настроек нажимается кнопка *Apply*.

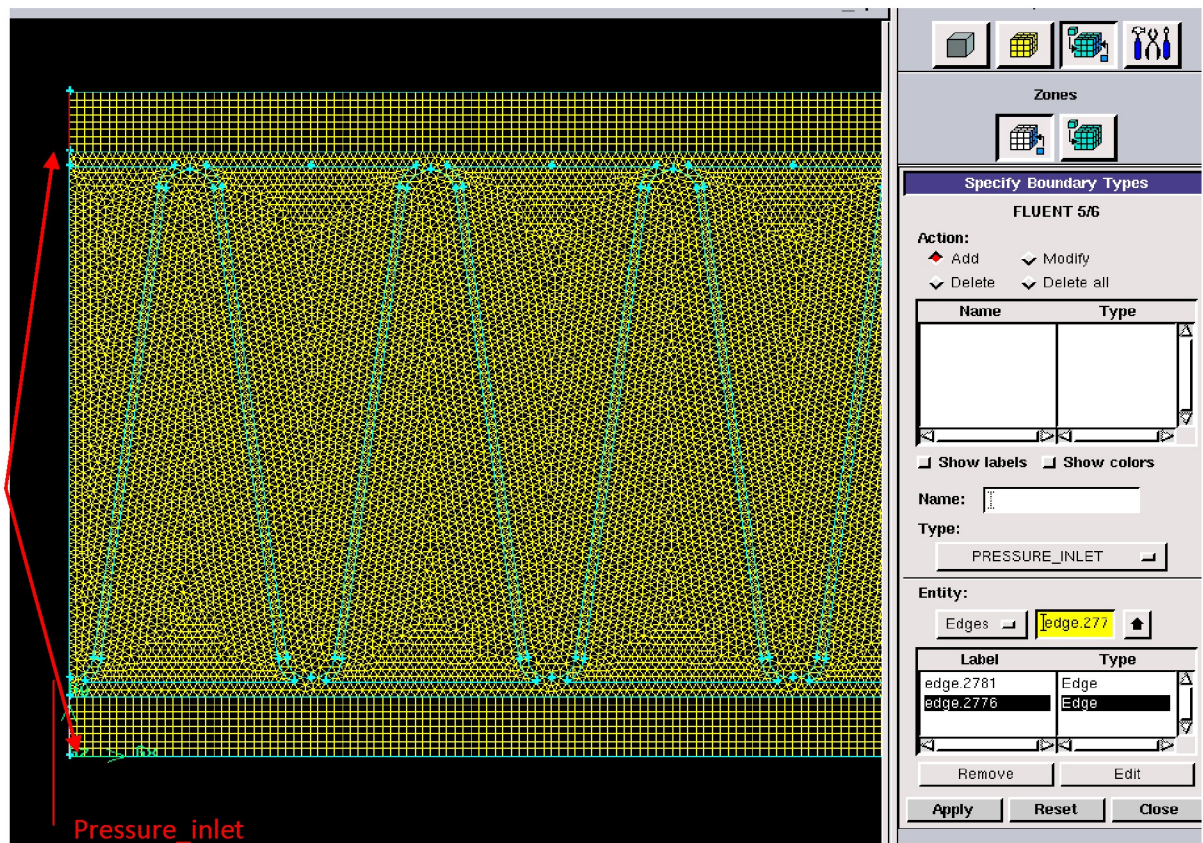


Рисунок 63 – Настройка граничного условия *Pressure_inlet*

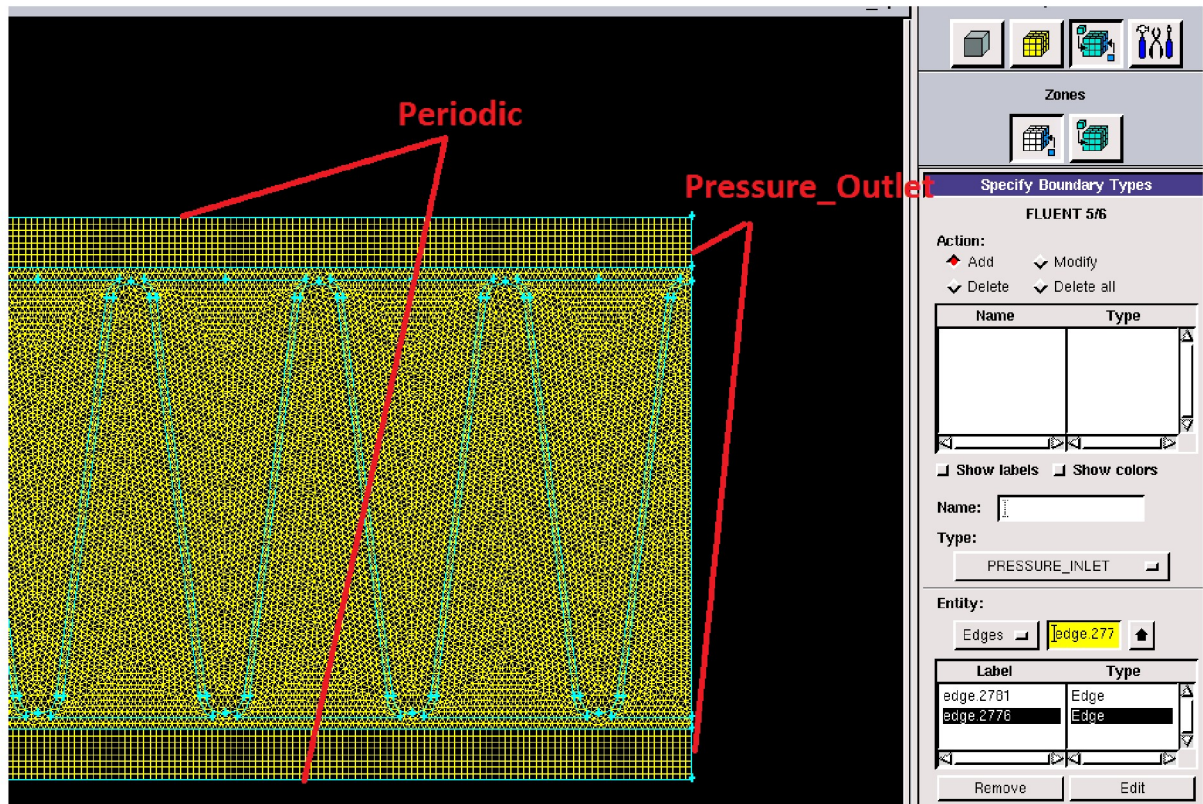


Рисунок 64 – Настройка граничного условия *Pressure_outlet*

14. Настройка типа конечно-элементной среды (рисунок 65).

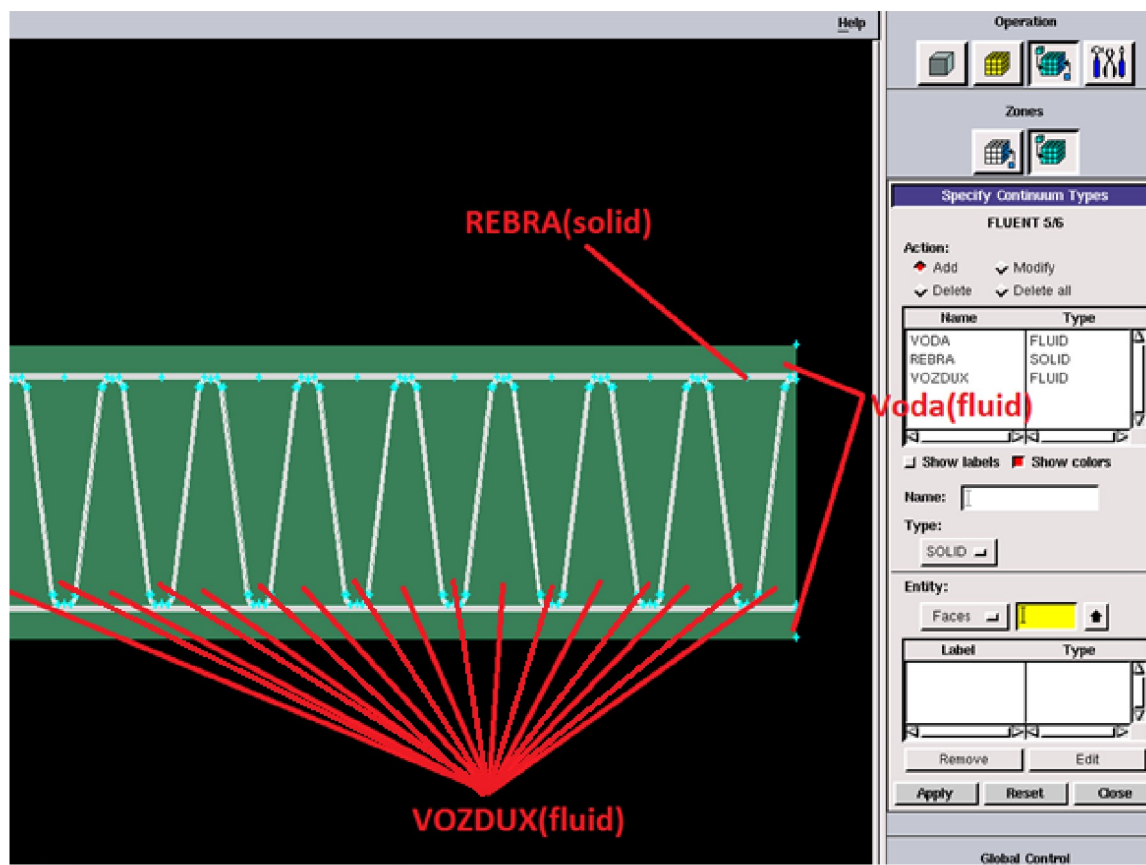


Рисунок 65 – Настройка типа конечно-элементной среды

В данной задаче необходимо указать области в которых будут находиться разные среды (воздух, вода, материал из которого выполнен теплообменник). Выполнение данного действия требует активизации меню *Specify Continuum Types*. В нем согласно рисунку 65 назначается тип сред. В графе *Name* необходимо ввести имена сред, при этом среда VOZDUX (воздух) объединяет в себе все среды, кроме REBRA (материал из которого выполнен теплообменник) и VODA (вода или другая охлаждающая жидкость).

15. Сохранение модели.

File → Save

16. Экспортирование модели в предпроцессор *FLUENT*.

Данное действие осуществляется следующим образом:

File → Export → Mesh

При осуществлении данной функции необходимо активировать функцию *Export 2-d(x-y)Mesh* (рисунок 66).

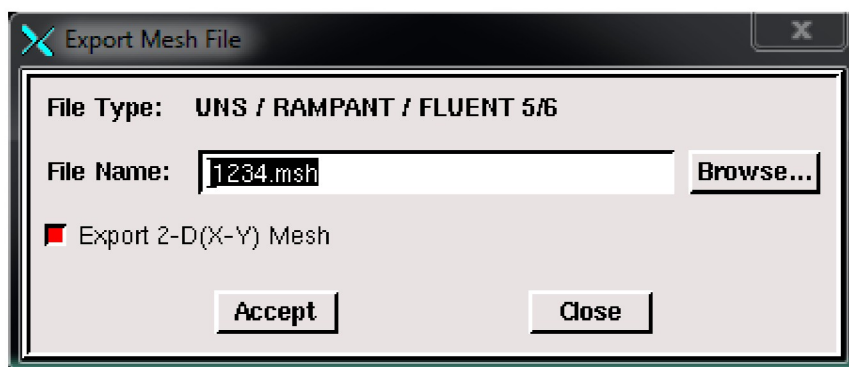


Рисунок 66 – Процесс экспортирования модели в предпроцессор *FLUENT*

2.2 Проведение расчета процессов в теплообменнике в формате 2D

1. Запускается программа *FLUENT* для двухмерного моделирования (рисунок 67). Для этого выбирается режим 2D в поле *Dimension*.

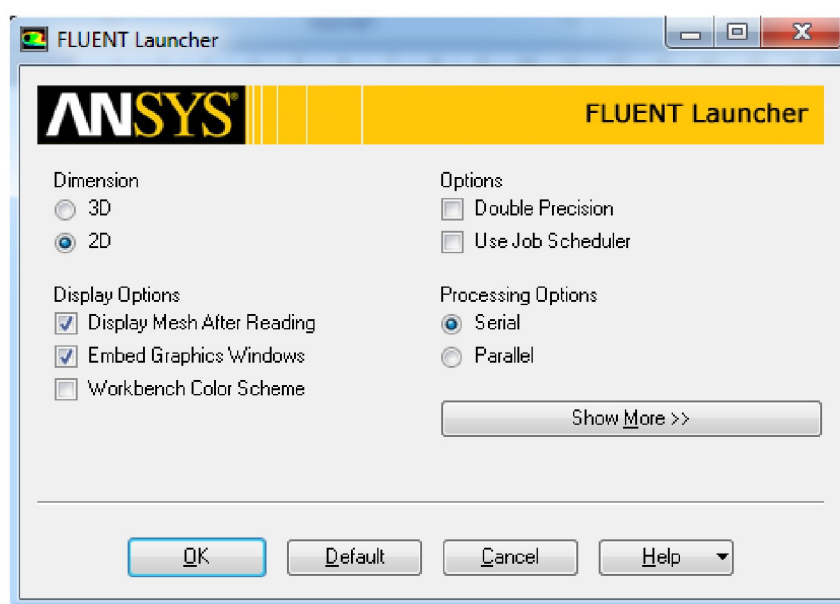


Рисунок 67 – Запуск предпроцессора *FLUENT*

2. Открытие сохраненной модели.

Выполнение загрузки созданной модели осуществляется следующим образом:

File → Read → Mesh

Откроется стандартное окно проводника *Windows*, в котором выбирается сохраненный файл.

3. Проверка конечно-элементной сетки на наличие ошибок.

Проверка расчетной сетки на наличие ошибок осуществляется с помощью команды (рисунок 68):

General → *Mesh* → *Check*

После запуска программа начнет проверять конечно-элементную сетку, а в окне сообщения появятся полные сведения о ней. Если будет найдена ошибка, то будет выдано соответствующее сообщение. В этом случае необходимо вернуться в программу *Gambit*, найти ошибку и исправить ее.

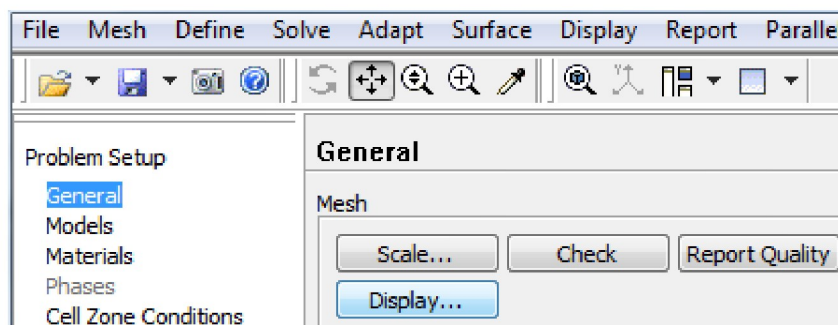


Рисунок 68 – Проверка конечно-элементной сетки

4. Масштабирование конечно-элементной сетки

Размеры расчетных моделей в программе *Fluent* должны быть обязательно заданы в метрах. Построение же моделей удобнее проводить в миллиметрах. Так как, рассматриваемая модель была создана в миллиметрах (рисунок 69). Поэтому построенную сетку нужно уменьшить в 1000 раз.

General → *Mesh* → *Scale*.

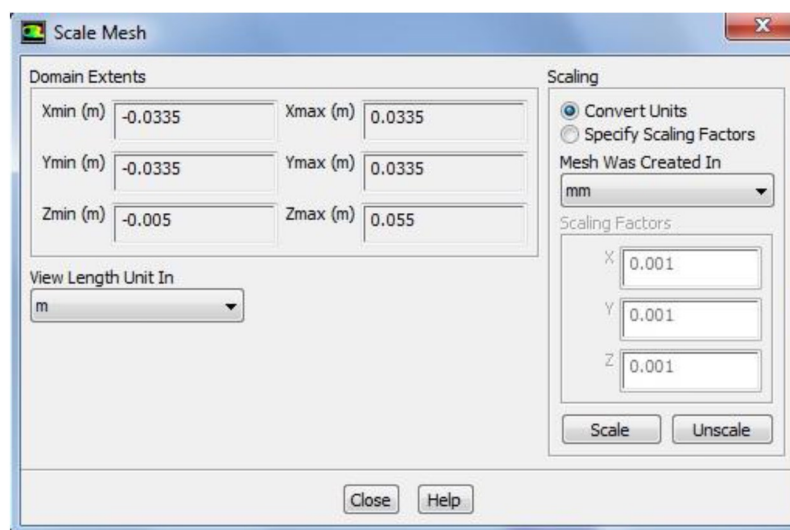


Рисунок 69 – Масштабирование конечно-элементной сетки

В меню *Scale Mesh* в поле *Mesh was created in* (сетка была создана в ..) нужно выбрать миллиметры *mm* (или другую единицу измерения, в которой была создана расчетная модель), а затем нажать кнопку *Scale*. Модель будет автоматически отмасштабированна.

5. Просмотр конечно-элементной сетки.

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

General → Mesh → Display

В появившемся меню *Mesh Display* (рисунок 70) в окне *Surfaces* требуется выбрать все граничные поверхности, которые пользователь хочет просмотреть. Следует обратить внимание на то, что имена в списке совпадают с именами граничных условий, заданных в *Gambit*. Для просмотра выбранных элементов сетки нужно нажать кнопку *Display*.

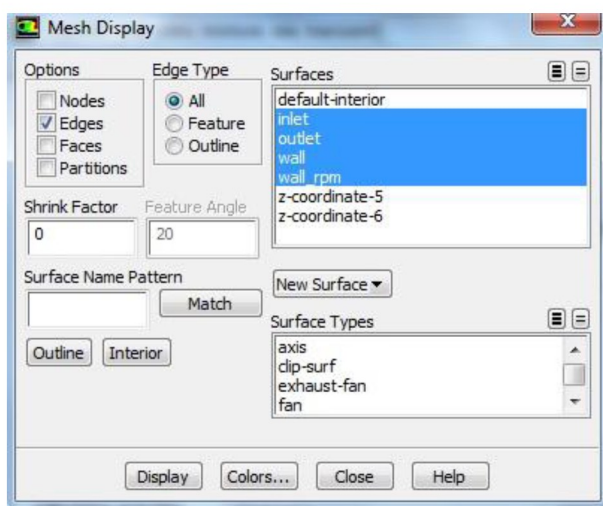


Рисунок 70 – Меню просмотра конечно-элементной сетки

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

Примечание: В результате масштабирования модель может не отобразиться на экране, так как имеет малый размер. Для того, чтобы изучить конечно-элементную сетку внимательнее, нужно использовать мышь. Движение мыши с нажатой левой кнопкой вызывает сдвиг модели. Движение мыши с нажатой средней кнопкой вызывает появление рамки, с помощью которой можно приблизить (если рамку вытягивать слева

направо) выделенный фрагмент модели или, наоборот, отдалить (если рамку вытягивать справа налево). Если в окне *Surfaces* снять выделение с пункта *default – interior*, то в окне можно будет увидеть только контур модели, без расчетной сетки.

6. Задание опций решателя (рисунок 71):

General → Solver.

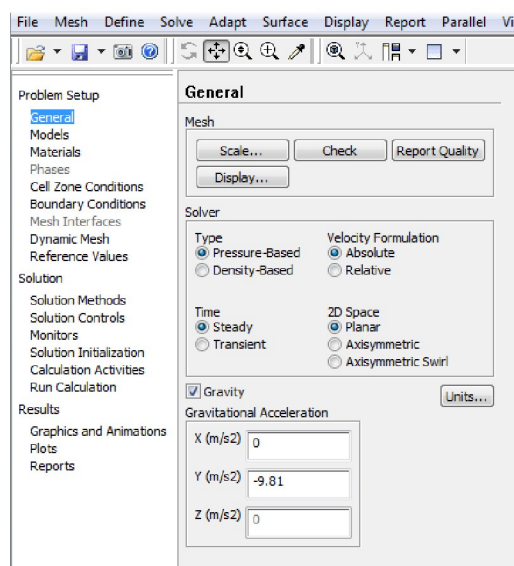


Рисунок 71 – Меню настройки параметров решателя

Выбираем решатель *Pressure Based*, вводим значения ускорения свободного падения в поле *Gravitational Acceleration* для оси *Y* равное -9.81.

7. Задание 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 решении данной задачи следует остановить выбор на модели турбулентности модели напряжений Рейнольдса, поскольку она позволяет получать достаточно точные решения, в каналах сложной формы. Выбор данной модели турбулентности осуществляется следующим образом (рисунок 72):

Models → Viscous.

Далее выбирается *Reynolds Stress Model, Quadratic Pressure –Strain*.

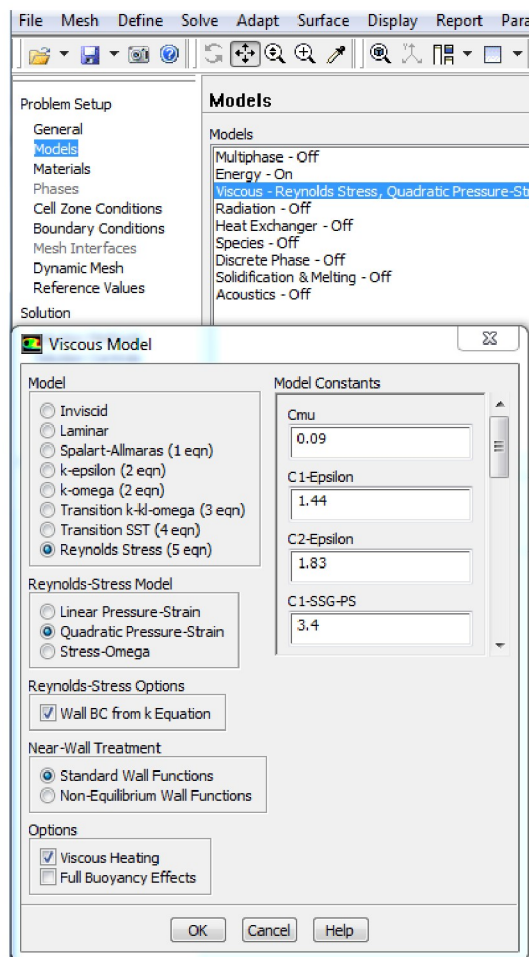


Рисунок 72 – Меню выбора и настройки модели турбулентности

8. Включение в расчет уравнения энергии.

Для получения распределения полей температур необходимо включать в расчет уравнение энергии (рисунок 73).

Models → Energy

Устанавливается галочка *Energy Equation* и нажимается кнопка *OK*.

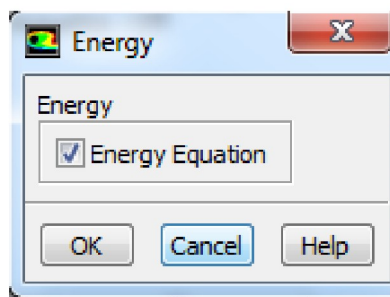


Рисунок 73 – Меню активизации уравнения энергии.

9. Задание свойств рабочего тела осуществляется в меню *Materials*, которое вызывается командой (рисунок 74):

Define → Materials.

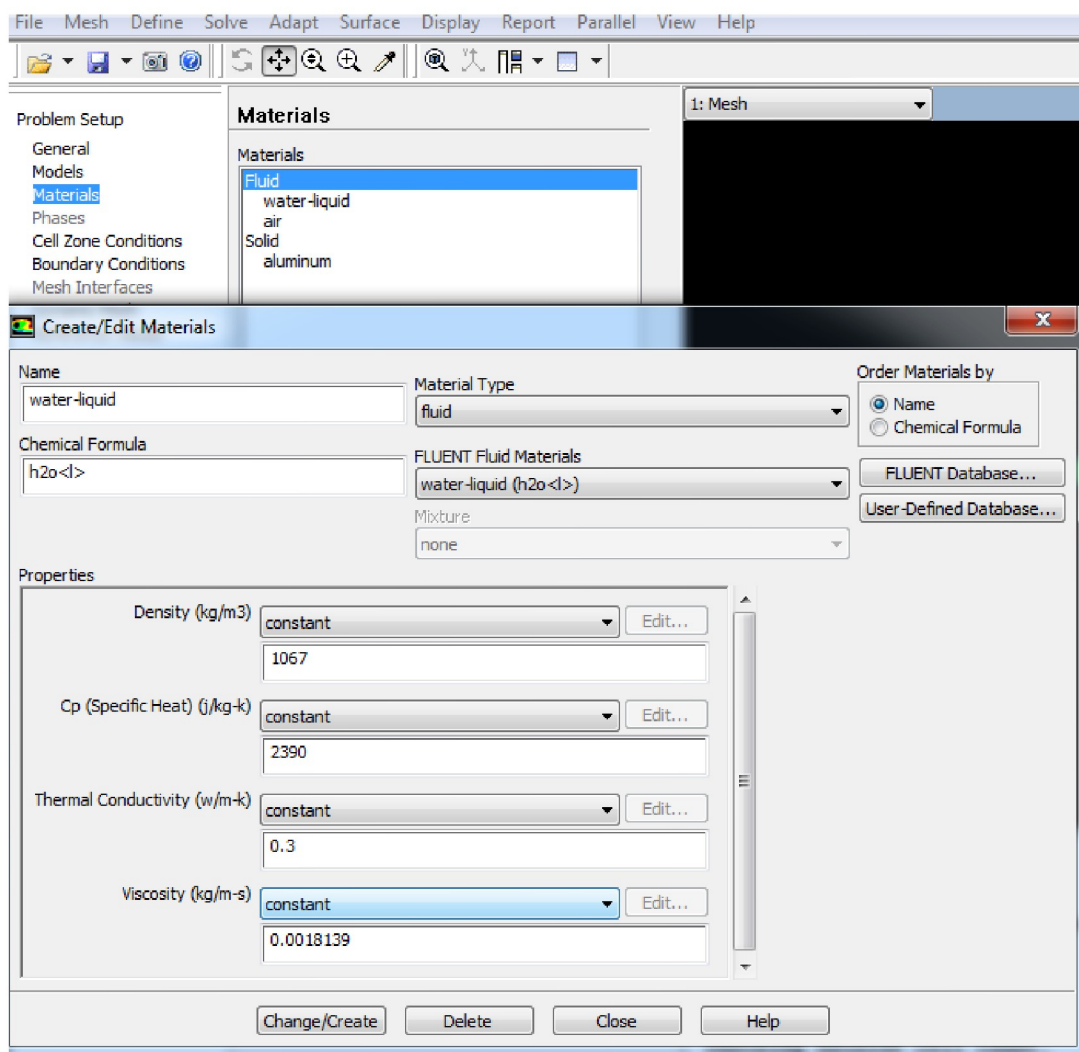


Рисунок 74 – Меню настройки свойств рабочего тела

В рассматриваемой задаче используется вода, воздух и алюминий.

Для того, чтобы осуществить эту установку, в меню *Materials* надо нажать кнопку *FLUENT Data Bases*, далее в появившемся списке *FLUENT Fluid Materials* выбрать необходимые материалы: *Water-Liquid* и нажать кнопку *Copy*. Чтобы приблизить нашу задачу к реальности, вместо свойства жидкой воды задаем свойства реального антифриза. Для этого необходимо:

- задать свойства *water-liquid*: $Density=1067$, $C_p=2390$, $Thermal\ Conductivity = 0.3$ и вязкость ($Viscosity$) = 0.001839;
- нажать кнопку *Change/Create* для сохранения изменений.

10. Задание параметров зон.

Данное действие осуществляется следующим образом:

Cell Zone Conditions → *Zone*

В этом пункте нужно изменить свойства среды, которая имеет наименование *voda* (данная среда находится внутри трубок радиатора): выбирается вышеуказанная среда в окне *Zone*, затем нажимается кнопка *Edit* и в поле *Material Name* выбирается *Water-Liquid* (рисунок 75).

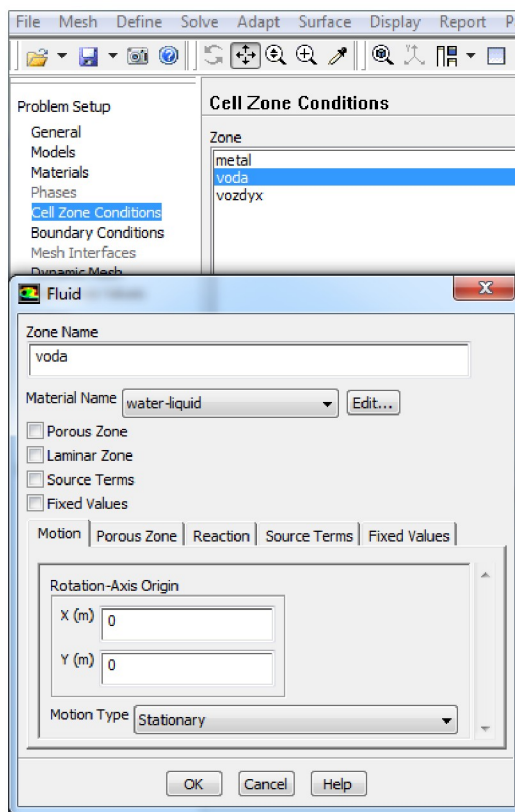


Рисунок 75 – Меню настройки параметров зон

11. Задание справочного давления.

Настроить значение «справочного давления» необходимо в меню, которое появится в результате выполнения команды (рисунок 76):

Define → Operating Condition.

В решаемой задаче целесообразно принять «справочное давление», равное 120 000, и ввести его значение в поле *Operating pressure*.

12. Задание граничных условий.

Define → Boundary Condition

В поле *Zone* находится список всех граничных условий, определенных в *Gambit*. Если выбрать имя одного из них, например *inlet*, то в окне *Type* будет указан тип граничного условия. В случае необходимости в этом окне тип граничных условий можно поменять.

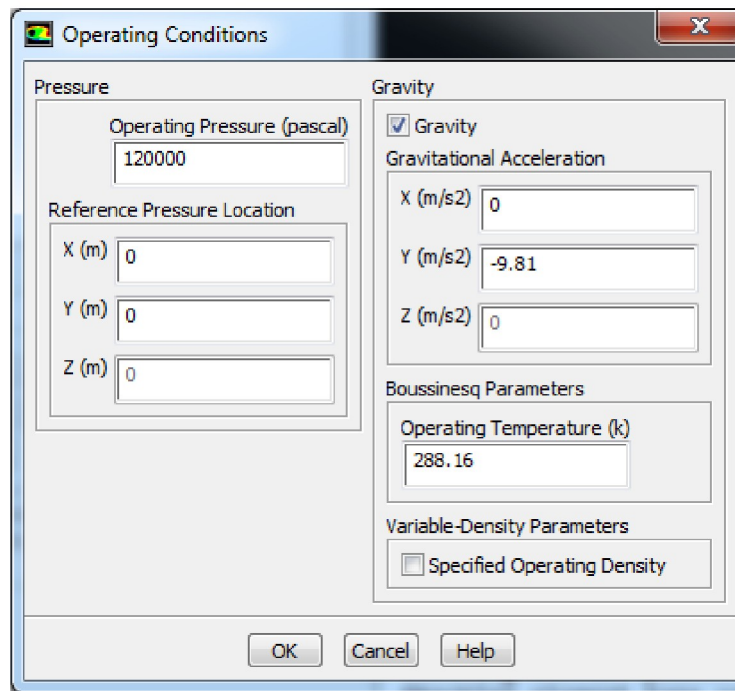


Рисунок 76 – Меню настройки справочного давления.

Чтобы приступить к заданию граничных условий, необходимо в окне *Zone* выбрать нужное граничное условие (рисунок 77), убедиться, что в окне *Type* тип граничного условия указан, верно, и нажать *Edit...*

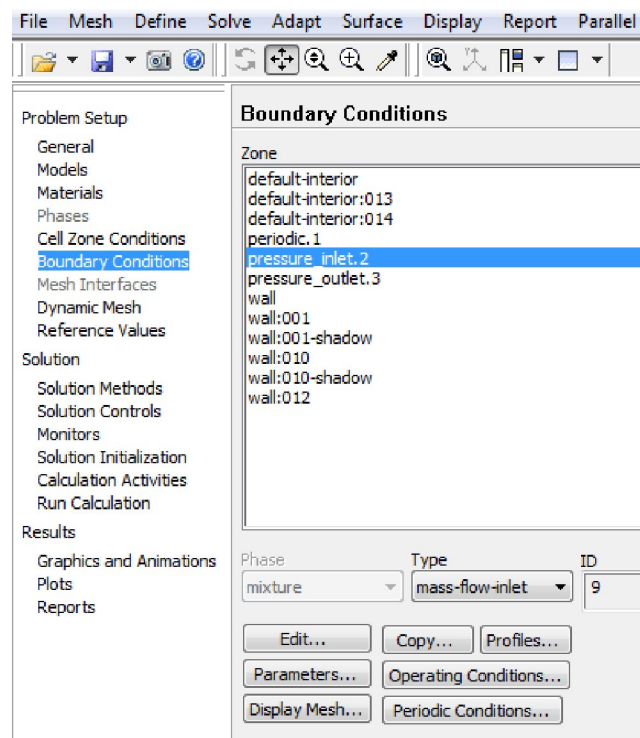


Рисунок 77 – Меню настройки граничных условий

- а. Установить параметры для границы, имеющей наименование *pressure_inlet.2* (рисунок 78):

- *Type Mass-flow-inlet* - ***Momentum***;
- *Mass Flow Rate* - ***0.049***;
- *Supersonic/Gauge Pressure* - ***0***;
- *Direction Specification Method* - ***Direction Vector***;
- *X-Component of Flow Dire* - ***1***;
- *Y-Component of Flow Dire* - ***0***.

Turbulence:

- *Specification Method* - ***Intensity and Hydraulic Diameter***;
- *Hydraulic Diameter* - ***0.0037***.

В окне *Hydraulic Diameter* вводится гидравлический диаметр. Он находится по формуле $d_e = 4F/\Pi$, где Π – периметр сечения; F – его площадь.

Thermal:

- *Total Temperature* - ***363***.

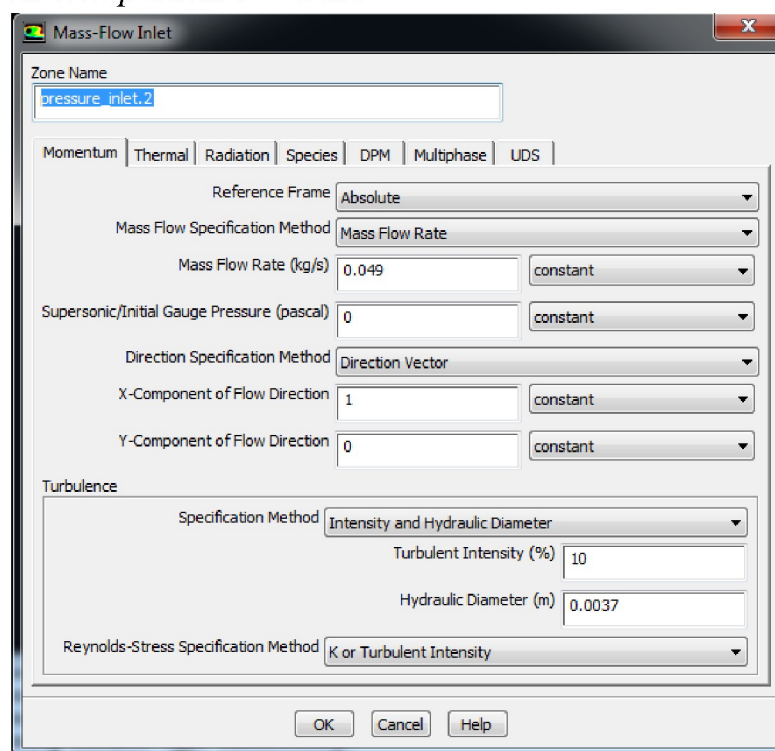


Рисунок 78 – Меню настройки границы *pressure_inlet.2*

b. Установить параметры для границы, имеющей наименование *pressure_outlet.3* (рисунок 79):

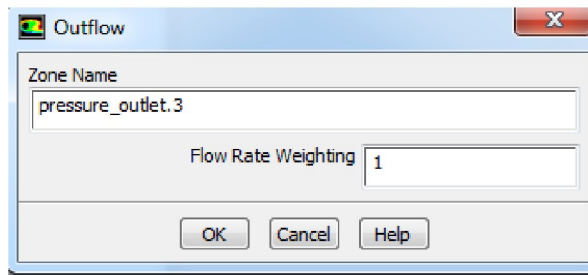


Рисунок 79 – Меню настройки границы *pressure_outlet.3*

- *Type* - **Outflow**;
- *Flow Rate Weighting* - **1**.

13. Установка параметров расчета.

Данная настройка осуществляется с помощью следующих манипуляций (рисунок 80):

Solution Methods → *Spatial Discretization*

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, затем его повышать.

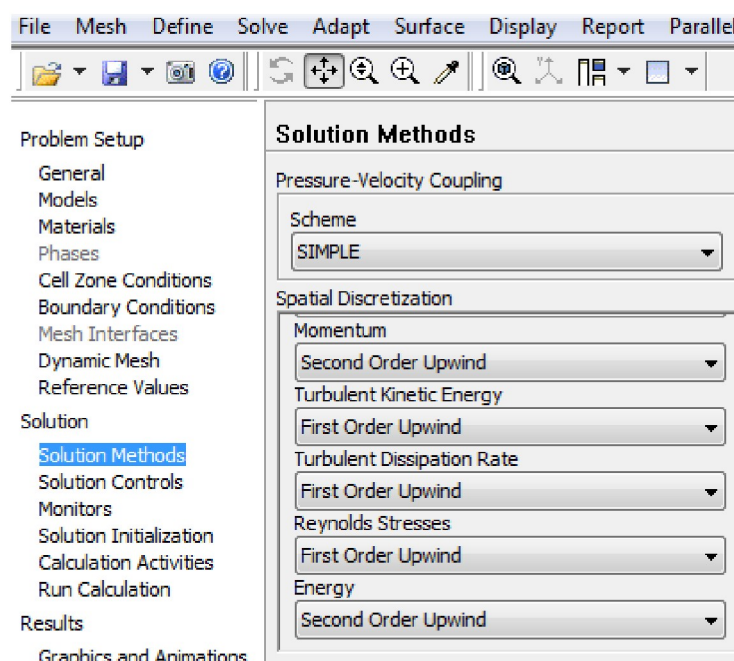


Рисунок 80 – Меню настройки параметров расчета (*Solution Methods*).

Затем следует установить *Second Order Upwind* (второй уровень дискретизации) для *Momentum* и *Energy*.

14. Установка подрелаксационных коэффициентов происходит следующим образом (рисунок 81):

Solution → *Solution Controls*

В зоне *Under-Relaxation Factors* задаются коэффициенты релаксации при решении соответствующих уравнений. Уменьшение коэффициентов улучшает сходимость решения, но заметно увеличивают время счета. Снижение коэффициента релаксации широко применяется при проблемах с запуском расчета задачи, но их выбор требует определенного опыта.

Следует задать значение всех коэффициентов равными 0.3.

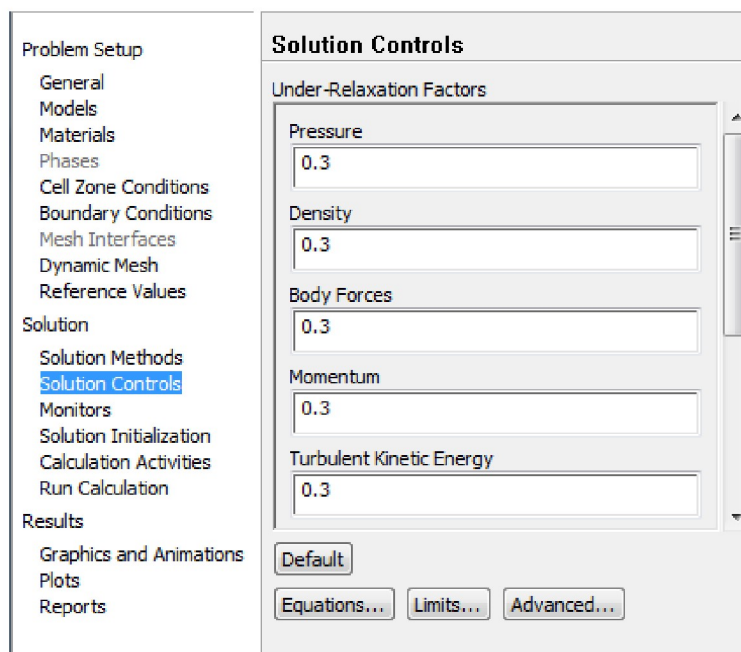


Рисунок 81 – Меню настройки подрелаксационных коэффициентов (*Solution Controls*)

15. Инициализация начальных значений параметров.

При решении задач газовой динамики численными методами перед запуском решения необходимо установить начальные значения параметров в расчетной области. Инициализация начальных значений параметров осуществляется за счет выполнения следующих манипуляций (рисунок 82):

Solution → *Solution Initialization*

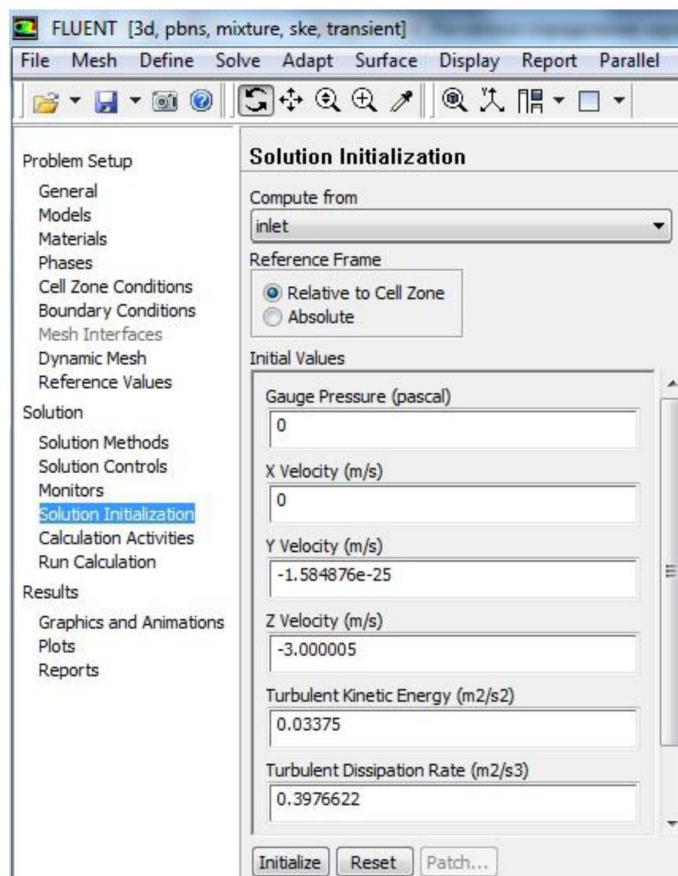


Рисунок 82 – Процесс инициализации начальных значений параметров.

Правильный выбор этих параметров может существенно ускорить и сходимость, чем ускорить получение решения. В этом меню в поле *Compute From* необходимо выбрать входную границу. В результате рекомендуемые значения начальных параметров будут рассчитаны по входным граничным условиям.

Для их принятия следует нажать *Initialize* (рисунок 82).

16. Сохранение расчетной модели.

Для сохранения расчетной модели и всех сделанных настроек решателя необходимо вызвать команду:

File → Write → Case.

В появившемся окне проводника необходимо выбрать место, где будет сохранена модель и ее имя. После нажатия кнопки *OK* в указанном месте появится файл модели с расширением *.cas.

17. Запуск расчета (для 1000 итераций) выполняется с помощью вызова соответствующего меню:

Solution → Run Calculation

Запуск расчета осуществляется нажатием кнопки *Calculate* в меню запуска решения (рисунок 83).

Если условие сходимости будет достигнуто, то процесс счета остановится сам. Если заданного числа итераций будет недостаточно для получения решения, то процесс решения можно продолжить.

Решение может быть остановлено в любой момент нажатием на кнопку *Cancel* и вновь запущено с места остановки нажатием кнопки *Calculate* в меню запуска решения. В ходе паузы могут быть просмотрены предварительные результаты решения, внесены изменения в граничные условия или настройки решателя.

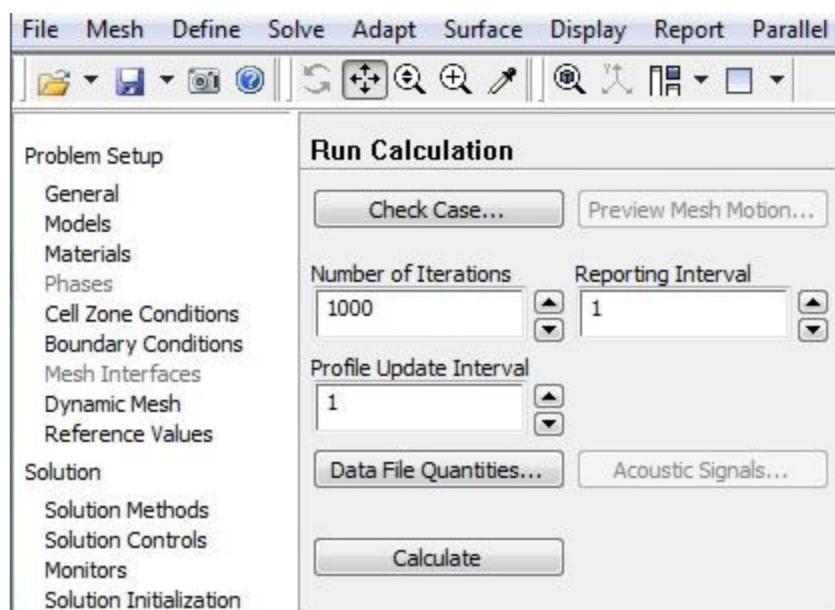


Рисунок 83 – Процесс запуска расчета

Решение может не сойтись в этом диапазоне итераций. Тогда следует увеличить их количество до 10000. Для более быстрой сходимости можно уменьшить подрелаксационные факторы до 0.1.

18. Обработка результатов вычисления

Прежде всего, выполняется визуализация векторов скорости. Для отображения векторов скоростей в расчетной области необходимо выполнить команду:

Results → Graphics → Vectors.

В зоне *Color by* задается закономерность окраски векторов. Цвет вектора в каждой точке расчетной области будет соответствовать величине параметра, определенного в зоне *Color by*.

Если векторы окажутся маленькими, их можно увеличить, задав большее число в поле *Scale*. Если количество векторов будет слишком большое, и они будут мешать анализу результатов, то их можно проредить, задав в поле *Skip* число, отличное от нуля. Это число определяет, сколько векторов не будет отображаться. Например, если в поле *Skip* стоит число 2, то это значит, что два из трех векторов не будут показаны в графическом окне.

В качестве иллюстрации приведено распределение векторов скорости в межреберном канале радиатора. На рисунке 84 отчетливо видны конвективные токи в канале.

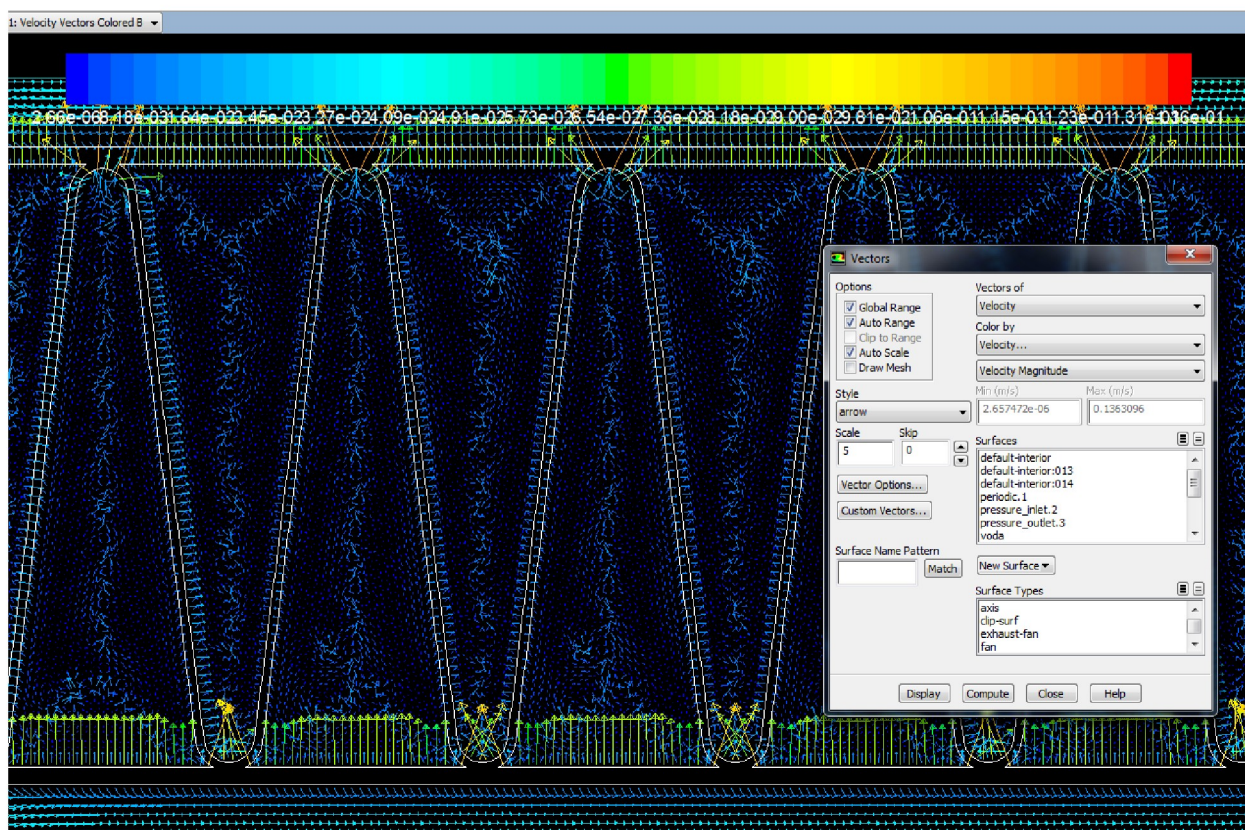


Рисунок 84 – Процесс визуализации векторов скорости

19. Определение значения коэффициента теплопередачи.

Для просмотра полей распределения параметров необходимо запустить команду:

Results → Graphics → Contours

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* (рисунок 85). Оно состоит из двух ниспадающих списков. В верхнем выбирается группа, к которой принадлежит нужный параметр (например, скорость). В нижнем списке уточняется, какой именно параметр группы требуется определить (например, осевая скорость).

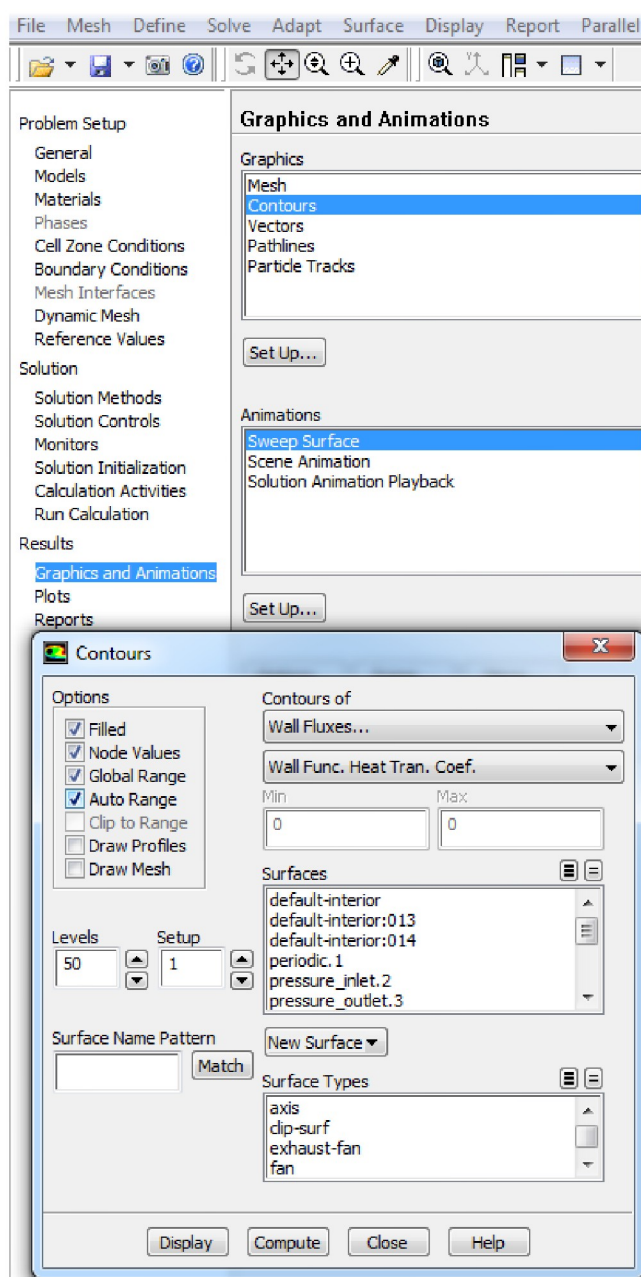


Рисунок 85 – Процесс определения значения коэффициента теплопередачи

Это типовая и часто используемая процедура выбора отображаемого параметра в программе *Fluent*. Аналогичным образом, определяется параметр при определении средне интегральных значений.

Для решения нашей задачи по определению коэффициента теплопередачи необходимо выбрать параметр *Wall Fluxes* во вкладке *Contours of* и *Wall Func. Heat Tran. Coef.* под ним.

Для усреднения данных необходимо задать интервал отображаемых параметров. В меню *Options* отключите функцию *Auto Range*, автоматически активируется функция *Clip to Range*. Варьируя размер интервала, добиваемся наиболее полного отображения параметра на границе воздух-металл.

Путем последовательного исследования значений параметра на границе находится приблизительное значение параметра (рисунок 86).

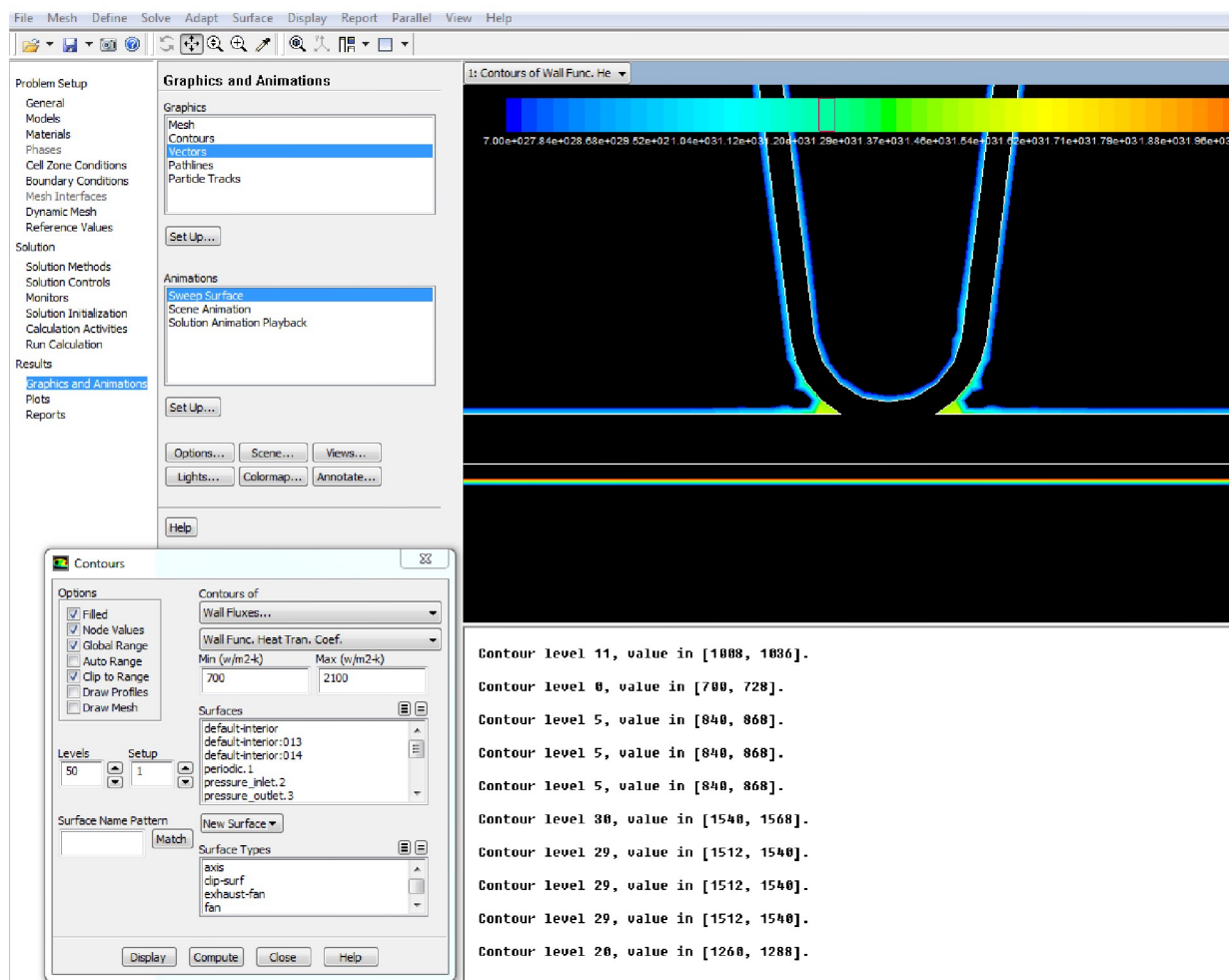


Рисунок 86 – Визуализация коэффициента теплопередачи

Для отображения значения параметра в данной точке необходимо в графическом окне щелкнуть правой кнопкой мышки в нужной точке; значение параметра появится в текстовом поле программы. Для данной модели значение коэффициента теплопередачи находится в пределах от 700 Вт/м²К до 2 100 Вт/м²К. Принимается среднее значение коэффициента теплопередачи равным 1400 Вт/м²К.

Далее следует перейти к следующему этапу проектирования: на трехмерной модели остова радиатора проверяется эффективность данного оребрения.

2.3 Построение 3D модели теплообменника

1. Запускается предпроцессор *Gambit*.
2. Затем импортируется готовая модель, предварительно созданная в каком-либо CAD – пакете (рисунок 87):

File → Import → Parasolid.

Затем выбирается файл *radiator3d.x_t* и нажимается кнопка *Accept*.

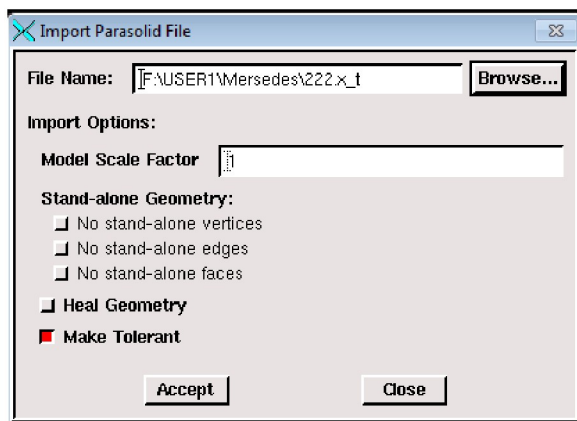


Рисунок 87 – Процесс импортирования 3D-модели

3. Создание вспомогательных поверхностей (рисунок 88).

Для этого в меню *Create Real Rectangular Face* вводится значение для сторон прямоугольной поверхности *Width*, *Height* равное 1200. В поле *Direction* выбирается *YZ Centered* и нажимается кнопка *Apply*.

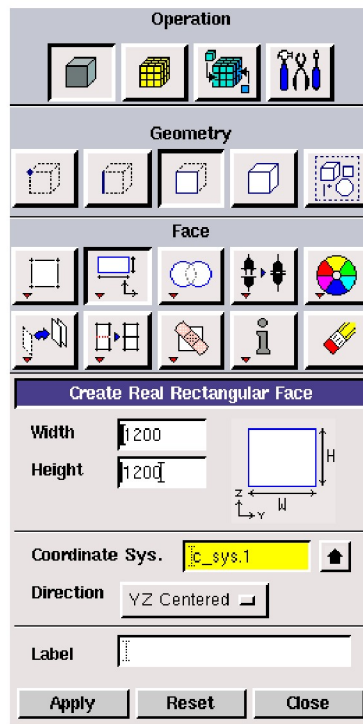


Рисунок 88 – Создание вспомогательных поверхностей

4. Деление объема на части (рисунок 89).

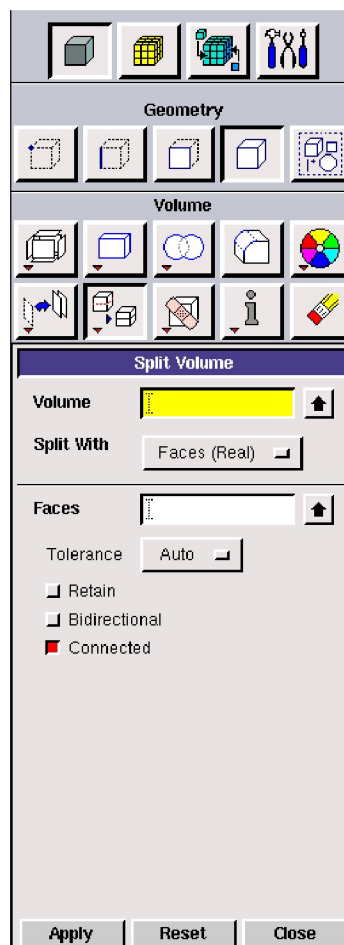


Рисунок 89 – Меню *Split Volume*

В меню *Split Volume* выбирается объем радиатора, в окне *Split with* выбирается *faces* и нажимается кнопка *Apply*. Эта операция выполняется еще раз, для того чтобы получить отдельные объемы для бачков и трубок радиатора. Необходимо активизировать функцию *Connected* (см. рисунок 89).

5. Разбиение линий.

В меню *Mesh Edges* выделяется одновременно все линии находящиеся внутри контура (для этого удерживается кнопка *Shift* и левая кнопка мыши). При этом выделяются все линии принадлежащие трубкам. В поле *Spacing* выбирается *Interval Count* и вводится значение равное 8. Затем проводится операция разбиения только для вертикальных линий трубок. В поле *Spacing* выбираем *Interval Count* и вводится значение равное 30 (рисунок 90).

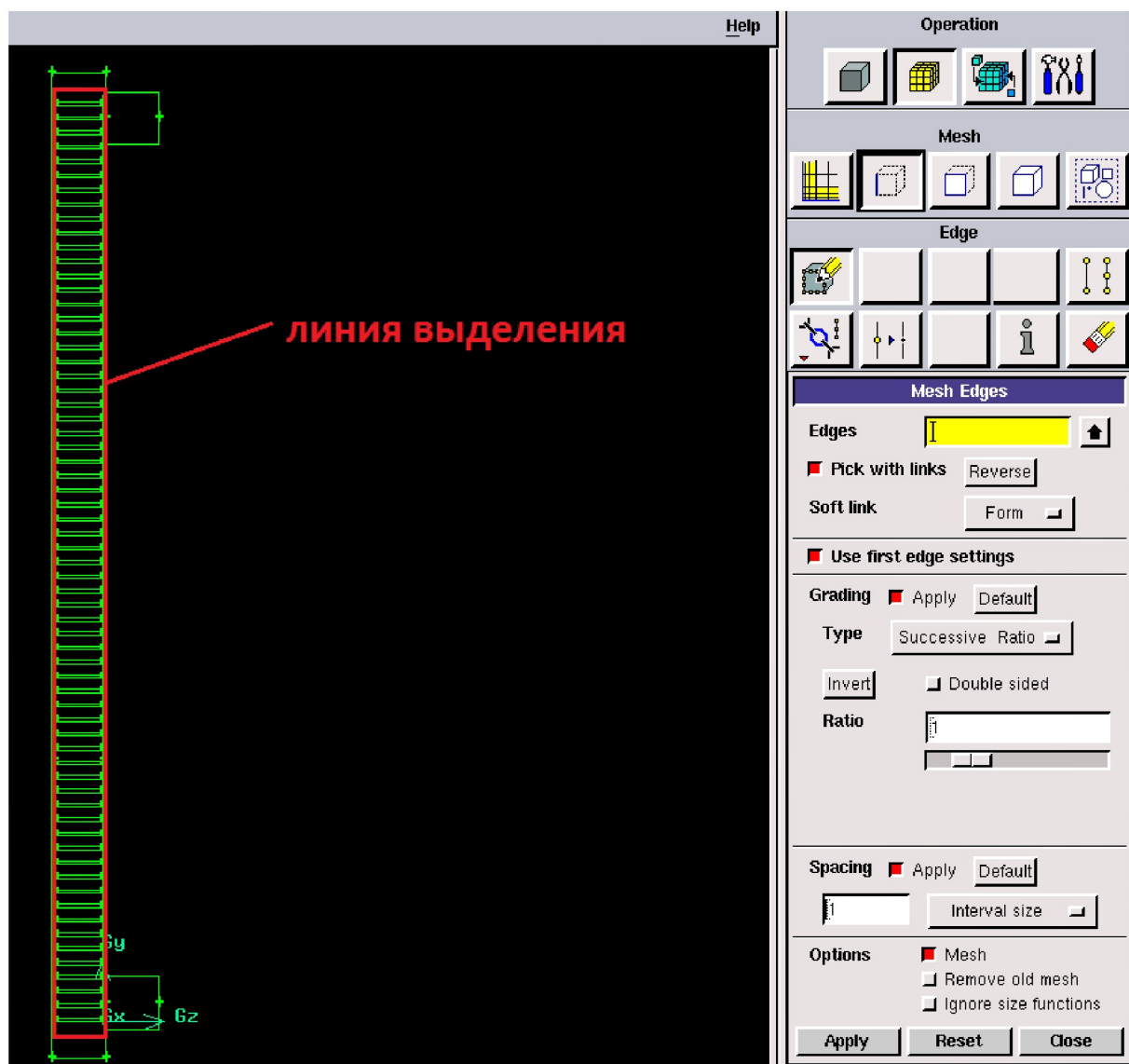


Рисунок 90 – Процесс разбиения линий

Затем проводится операция разбиения только для линий трубок (рисунок 91). В поле *Spacing* выбирается *Interval Count* и вводим значение равное 250.

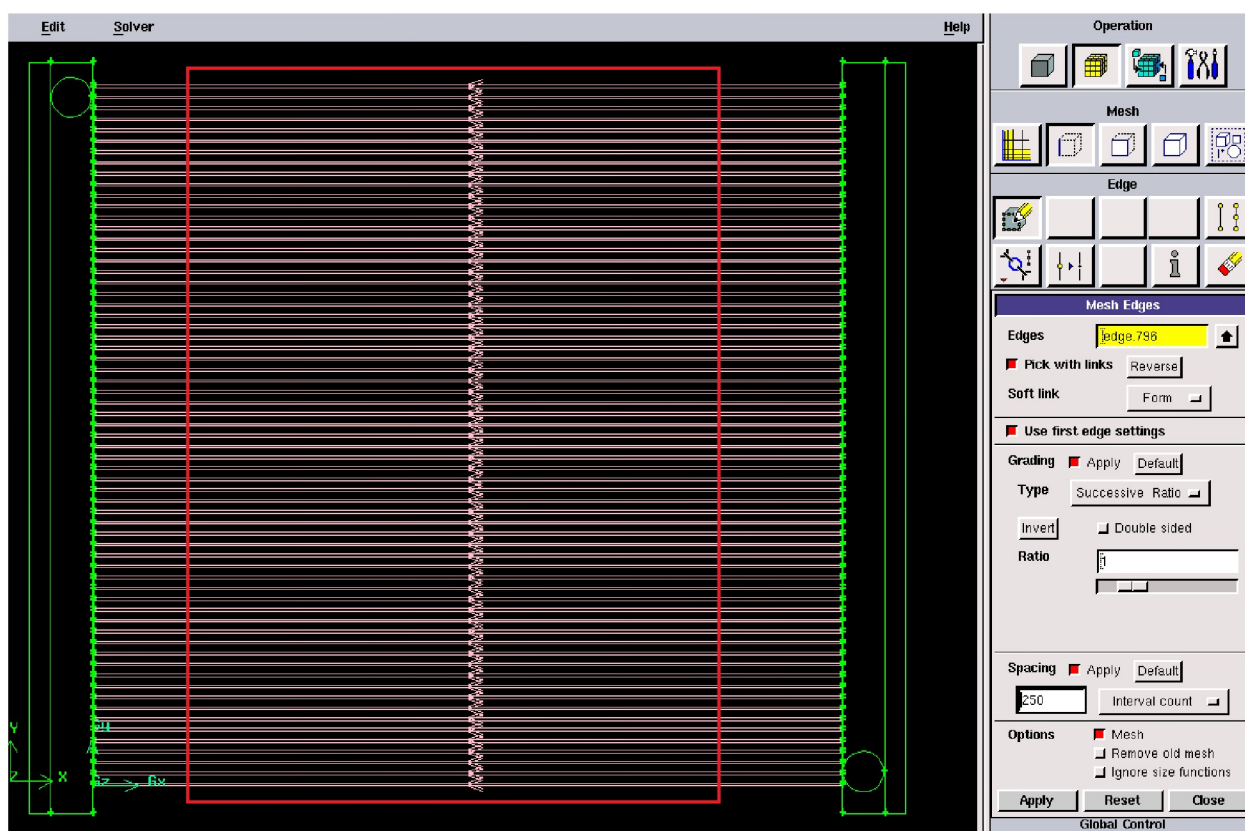


Рисунок 91 – Разбиение линий на конечные элементы

6. Настройка функции размера ячеек конечно-элементной сетки

В меню *Create Size Functions* в поле *Source* выбирается опция *Edges* и выделяются все линии трубок близкие к правому(выходному) бачку. В поле *Attachment* выделяем правый бачок (рисунок 92). В полях *Start Size*, *Growth Rate*, *Max. Size* вводятся значения соответственно: 0.3; 1.5; 7, а затем нажимается кнопка *Apply*.

Затем аналогично проводится эта операция для левого бачка. Для этого в поле *Attachment* выделяется левый бачок, а в полях *Start Size*, *Growth Rate*, *Max. Size* вводятся те же значения, что и для правого бачка.

7. Создание конечно-элементной сетки

В меню *Mesh Volumes* выделяются все трубки и, используя схему разбиения *Cooper* с размером элемента равного единице, производится разбиение объема трубок (рисунок 93).

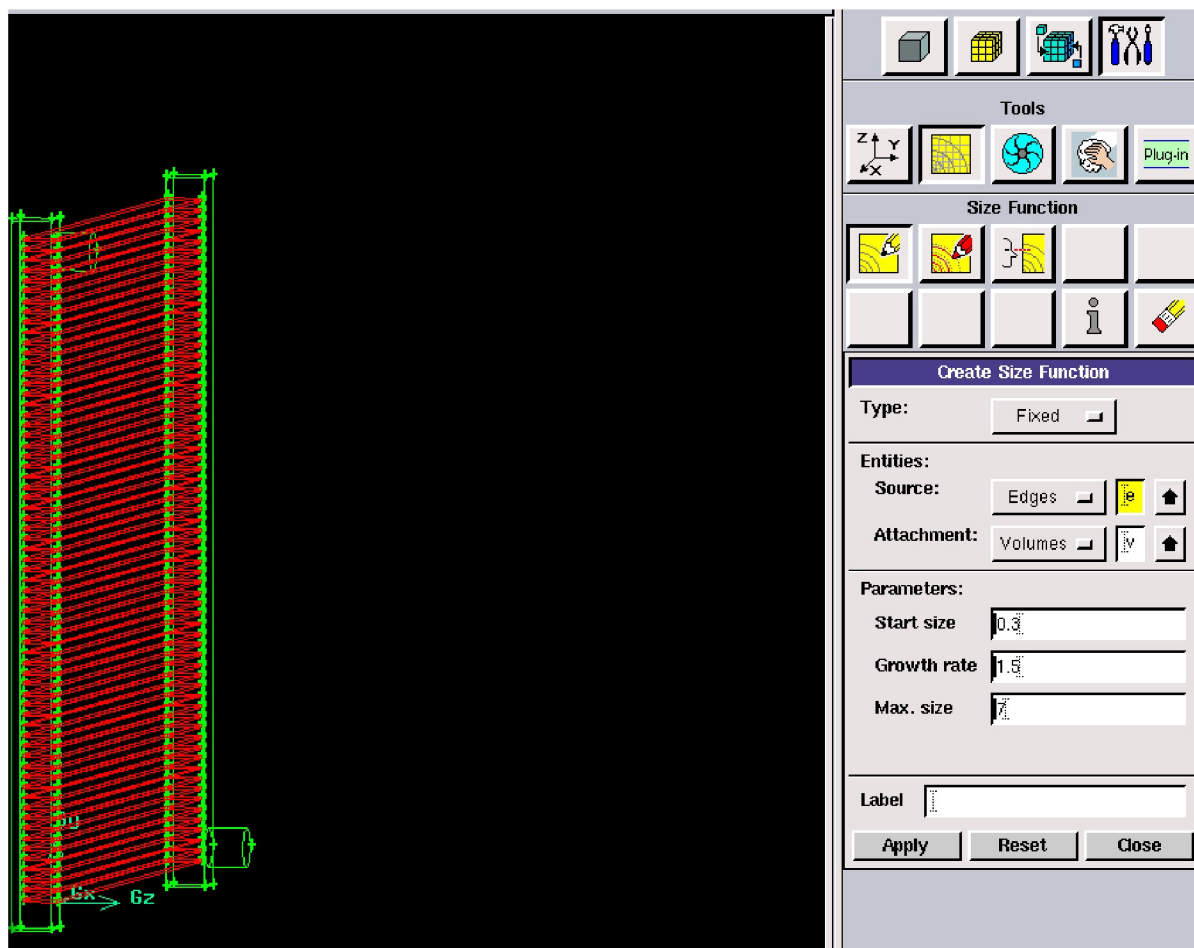


Рисунок 92 – Меню настройки функции размера ячеек конечно-элементной сетки

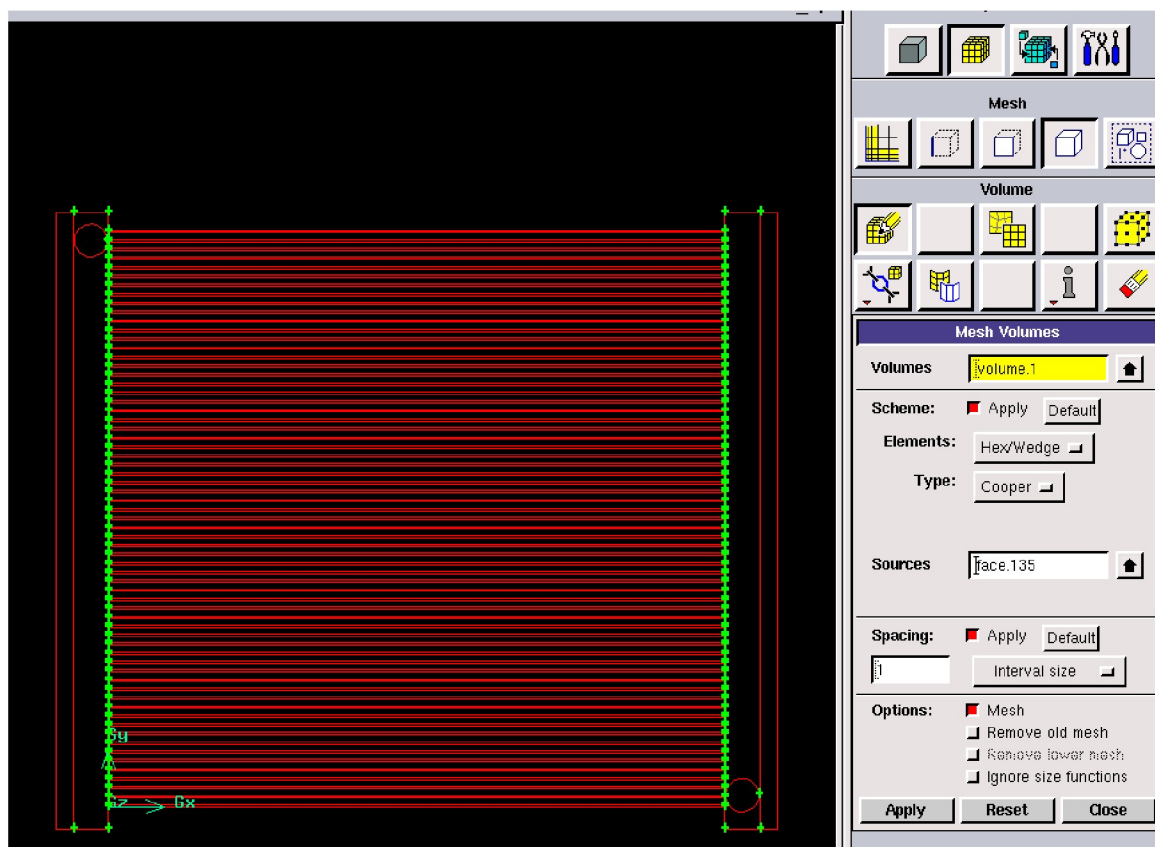


Рисунок 93 – Создание конечно-элементной сетки

Затем разбивается правый бачок (рисунок 94). Для данного элемента происходит разбиение с помощью использования схемы *Tet/Hybrid TGrid*. Размер ячейки сетки выбирается равным семи. После этого с теми же параметрами происходит разбиение левого бачка радиатора.

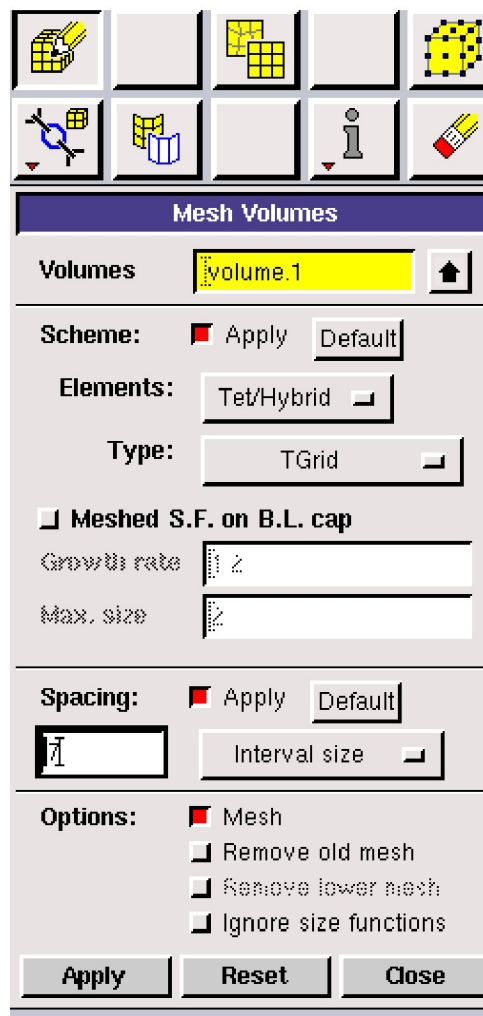


Рисунок 94 – Меню создания конечно-элементной сетки

8. Выбор типа граничных условий.

Для выполнения данного действия выбирается меню *Specify Boundary Types*, в котором выбираются поверхности, соответствующие входу жидкости в теплообменник, а затем в поле *Type* выбирается тип граничного условия - *Pressure_inlet*, и для подтверждения и активизации сделанных настроек нажимается кнопка *Apply*. Далее устанавливаются остальные граничные условия для соответствующих поверхностей согласно рисунку 95.

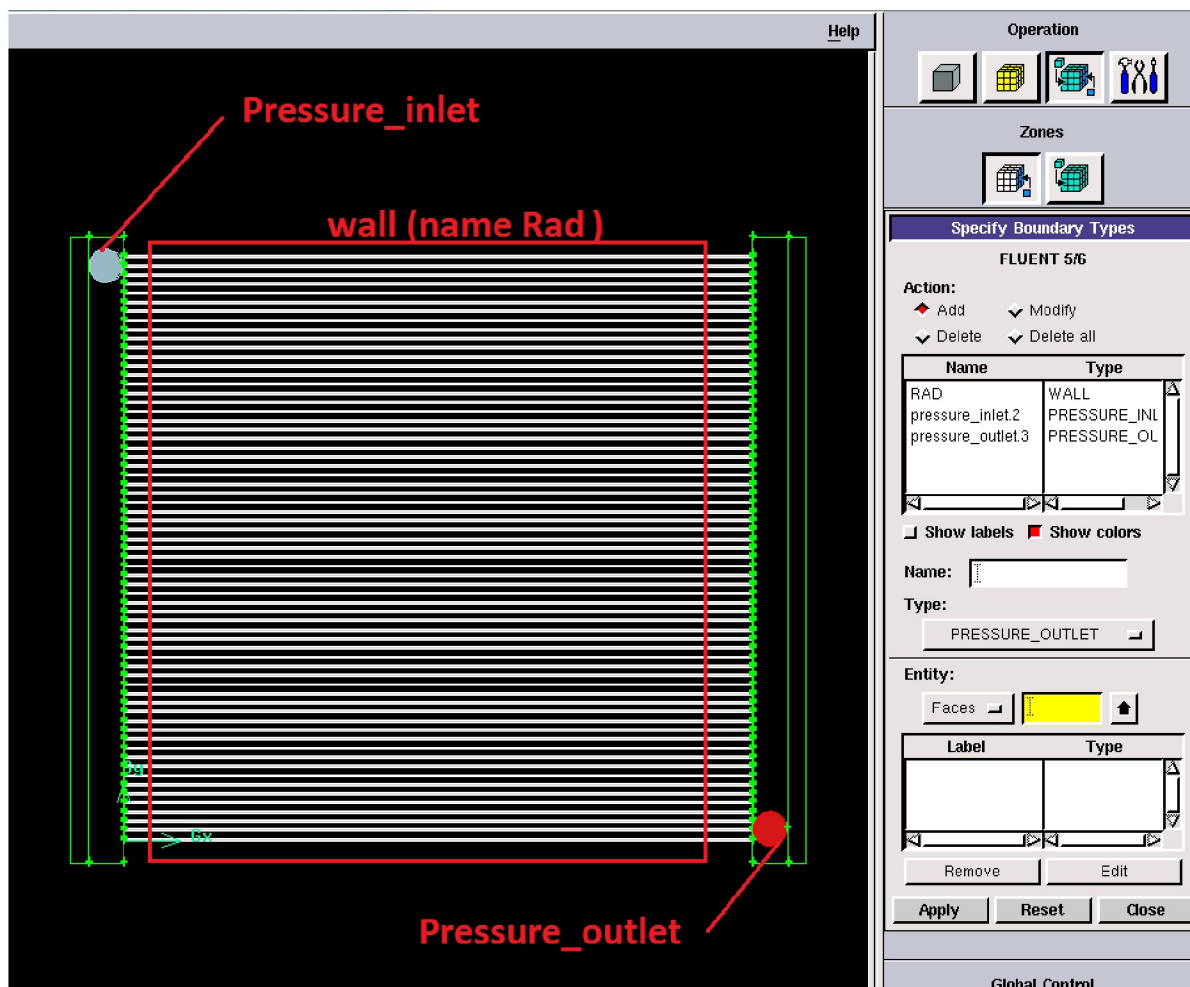


Рисунок 95 – Настройка граничных условий

9. Экспортирование готовой модели в предпроцессор *Fluent*

После выполнения всех настроек следует сохранить модель, а затем экспортировать ее в предпроцессор *Fluent* (рисунок 96)

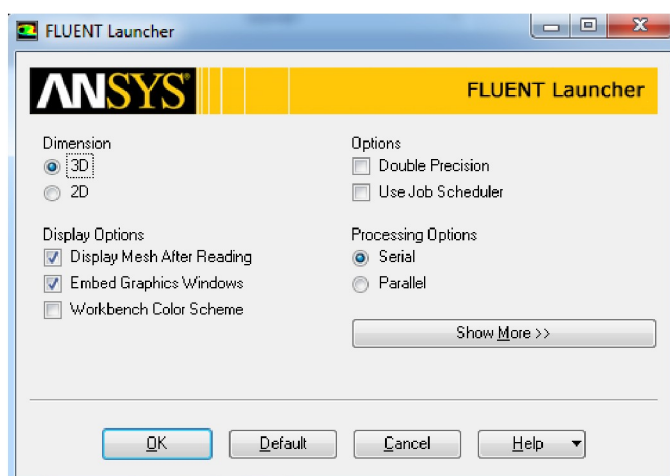


Рисунок 96 – Запуск предпроцессора *Fluent*

2.4 Проведение 3D моделирования тепловых процессов в теплообменнике

1. Запускается программа *Fluent* для трехмерного моделирования.
Для этого в поле *Dimension* выбирается режим *3D* (рисунок 96).
2. Загрузка сохраненной модели.

File → Read → Mesh

3. Проверка конечно-элементной сетки на наличие ошибок:

General → Mesh → Check

4. Масштабирование конечно-элементной сетки

Рассматриваемая модель была создана в миллиметрах и поэтому построенную сетку необходимо уменьшить в 1000 раз.

General → Mesh → Scale

В поле *Mesh was created in* (сетка была создана в...) в меню *Scale Mesh* нужно выбрать миллиметры *mm* (или другую единицу измерения, в которой была создана расчетная модель), а затем нажать кнопку *Scale* (рисунок 97).

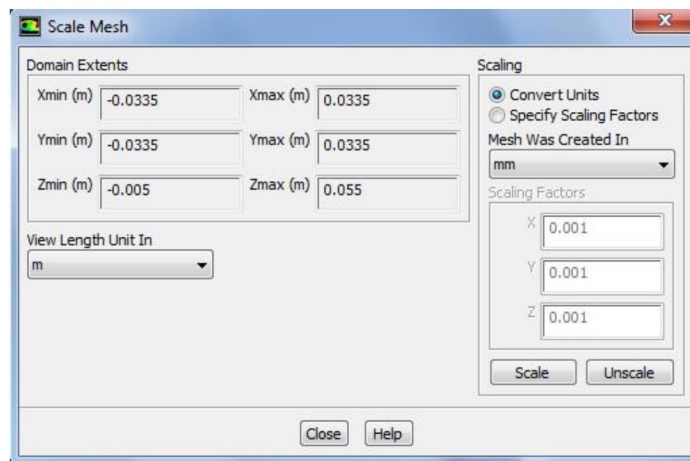


Рисунок 97 – Масштабирование модели

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

General → Mesh → Display

6. Задание опций решателя выполняется аналогично настройке решателя для *2D* модели:

General → Solver

Выбирается решатель *Pressure Based* и вводится значение ускорения свободного падения в поле *Gravitational Acceleration* для оси *Y* равное -9.81 (рисунок 98).

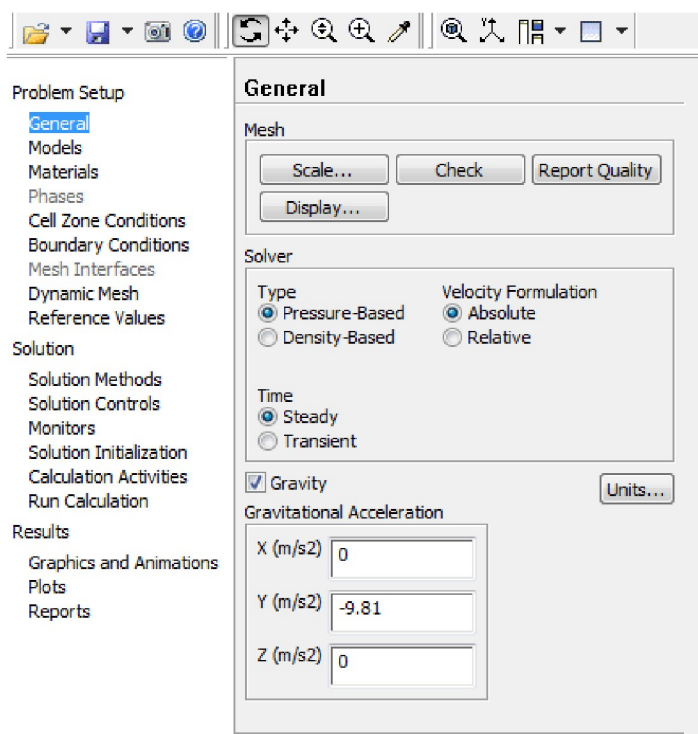


Рисунок 98 – Настройка опций решателя

7. Задание модели турбулентности (рисунок 99):

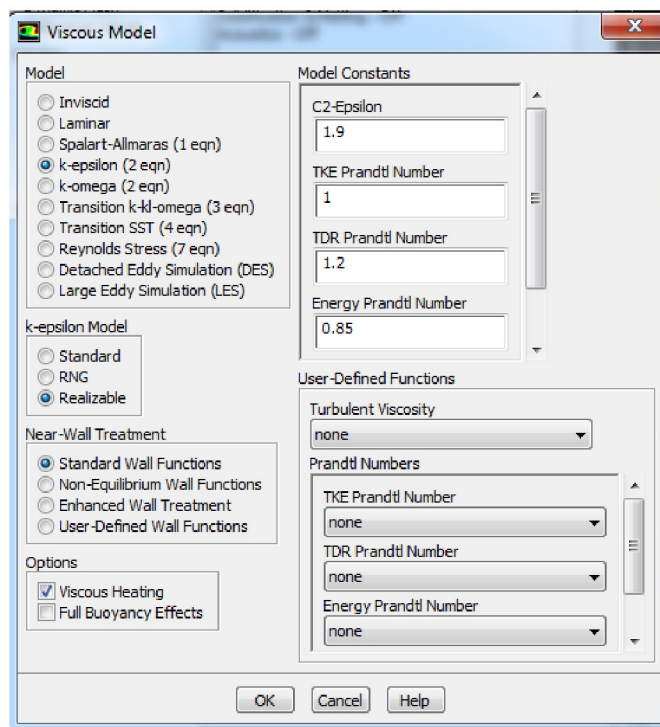


Рисунок 99 – Задание модели турбулентности

Выше показано, модель турбулентности выбирается следующим образом:

Models → Viscous

Из всех имеющихся моделей в данном меню выбирается *k-ε* (k-epsilon), *Realizable*.

8. Включение в расчет уравнения энергии осуществляется следующим образом:

Models → Energy

Активизируется поле *Energy Equation* и нажимается кнопка *OK*.

9. Задание свойств рабочего тела

Как уже было показано выше, задание свойств рабочего тела осуществляется в меню *Materials*, которое вызывается командой:

Define → Materials

Для того, чтобы осуществить эту установку, в меню *Materials* следует нажать кнопку *FLUENT Data Bases*, и далее в появившемся списке *FLUENT Fluid Materials* выбрать необходимые материалы: *Water-Liquid (Boda)* и нажать кнопку *Copy* (рисунок 100). В системе охлаждения двигателя внутреннего сгорания используется антифриз и поэтому необходимо выполнить следующие настройки в данном меню, изменив параметры воды:

- изменить свойства *water-liquid*: Density (плотность) = 1067; Cp (теплоемкость) = 2390; *Thermal Conductivity* (теплопроводность) = 0.3; *Viscosity* (вязкость) = 0.001839;
- нажать кнопку *Change/Create* для сохранения выполненных изменений.

10. Задание параметров зон.

В данном меню необходимо изменить свойства среды *fluid*: для этого выбирается данная среда, нажимается кнопка *Edit* и в поле *Material Name* активизируется *Water-Liquid* (рисунок 101). Данное действие осуществляется с помощью следующих манипуляций:

Cell Zone Conditions → Zone

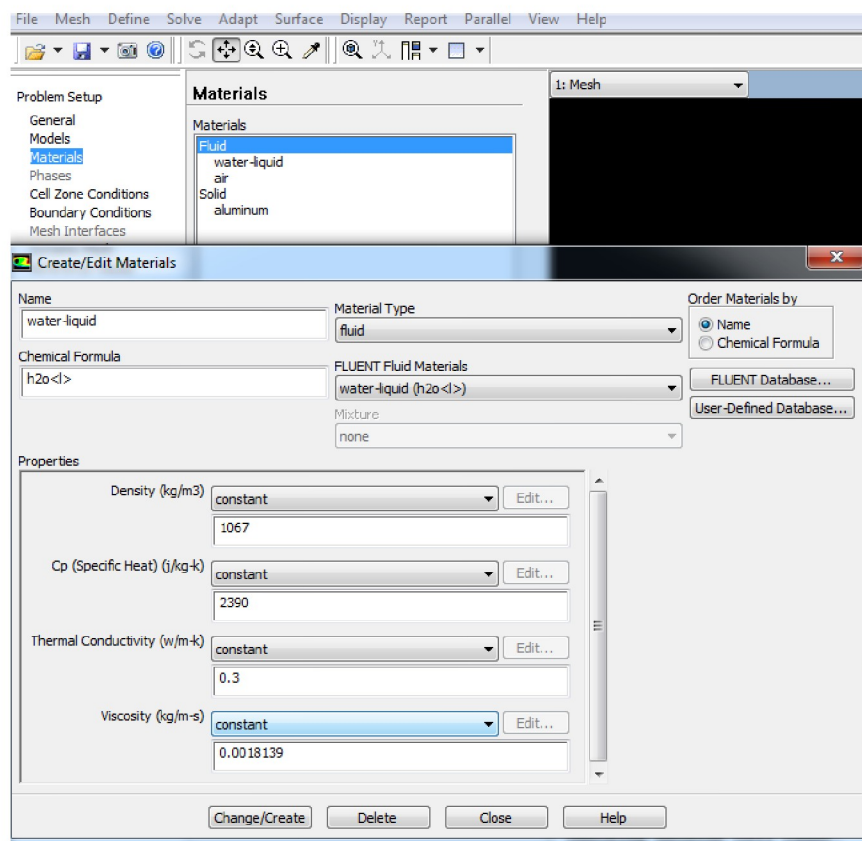


Рисунок 100 – Настройка свойств рабочего тела

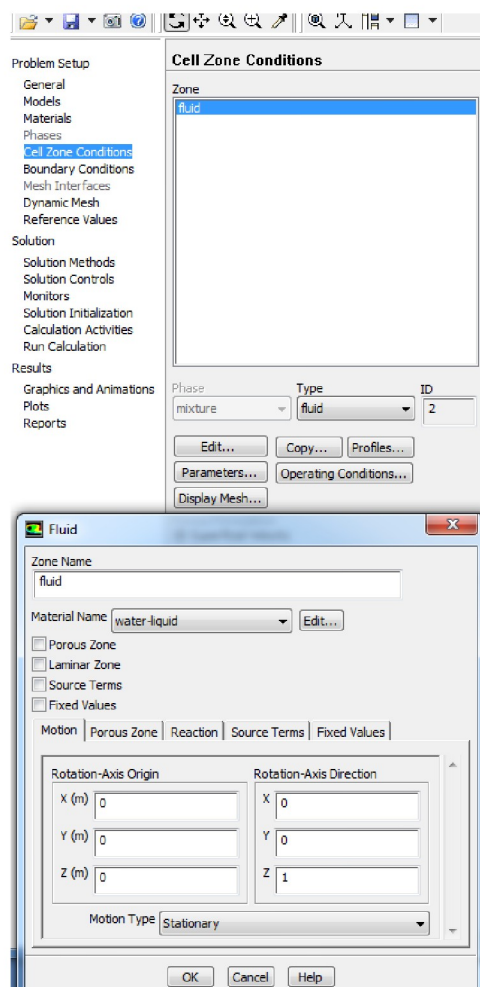


Рисунок 101 – Меню настройки параметров зон

11. Задание справочного давления

Аналогично процессу настройки решения 2D модели необходимо изменить значение «справочного давления» с помощью команды:

Define → Operating Condition.

В моделируемой задаче «справочное давление» задается равным 120 000, и данное значение следует ввести в поле *Operating pressure*.

12. Задание граничных условий.

Вызывается с помощью команды:

Define → Boundary Condition

Для того чтобы приступить к заданию граничных условий, необходимо в окне *Zone* выбрать нужное граничное условие (рисунок 102), убедиться, что в окне *Type* тип граничного условия указан, верно, и нажать *Edit...*

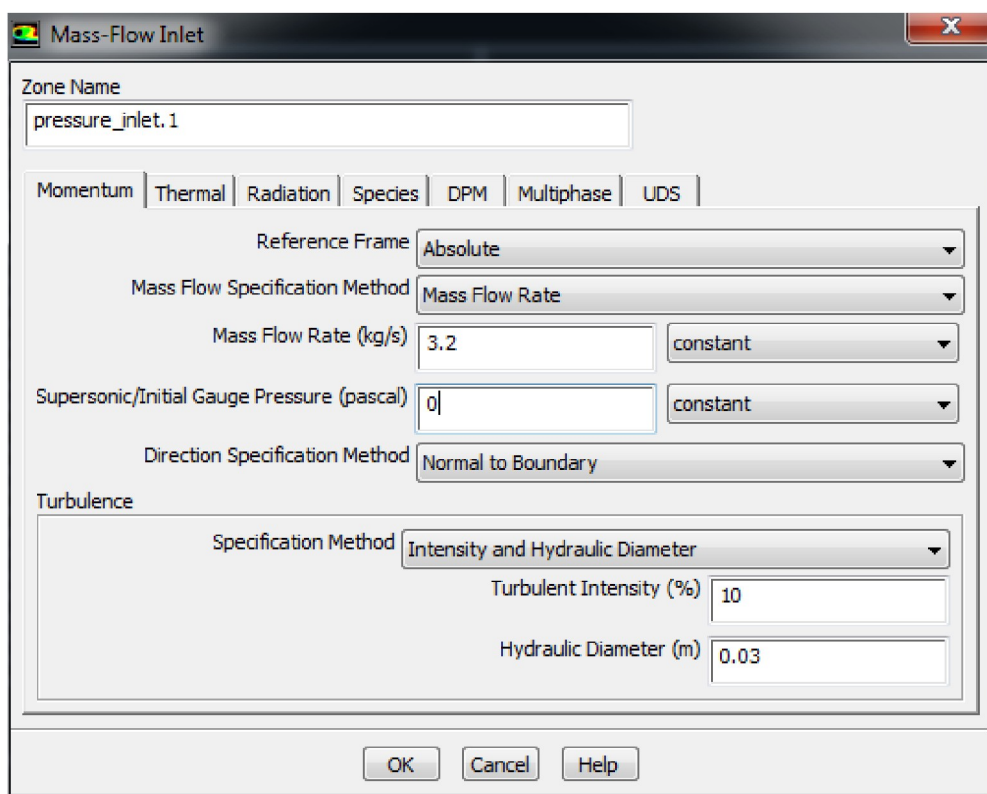


Рисунок 102 – Меню настройки граничного условия *pressure_inlet.1*

а. Установить параметры для *pressure_inlet.1*:

- *Type* - **Mass-flow-inlet Momentum**;
- *Mass Flow Rate* - **3.2**;
- *Supersonic/Gauge Pressure* - **0**;

- *Direction Specification Method* - **Normal to Boundary Turbulence**;
- *Turbulent Intensity* - **10**;
- *Hydraulic Diameter* - **0.03**.

Thermal

- *Total Temperature* - **363**.
- b. Установить параметры для *pressure_outlet.3* (рисунок 103):
- *Type* - **Outflow**;
 - *Flow Rate Weighting* - **1**.

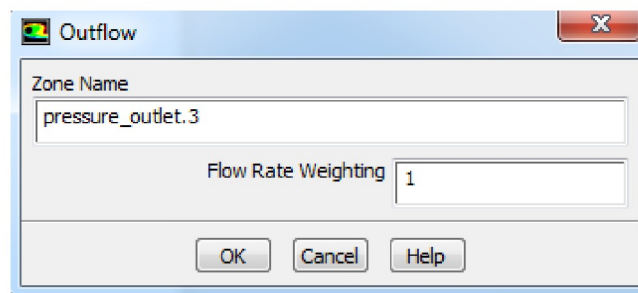


Рисунок 103 – Меню настройки граничного условия *pressure_outlet.3*

- c. Настройка граничных условий для трубок и пластин радиатора (RAD) осуществляется следующим образом (рисунок 104):

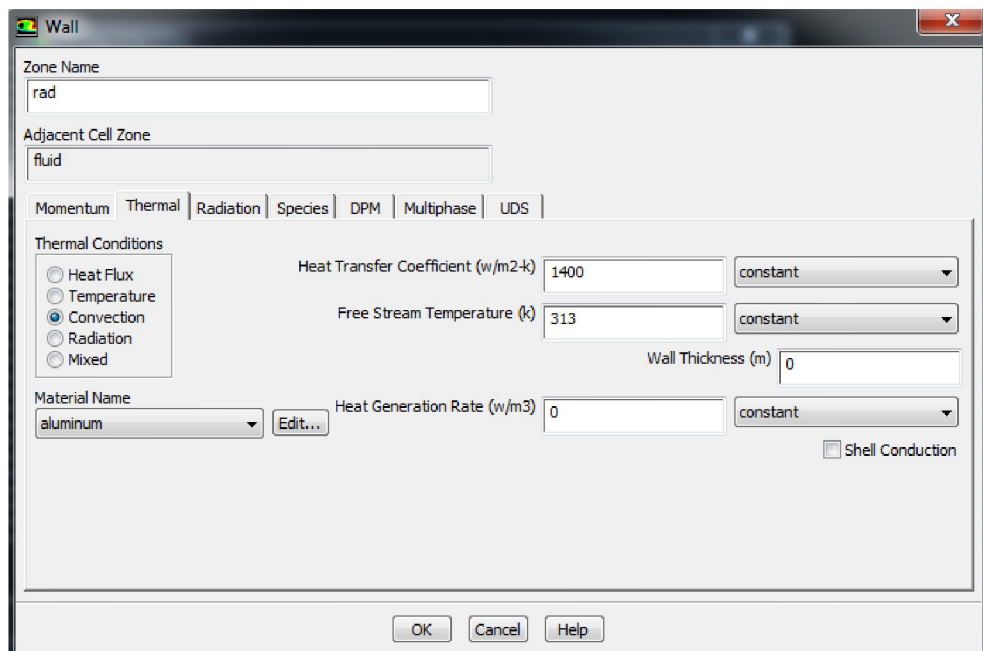


Рисунок 104 – Меню настройки граничного условия *rad*

- *Type* - **Wall**;
- *Thermal Conditions* - **Convection**;

- *Heat Transfer Coefficient* - **1400**;
- *Free Stream Temperature* - **313**.

13. Установка параметров расчета:

Solution Methods → *Spatial Discretization*

Как и для моделирования процессов в *2D* модели, в зоне *Spatial Discretization* определяются схемы дискретизации соответствующих уравнений, то есть описывается алгоритм построения дискретного аналога дифференциального уравнения в узле конечно-элементной сетки. В данном случае необходимо установить *Second Order Upwind* (второй порядок дискретизации) для *Momentum* и *Energy*.

14. Установка подрелаксационных коэффициентов (рисунок 105).

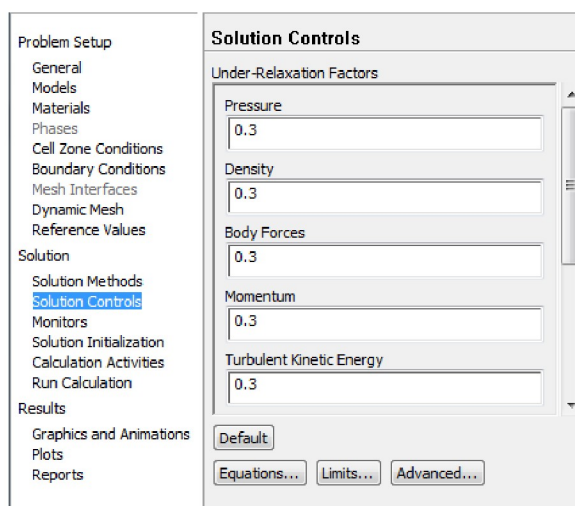


Рисунок 105 – Меню установки подрелаксационных коэффициентов

В данном случае настройка этих параметров осуществляется следующим образом:

Solution → *Solution Control*

Для моделируемой задачи следует задать значение всех подрелаксационных коэффициентов равными 0.3.

15. Инициализация начальных значений параметров *3D*-модели.

Solution → *Solution Initialization*

В этом меню в поле *Compute From* необходимо выбрать входную границу и затем нажать *Initialize* (рисунок 106).

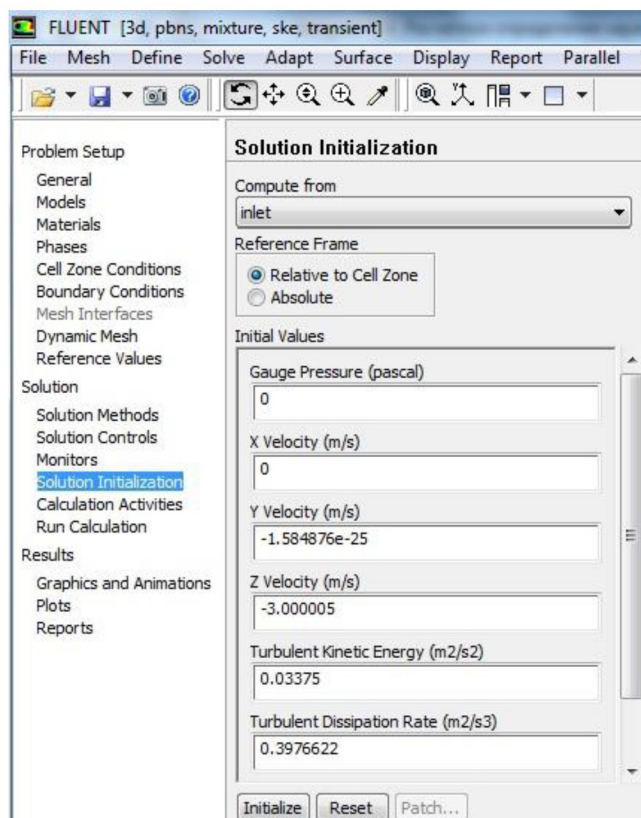


Рисунок 106 – Меню инициализация начальных значений параметров

16. Сохранение расчетной модели.

Для сохранения расчетной модели и всех сделанных настроек решателя необходимо вызвать команду:

File → Write → Case.

17. Запуск расчета для 3D-модели осуществляется следующим образом (рисунок 107):

Solution → Run Calculation

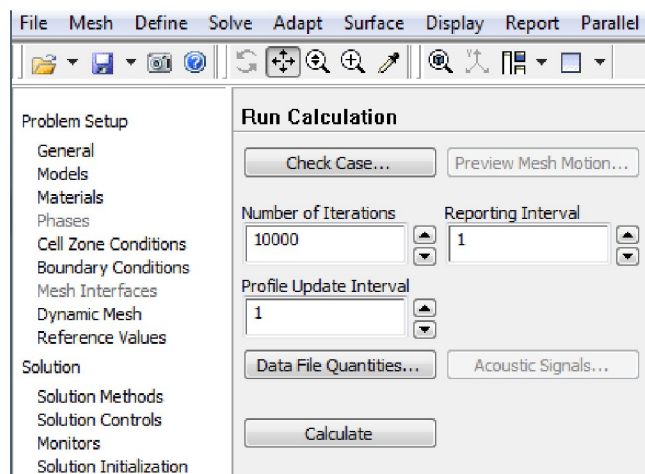


Рисунок 107 – Запуск расчета

В поле *Number of Iterations* задается число итераций, равное 10000. Запуск расчета осуществляется нажатием кнопки *Calculate* в меню запуска решения.

18. Обработка результатов вычисления.

Данный процесс происходит аналогично процессу просмотра для 2D модели. Например, на рисунках 108, 109 представлен процесс визуализации векторов скорости в теплообменнике, который запускается с помощью команды:

Results → Graphics → Vectors

19. Определение значения полной температуры жидкости на выходе.

Данная манипуляции осуществляется с помощью следующей команды:

Results → Reports → Surface Integrals

В поле *Report Type* необходимо выбрать *Mass-Weighted Average*(параметр осредненный по массе), во вкладке *Field Variable* выбрать *Temperature* и *Total Temperature* под ней (рисунок 110).

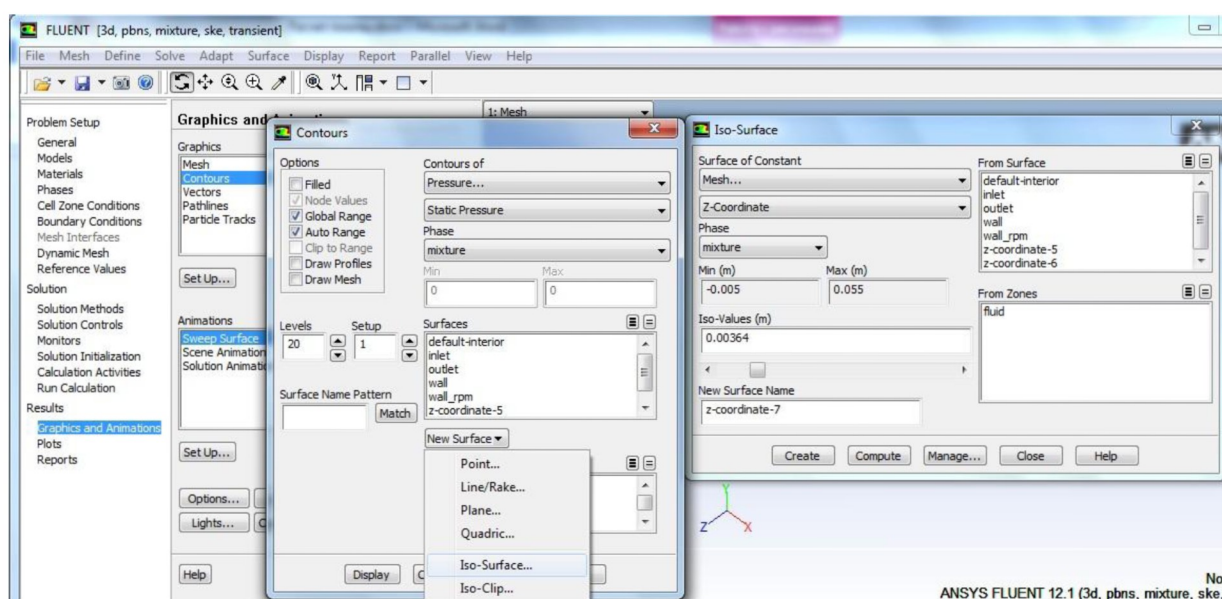


Рисунок 108 – Основные меню визуализации результатов расчета

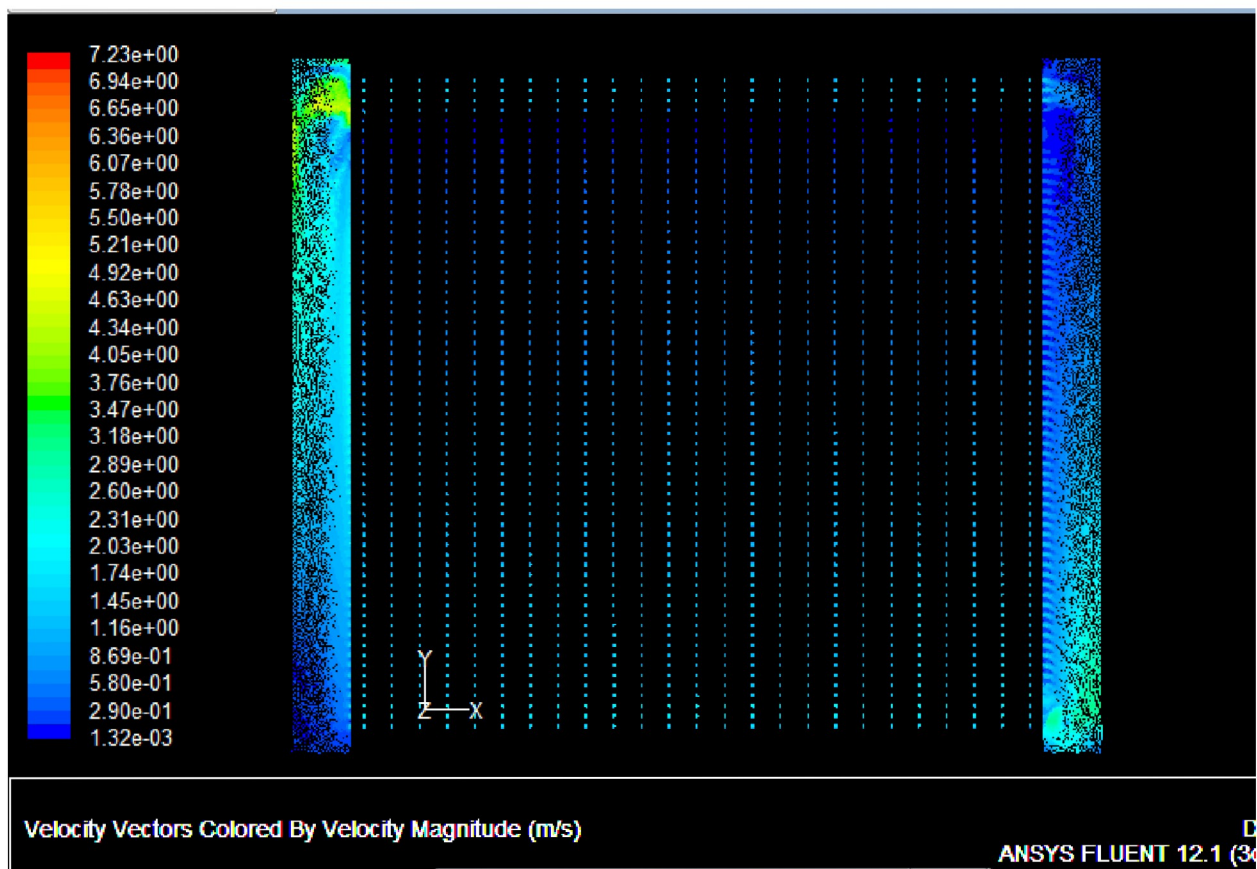


Рисунок 109 – Распределение векторов скорости в межреберном канале радиатора

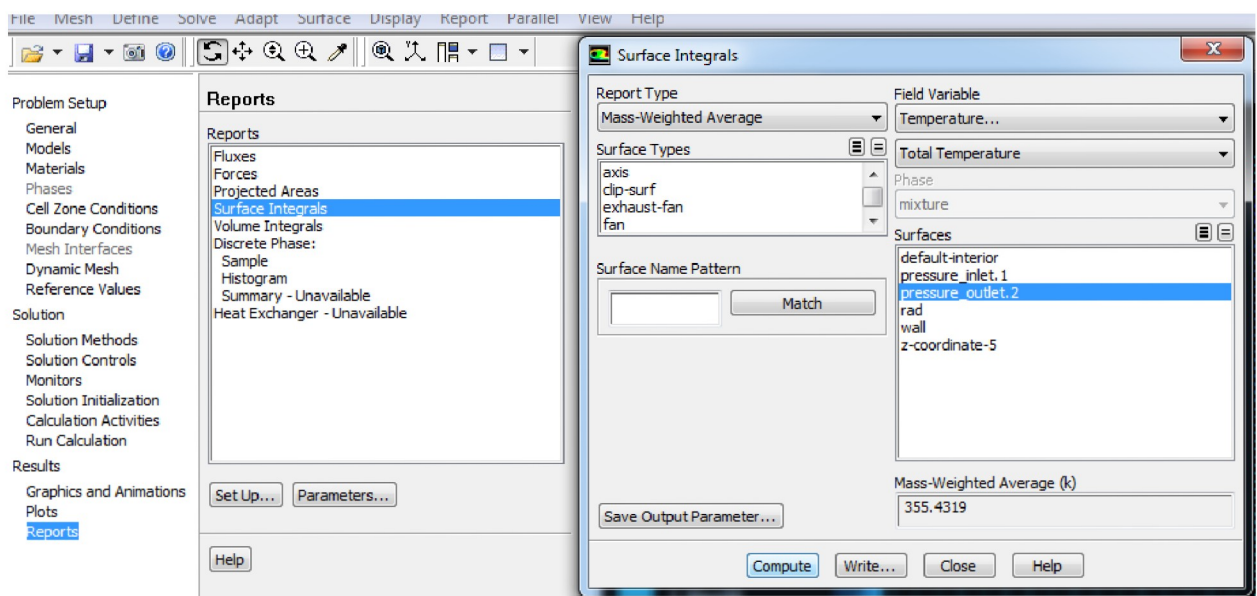


Рисунок 110 – Определение значения полной температуры жидкости на выходе

В поле *Surfaces* выбирается выходное сечение и нажимается кнопка *Compute*. Получено значение температуры потока на выходе из радиатора в 355K. Таким образом падение температуры в радиаторе попадает в интервал $\Delta=6...12^{\circ}\text{C}$, принятый за оптимальный.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толстоногов А.П. Системы охлаждения поршневых двигателей внутреннего сгорания [Текст] : учеб. пособие / А.П. Толстоногов, И.В. Коломин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009. – 168 с.: ил.
2. Орлин А.С. Двигатели внутреннего сгорания. Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей [Текст] / А.С. Орлин – М.: Машиностроение, 1990. – 253 с.
3. Колчин А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей [Текст] / Колчин А.И., Демидов В.П. – М.: Высшая школа, 2008. – 496 с.
4. Батурин О.В. Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса. Часть 2. Построение расчетных моделей в препроцессоре Gambite [Текст] / О.В. Батурин, И.И. Морозов, В.Н. Матвеев – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2008. – 125 с.
5. Батурин О.В. Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса. Часть 3. Работа в программе Fluent [Текст] / О.В. Батурин, И.И. Морозов, В.Н. Матвеев – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2008. – 115 с.