МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ВПРЫСКОМ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по программам высшего образования по специальности 140501.65 Двигатели внутреннего сгорания и направлениям подготовки 141100.62 Энергетическое машиностроение, 160700.68 Двигатели летательных аппаратов

САМАРА
Издательство СГАУ
2012

УДК 621.4(075)+004.9(075)
ББК 31.365я7+32.97я7
М744

Авторы: ***В.В. Бирюк, А.А. Горшкалев, С.С. Каюков, Д.А. Угланов***

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В.Н. Матвеев

М744 Моделирование тепловых процессов в камере сгорания поршневого двигателя с непосредственным впрыском: учеб. пособие / [В.В. Бирюк и др.]. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. – 88 с.

ISBN 978-5-7883-0921-0

Расчёт параметров рабочего процесса двигателей является одной из важнейших инженерных задач.

В данном пособии представлена методика моделирования рабочих процессов двигателя внутреннего сгорания с использованием CAD/CAE – технологий. Особое внимание уделяется созданию методики объемного моделирования с использованием движущейся конечно-элементной. Представлена методика расчета газодинамических процессов в двигателе внутреннего сгорания с непосредственным впрыском с использованием программы *Fluent*, позволяющей получить поля распределений всех основных термодинамических параметров.

Учебное пособие предназначено для подготовки специалистов по специальности 140501.65 Двигатели внутреннего сгорания, изучающих дисциплину «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания» в 5 семестр, бакалавров по направлению 141100.62 Энергетическое машиностроение, изучающих дисциплину «Теория рабочих процессов ДВС» в 5, 6 семестре, магистров по направлению 160700.68 Двигатели летательных аппаратов, изучающих дисциплину «Газовая динамика агрегатов и систем ДВС» в семестрах А,В, магистров по направлению 160700.68 Двигатели летательных аппаратов, изучающих дисциплину «Процессы горения и экология двигателей внутреннего сгорания (ДВС)» в 9 семестре.

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.

Подготовлено на кафедре теплотехники и тепловых двигателей СГАУ.

УДК 621.4(075)+004.9(075)
ББК 31.365я7+32.97я7

ISBN 978-5-7883-0921-0

© Самарский государственный аэрокосмический университет, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ, СОКРАЩЕНИЙ И СИМВОЛОВ 4

ВВЕДЕНИЕ 5

1 МЕТОДИКА ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЧАСТИ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВИЖУЩЕЙСЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ СЕТКИ 6

1.1 Подготовка расчетной модели 6

1.2. Рассечение объема модели вспомогательными поверхностями 11

1.3. Построение сетки 33

1.4. Назначение граничных условий 40

1.5. Назначение типа зон 48

1.6. Подготовка текстового файла описывающего профиль клапанов и перемещение границы между сетками с треугольными и прямоугольными элементами 50

2 МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЕ ДВС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ *ANSYS FLUENT* 51

2.1 Настройка параметров сетки 51

2.2 Настройка модели решателя 52

2.3 Задание параметров модели смешения и свойств рабочего тела 53

2.4 Настройка граничных условий 56

2.5 Настройка зон пересечения сетки 59

2.6 Настройка параметров движения сетки 60

2.7 Настройка параметров процесса впрыска 73

2.8 Предварительный просмотр движения сетки 75

2.9 Настройка начальных параметров модели 76

2.10 Запуск решения задачи 78

2.11 Анализ результатов решения 78

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 84

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 85

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ, СОКРАЩЕНИЙ И СИМВОЛОВ

D, d – диаметр, м;

F – площадь, м^2;

G – массовый расход, кг/с;

P – давление, Па;

P – площадь, м^2;

T – температура, К;

V – объем, м^3;

W – скорость, м/с;

X, Y – текущие координаты, м;

ρ – плотность, $^{кг}/_{м^3}$;

t – время, *с;*

ДВС – двигатель внутреннего сгорания;

ТВС – топливно-воздушная смесь;

КВ – коленчатый вал;

РВ – распределительный вал;

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.

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование процессов работы двигателя внутреннего сгорания – одна из важнейших инженерных задач в области расчетной газодинамики. Непосредственный впрыск топлива в цилиндр двигателя осуществляется для повышения эффективности топливовоздушной смеси и распределения топлива в многоцилиндровом двигателе. В данном информационном ресурсе рассматривается двумерная модель работы двигателя с впускным и выпускным клапанами. Исследуемый двигатель работает с частотой 2000 об/мин. Моделирование процессов подачи топлива, сжатия и расширения топливовоздушной смеси и выхлопа осуществляется без процесса горения топлива. Процесс впрыска топлива смоделирован с испарением капель топлива. Процесс соударения топливных капель с клапаном моделируется с помощью специальных условий стенки в программе Fluent.

1 МЕТОДИКА ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЧАСТИ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВИЖУЩЕЙСЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ СЕТКИ

1.1 Подготовка расчетной модели

Построение трехмерной модели поршня, цилиндра и части ГБЦ с впускными и выпускными каналами и клапанами осуществлялось в CAD редакторе *SolidWorks* (рисунок 1.)

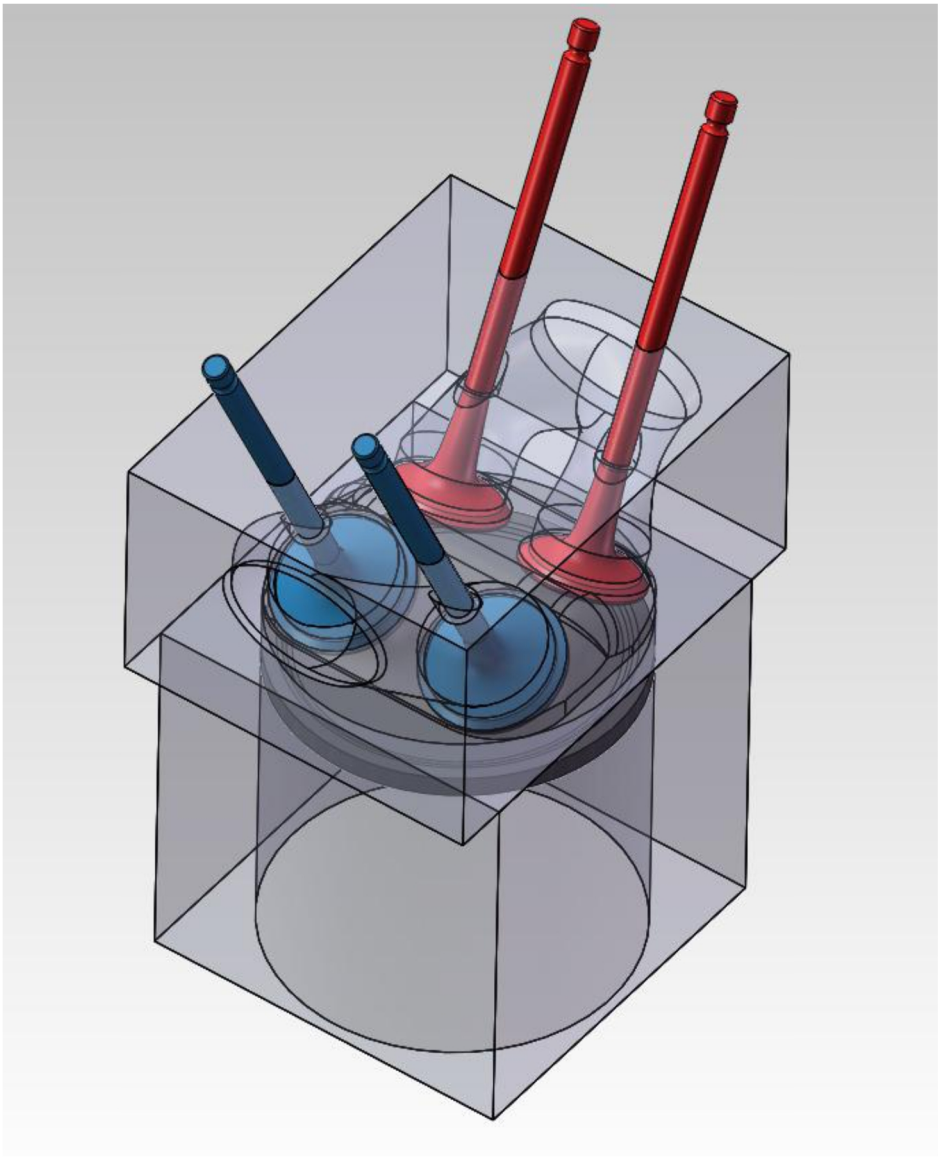


Рисунок 1 – Трехмерная модель части ГБЦ с впускными и выпускными каналами, клапанами и поршня с цилиндром

Модель, построенная в CAD редакторе *SolidWorks*, необходимо импортировать в сеточный генератор *ANSYS Gambit*. В разделе построения геометрии инструментами булевых операций выполнить создание трехмерной модели камеры сгорания.

Для создания трехмерной модели камеры сгорания необходимо выполнить следующие действия:

Geometry (Геометрия) → ***Volume*** (Объем) → **Create Volume** (Создание объема)

В появившемся меню *Create Real Brick* необходимо ввести размеры вспомогательного куба: X=200, Y=250, Z=200, в соответствии с рисунком 2.

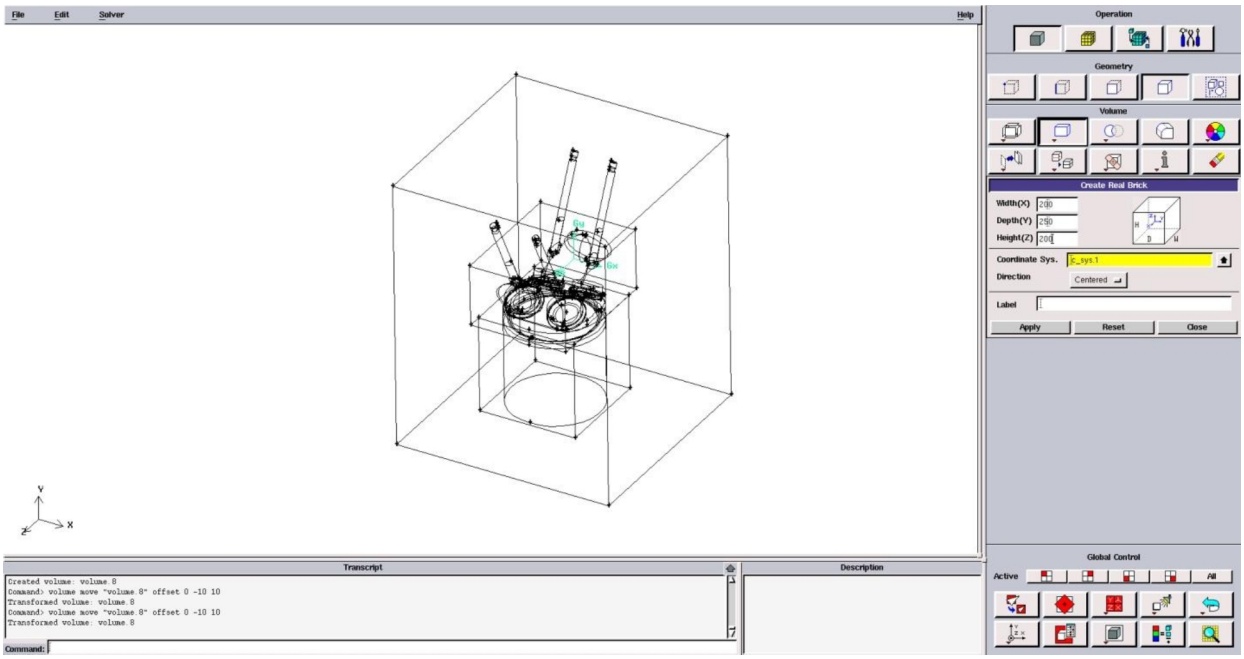


Рисунок 2 – Построение вспомогательного куба

Geometry (Геометрия) → ***Volume*** (Объем) → **Subtract Volume** (Вычитание объема)

В появившемся меню *Subtract Real Volumes* необходимо выбрать: в списке *Volume* – объем построенного куба, в *Volumes* – объемы импортированной модели. Для завершения булевой операции нажимается кнопка *Apply*. В результате остается один объем (выделенный красным

цветом на рисунке 3), что свидетельствует об успешном выполнении операции.

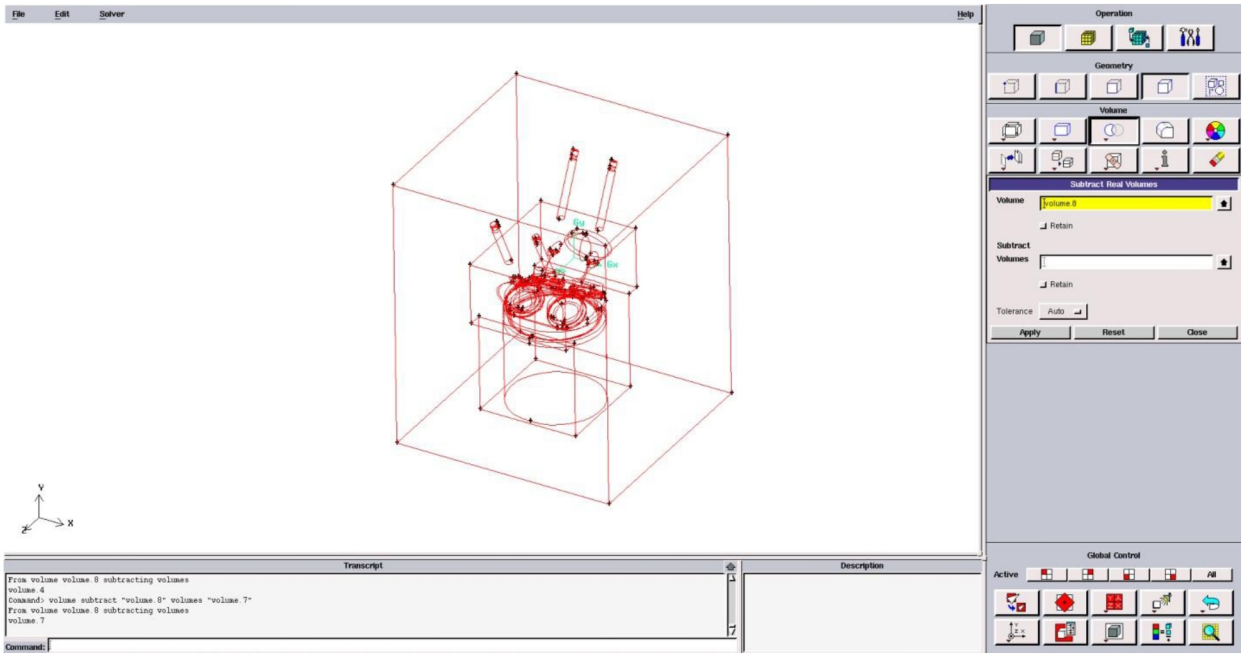


Рисунок 3 – Единый объем после выполнения булевых операций

Далее объем рассекается плоскостями образованными эллипсами впускного и выпускного каналов. Для создания этих плоскостей выполняются следующие действия:

Geometry (Геометрия) → ***Face*** (Поверхность) → **Form face** (Формирование поверхности)

В появившемся меню *Create Face from Wireframe* необходимо выбрать опцию *Edge List (Multiple)*, в которой показаны доступные (*Available*) для выбора отрезки и выбранные (*Picked*). С помощью мыши поочередно выбираются линии эллипсов каждого из каналов, как показано на рисунке 4. Для завершения операции построения поверхности нажимается кнопка *Apply*, в результате построения получаются две плоскости.

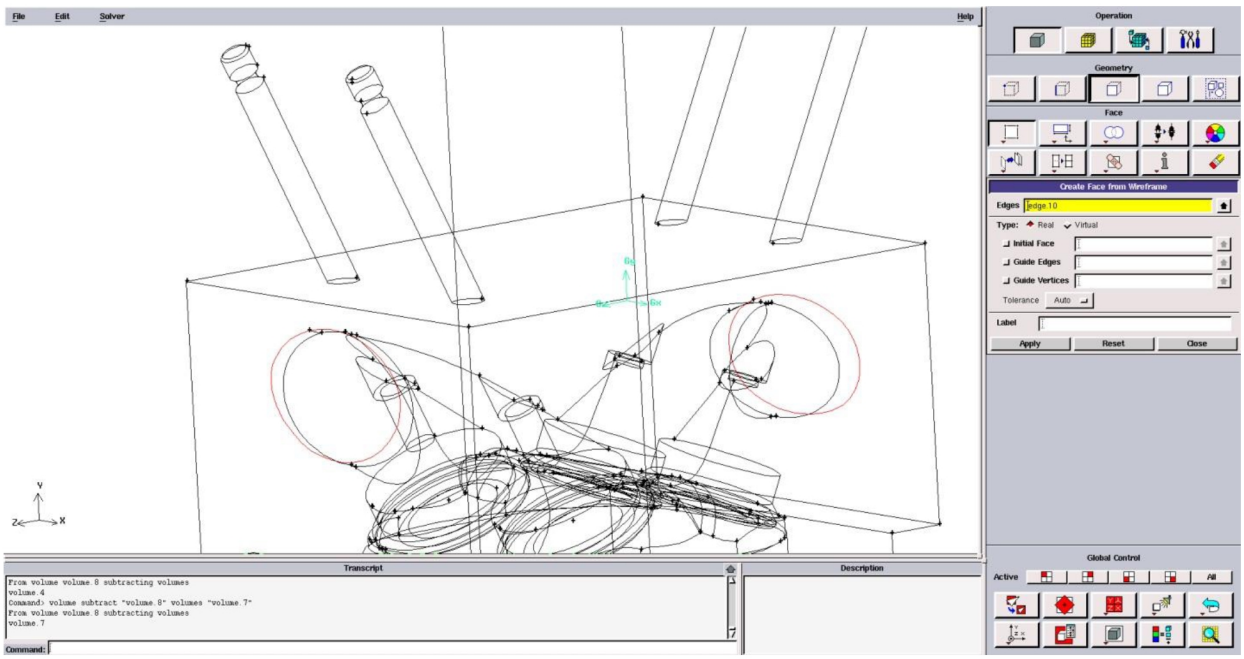


Рисунок 4 – Выбранные линии эллипсов каналов

Для рассечения объема данными плоскостями необходимо выполнить следующие действия:

Geometry (Геометрия) → ***Volume*** (Объем) → ***Split Volume*** (Разделение объема)

В появившемся меню *Split Volume* выбрать опцию *Split With Faces (Real)*, в которой показаны доступные (*Available*) для выбора поверхности и выбранные (*Picked*). С помощью мыши необходимо выбрать поверхности, построенные ранее (рисунок 5). Для правильного выполнения операции отключаются опции *Bidirectional* и *Connected*. Для завершения операции необходимо нажать кнопку *Apply*, в результате чего получатся два объема (рисунок 6).

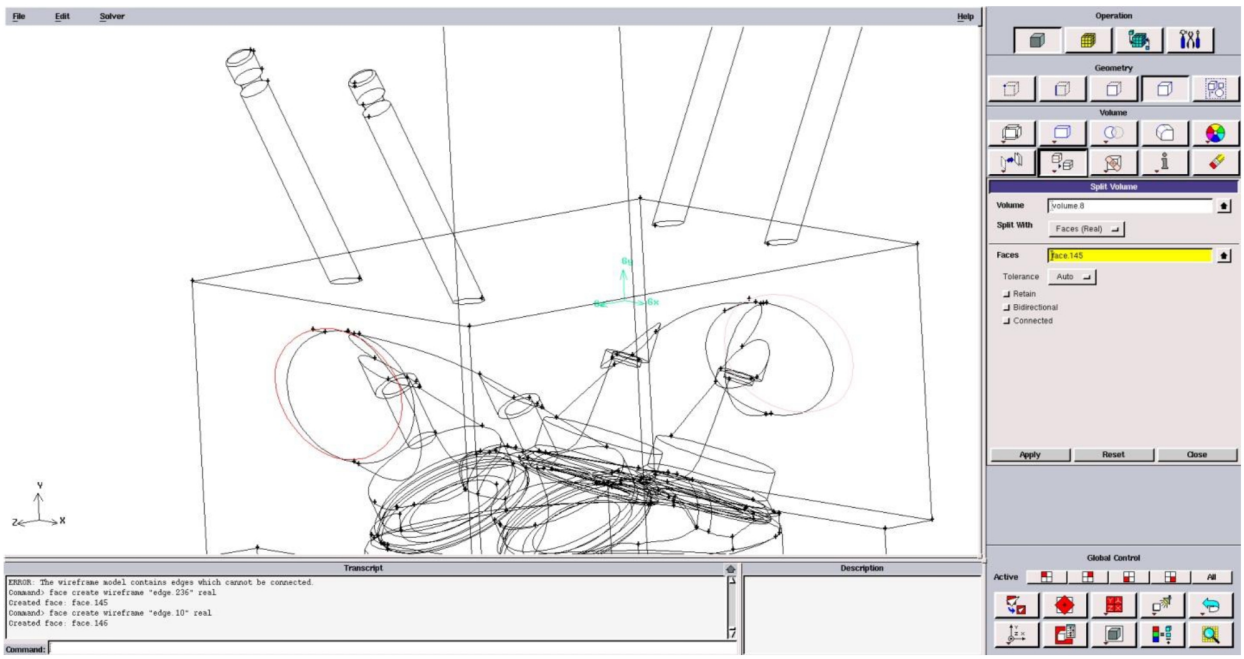


Рисунок 5 – Выбранные поверхности для рассечения объема

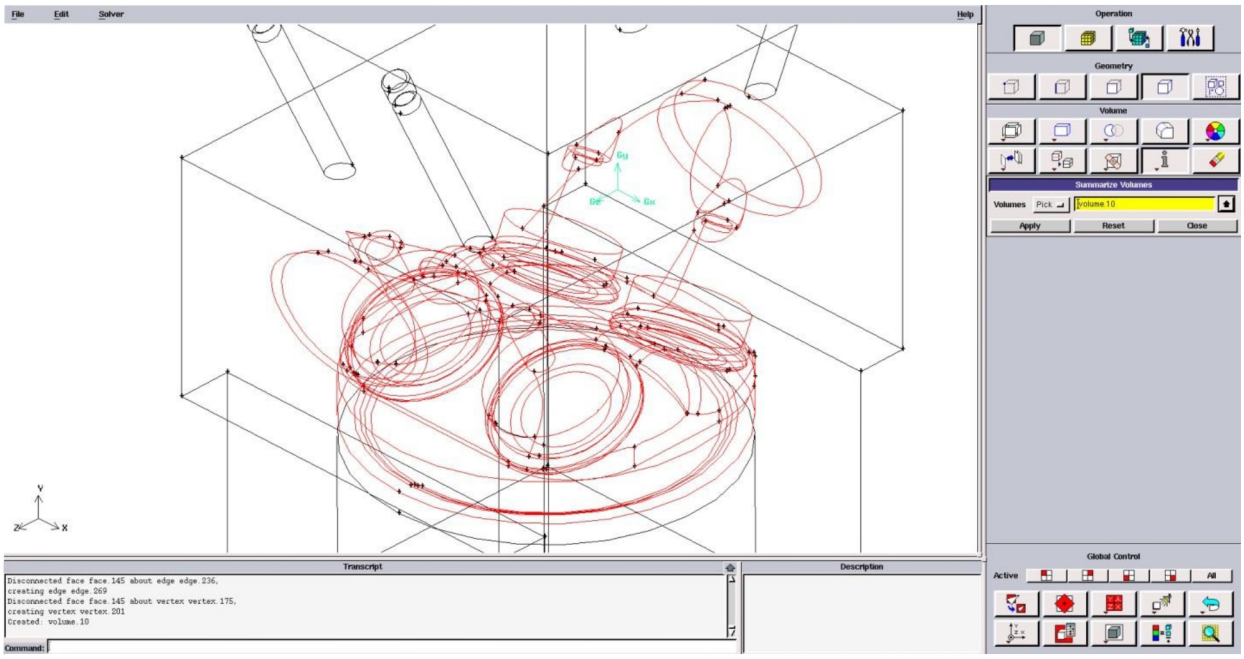


Рисунок 6 – Объемы, полученные после операции рассечения

После этого необходимо удалить лишний объем вокруг камеры сгорания с помощью следующих действий:

Geometry (Геометрия) → ***Volume*** (Объем) → **Delete Volume** (Удаление объема)

В появившемся меню *Delete Volumes* выбирается опция *Volume List (Multiple)*, в которой показаны доступные (*Available*) для выбора объемы и выбранные (*Picked*). С помощью мыши необходимо выбрать объем вокруг камеры сгорания, после чего для завершения операции нажимается кнопка *Apply*, в результате ненужный объем будет удален (рисунок 7).

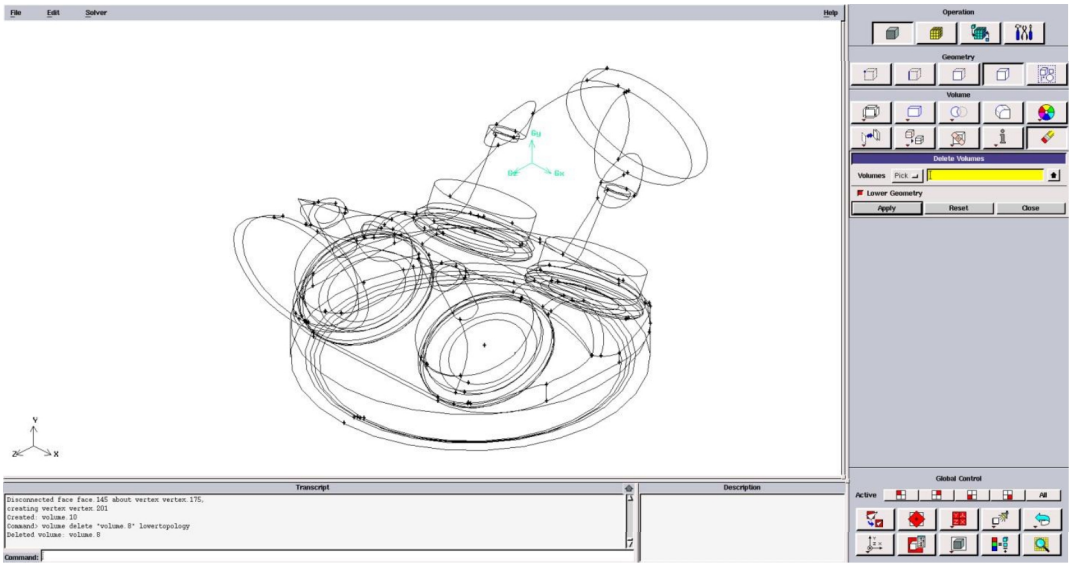


Рисунок 7 – Результат построения модели

1.2. Рассечение объема модели вспомогательными поверхностями

Полученный объем необходимо рассечь на несколько объемов, согласно схеме на рисунке 8

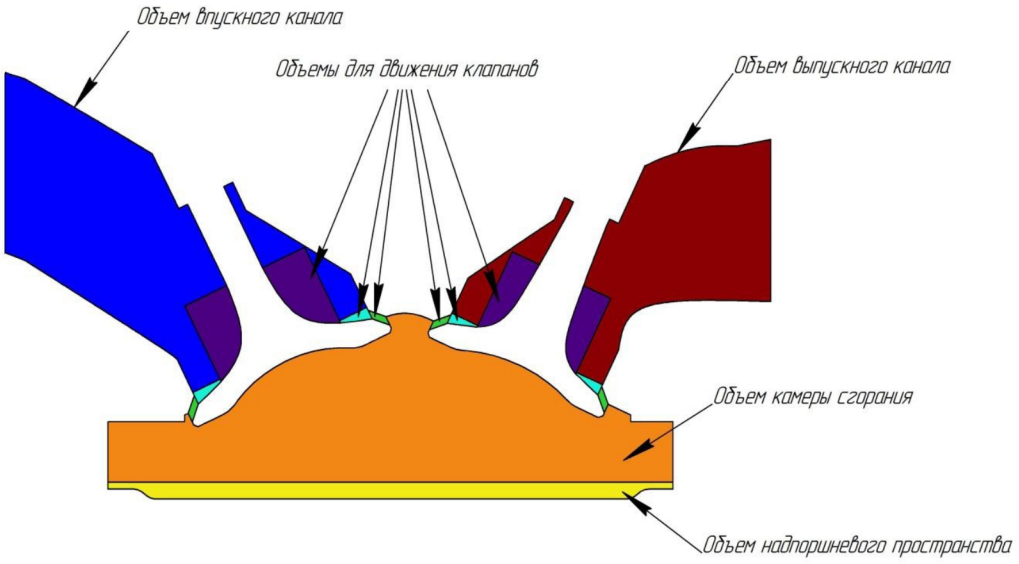


Рисунок 8 – Схема рассечения модели

Создание поверхностей для рассечения модели на отдельные объемы в области клапанов выполняется следующим образом:

а) в зоне перехода цилиндрической части канала в область седла клапана создается точка с соответствующими координатами так, чтобы можно было построить отрезок параллельный линии боковой поверхности цилиндра выпускного канала от созданной точки и до имевшейся точки на окружности цилиндрической поверхности выпускного канала, как показано на рисунке 9. Координаты созданной точки выбираются так, чтобы она попала в область «пустоты» клапана, это необходимо для достоверного рассечения объема модели (рисунок 10).

Для создания точки выполняются следующие действия:

Geometry (Геометрия)  → ***Vertex*** (Точка)  → **Create Real Vertex** (Создание реальной точки) 

В полях меню *Global* вводятся координаты точки, после чего для завершения операции нажимается кнопка *Apply* .

Для создания отрезка необходимо выполнить следующие действия:

Geometry (Геометрия)  → ***Edge*** (Отрезок)  → **Create Straight Edge** (Создание прямого отрезка) 

В появившемся меню *Create Straight Edge* выбирается опция *Vertex List (Multiple)*, в которой показаны доступные (*Available*) для выбора точки и выбранные (*Picked*). С помощью мыши выбирается созданная и существующая точки, после чего для завершения операции нажимается кнопка *Apply* .

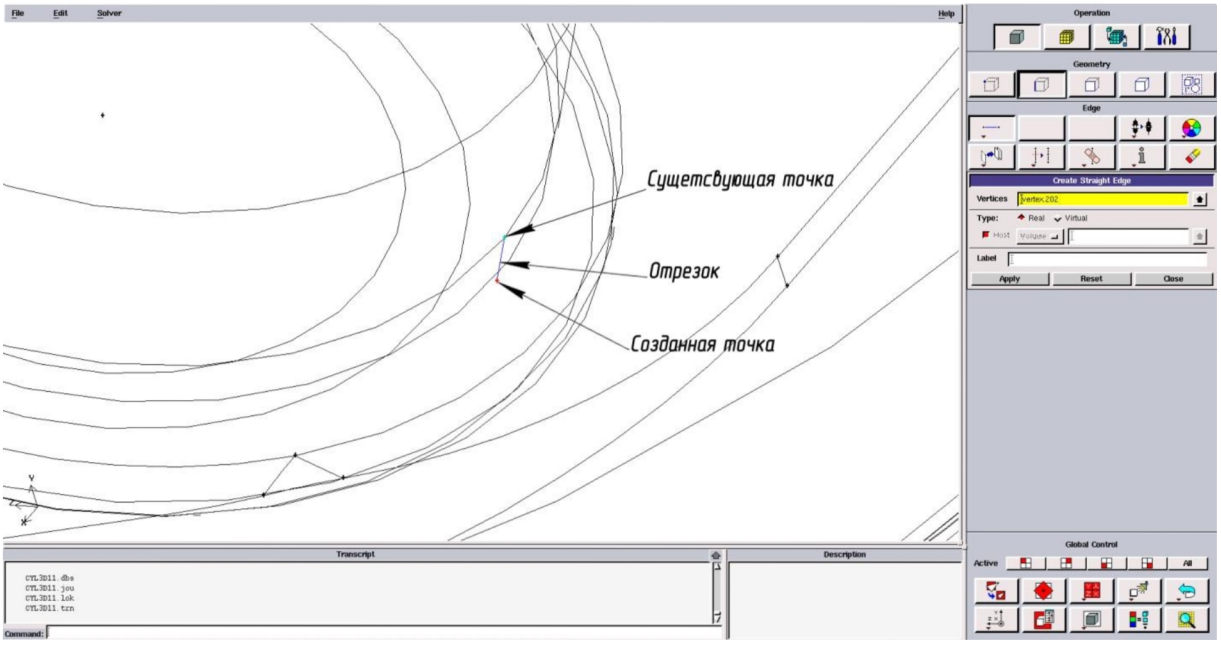


Рисунок 9 – Расположение отрезка и его точек

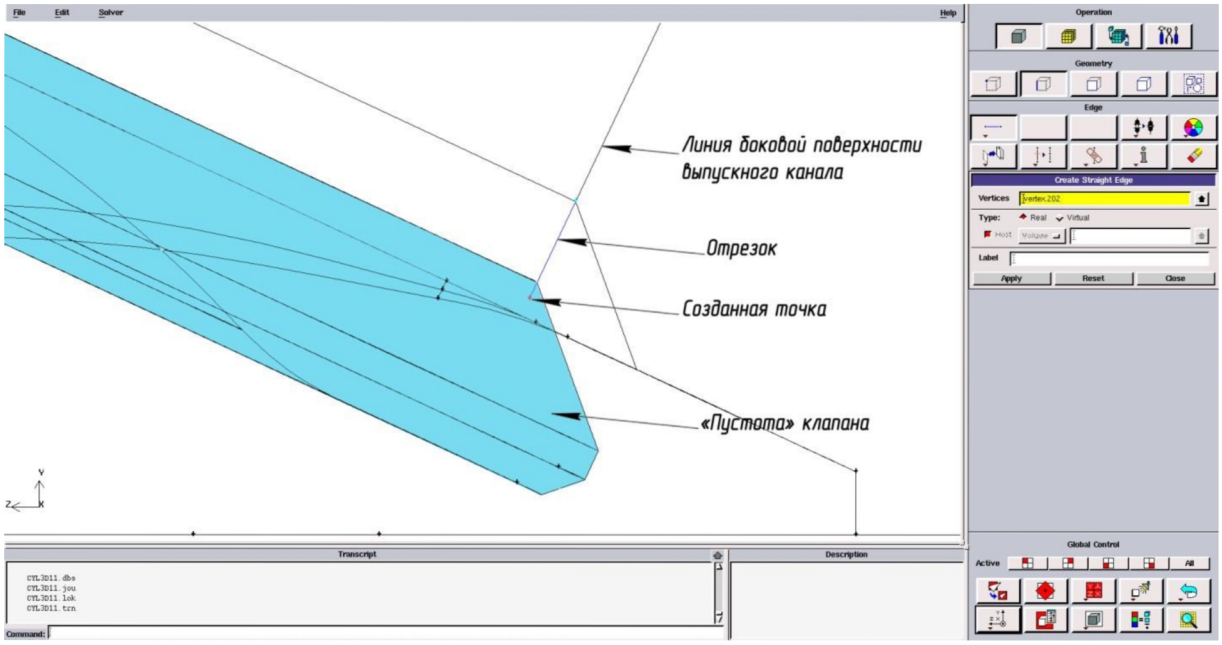


Рисунок 10 – Расположение отрезка относительно объема модели

б) Для создания поверхности необходимо выполнить следующие действия:

Geometry (Геометрия)  → ***Face*** (Поверхность)  → **Sweep Edges** (Развертка отрезков) 

В появившемся меню *Sweep Edges* в поле *Edges* выбирается опция *Edge List (Multiple)*, в которой показаны доступные (*Available*) для выбора отрезки и выбранные (*Picked*). С помощью мыши необходимо выбрать окружность, принадлежащую выпускному каналу, а в поле *Edge* выбрать построенный ранее отрезок. После выбора, на нем появится стрелка (направленная вниз) указывающая направление развертки окружности. Для завершения операции построения поверхности нажимается кнопка *Apply*. В результате отрезок с точкой будет удален, а вместо них появится кольцевая поверхность (рисунок 11).

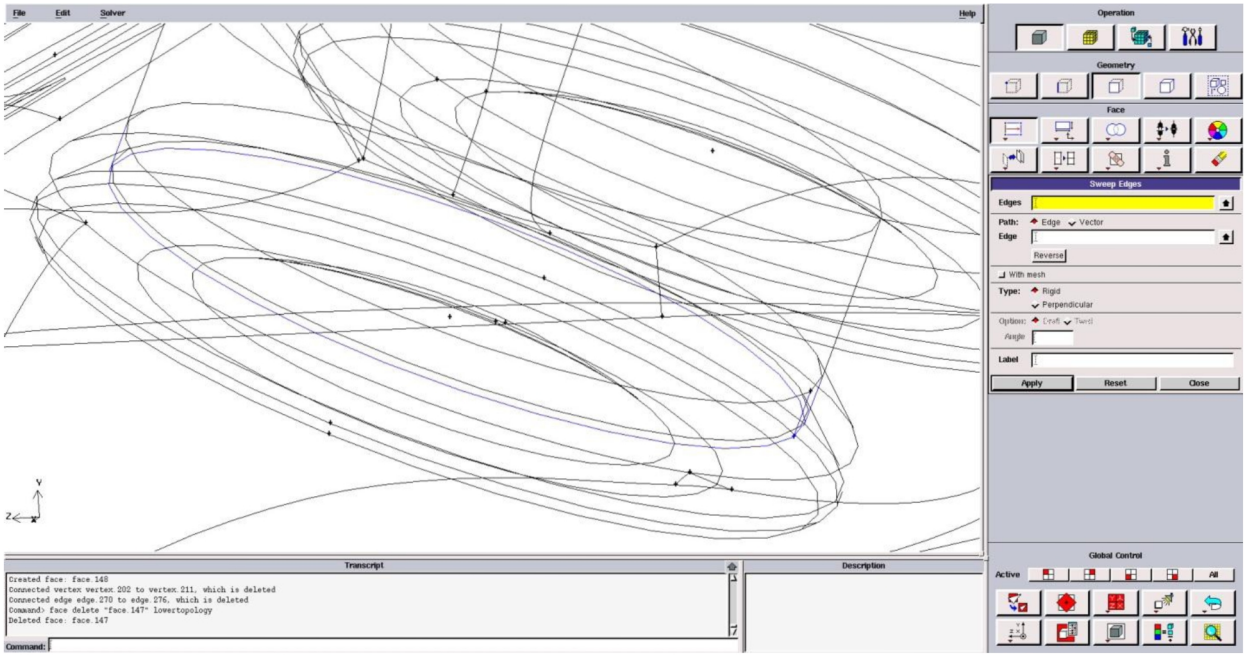


Рисунок 11 – Поверхность для рассечения объема модели

После построения поверхности, выполняется рассечение объема модели этими поверхностями с помощью следующих действий:

Geometry (Геометрия)  → ***Volume*** (Объем)  → ***Split Volume*** (Разделение объема) 

В появившемся меню *Split Volume* выбирается опция *Split With Faces (Real)*, в которой показаны доступные (*Available*) для выбора поверхности и выбранные (*Picked*). С помощью мыши выбирается созданная кольцевая поверхность, построенная ранее. Для правильного выполнения операции

необходимо отключить опции *Bidirectional* и *Connected*. Для завершения операции нажимается кнопка *Apply* (рисунок 12).

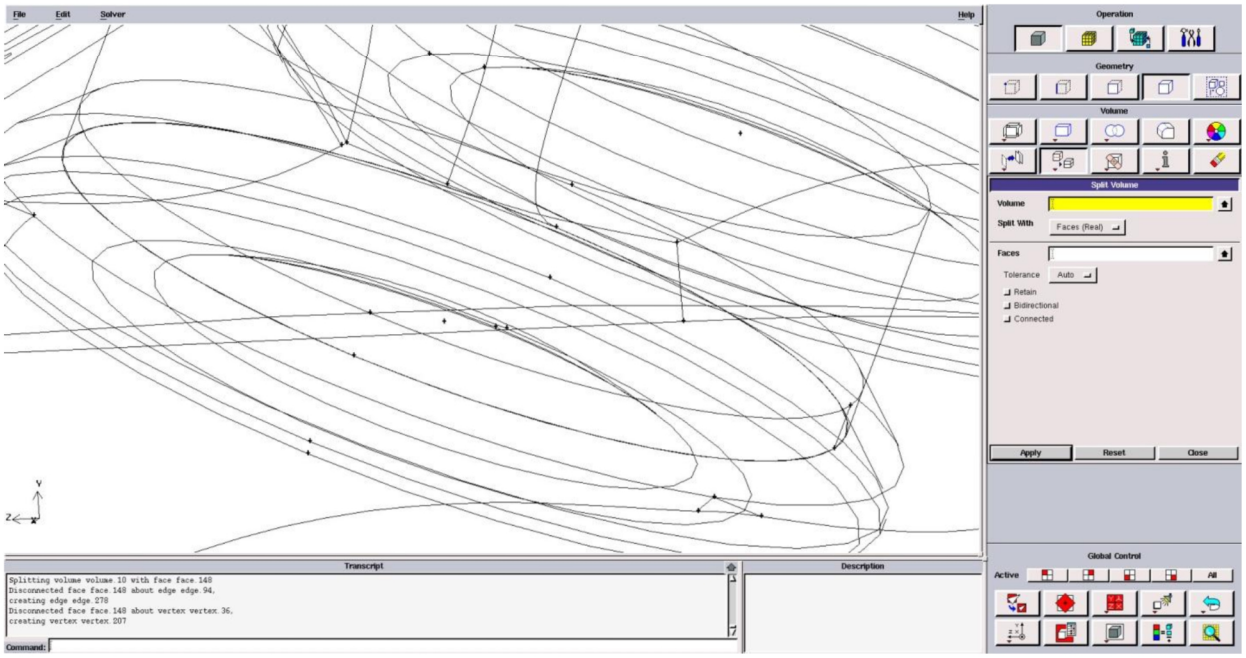


Рисунок 12 – Объем модели после рассечения поверхностью

Аналогичным образом выполняется построение поверхности, разрезающий объем в области перехода зоны седла клапана и камеры сгорания (рисунок 13).

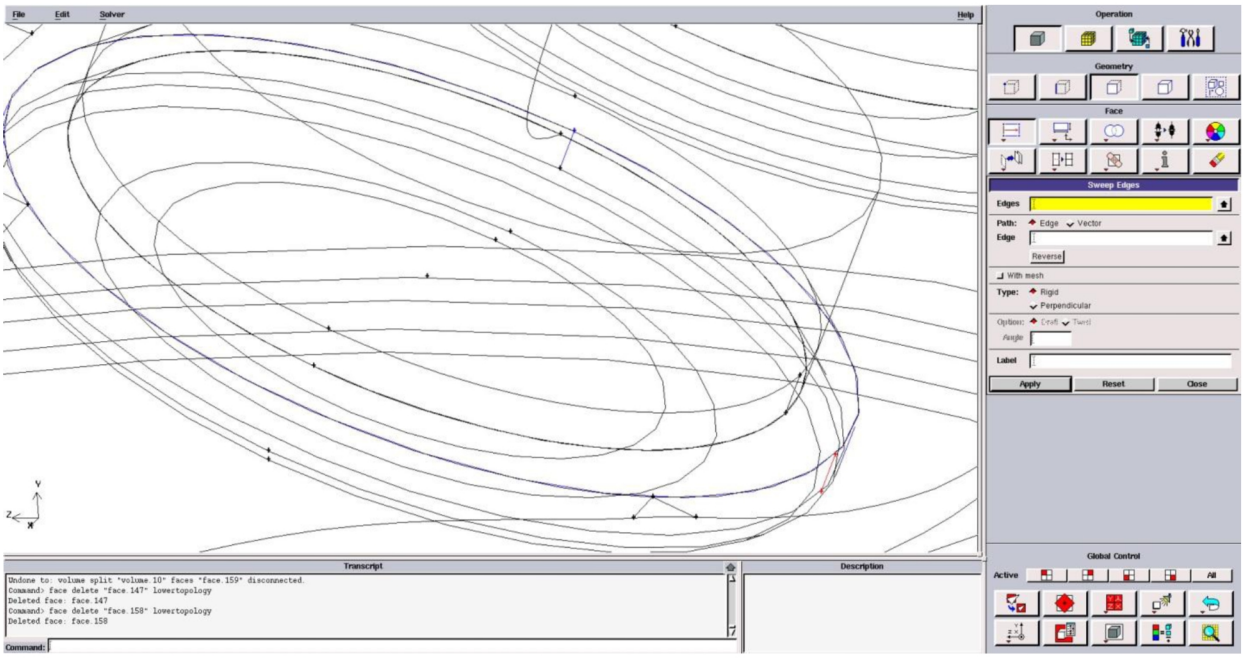


Рисунок 13 – Объем модели после рассечения второй поверхностью

После проведения аналогичных операций на втором клапане будут получены три новых объема – два кольцевых объема и объем выпускного канала (рисунок 14)

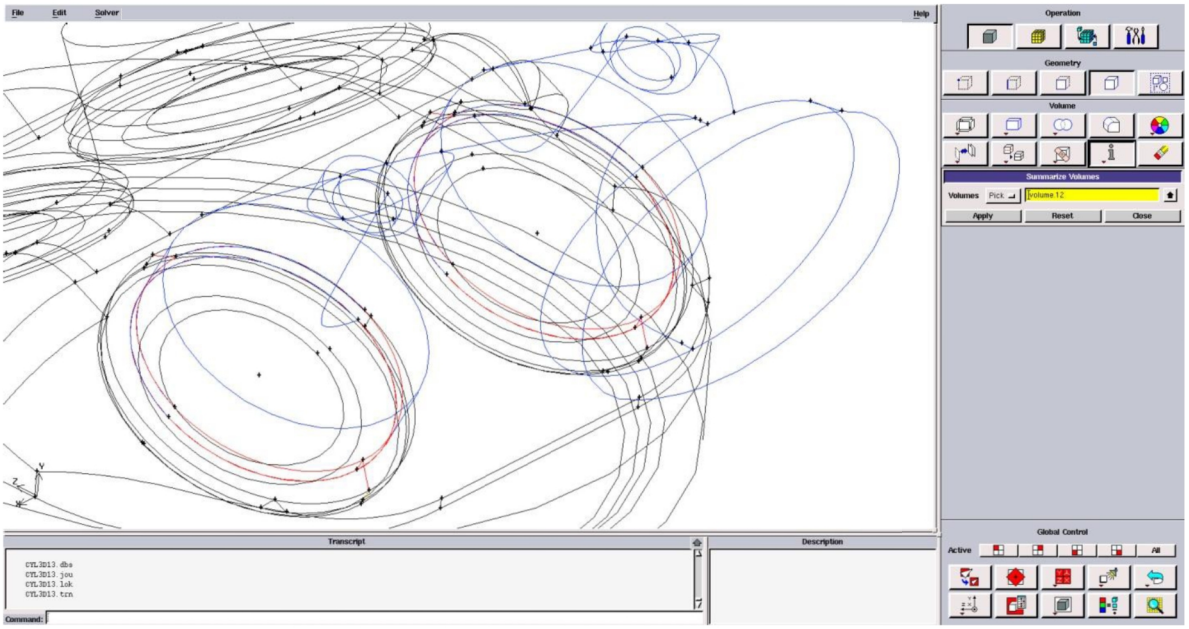


Рисунок 14 – Кольцевые объемы и объем выпускного канала в модели после рассечения её поверхностями

Аналогичным образом рассекается объем модели около впускных каналов (рисунок 15)

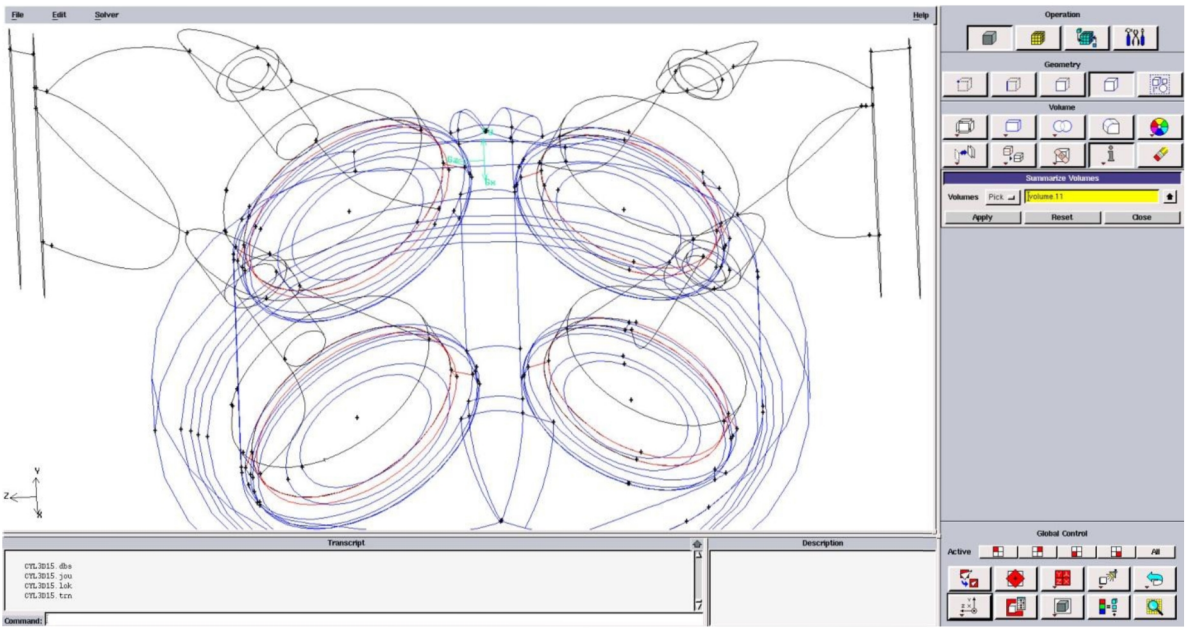


Рисунок 15 – Модель после рассечения её поверхностями вокруг клапанов

Следующим этапом выполняется построение цилиндрических объемов вокруг «пустот» клапанов. Для этого строятся вспомогательные поверхности в координатной плоскости XZ:

Geometry (Геометрия) → ***Face*** (Поверхность) → **Create face** (Создание поверхности)

В появившемся меню *Create Real Rectangular Face*, в полях *Width* и *Height* вводятся значения *100*, во вкладке *Direction* необходимо выбрать *ZX Centered*, для завершения операции построения поверхности нажимается кнопка *Apply*, в результате будет построена поверхность размером 100x100 *мм* (рисунок 16).

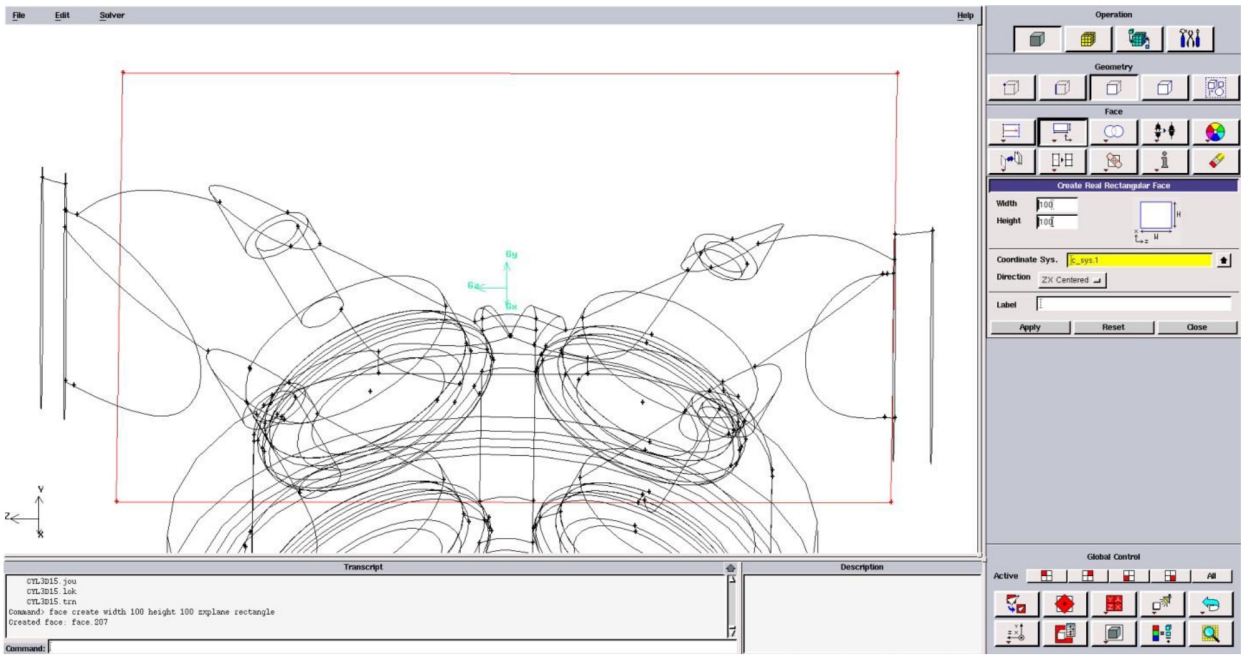


Рисунок 16 – Построение вспомогательной поверхности

Далее необходимо повернуть вспомогательную поверхность относительно оси X на угол, равный углу наклона клапана относительно оси Z:

Geometry (Геометрия) → ***Face*** (Поверхность) → **Move/Copy Faces** (Переместить/Скопировать поверхности)

В появившемся меню *Move/Copy Faces*, в поле *Faces* выбирается созданная вспомогательная поверхность, в меню *Operation* отмечается опция *Rotate*, в меню *Define* выбирается направление *Direction: X Positive*, в поле Angle вводится значение угла наклона плоскости, для завершения операции поворота поверхности нажимается кнопка *Apply*, в результате будет получена наклонная поверхность (рисунок 17).

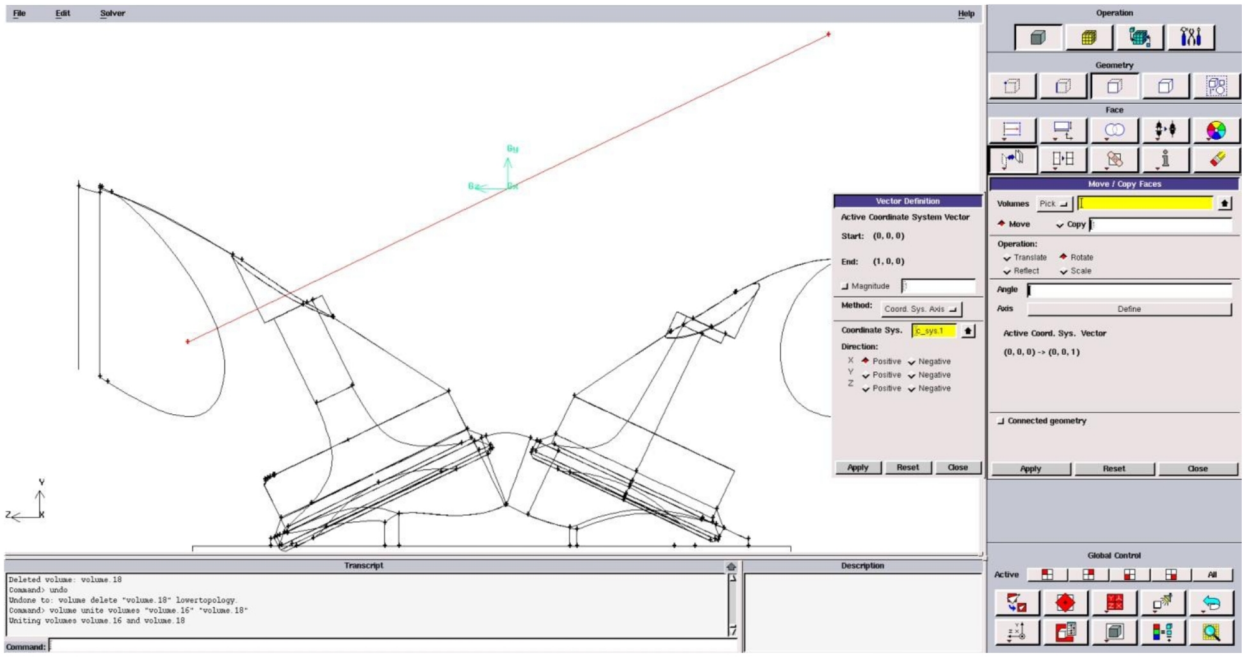


Рисунок 17 – Наклоненная вспомогательная поверхность

Предварительно перед перемещением поверхности в область клапана, необходимо создать копию поверхности:

Geometry (Геометрия) → ***Face*** (Поверхность) → **Move/Copy Faces** (Переместить/Скопировать поверхности)

В появившемся меню *Move/Copy Faces*, в поле *Faces* выбирается созданная вспомогательная поверхность и отмечается опция *Copy*, в полях меню *Global* вводятся координаты (0;0;0), для завершения операции перемещения поверхности нажимается кнопка *Apply*, в результате будет создан дубликат поверхности.

Предварительно перед перемещением поверхности в область клапана, создается точка, расположенная чуть выше существующей точки центра дна клапана. Для создания точки выполняются следующие действия:

Geometry (Геометрия) → ***Vertex*** (Точка) → **Create Real Vertex** (Создание реальной точки)

В полях меню *Global* необходимо ввести координаты точки, после чего для завершения операции нажать кнопку *Apply* (рисунок 19).

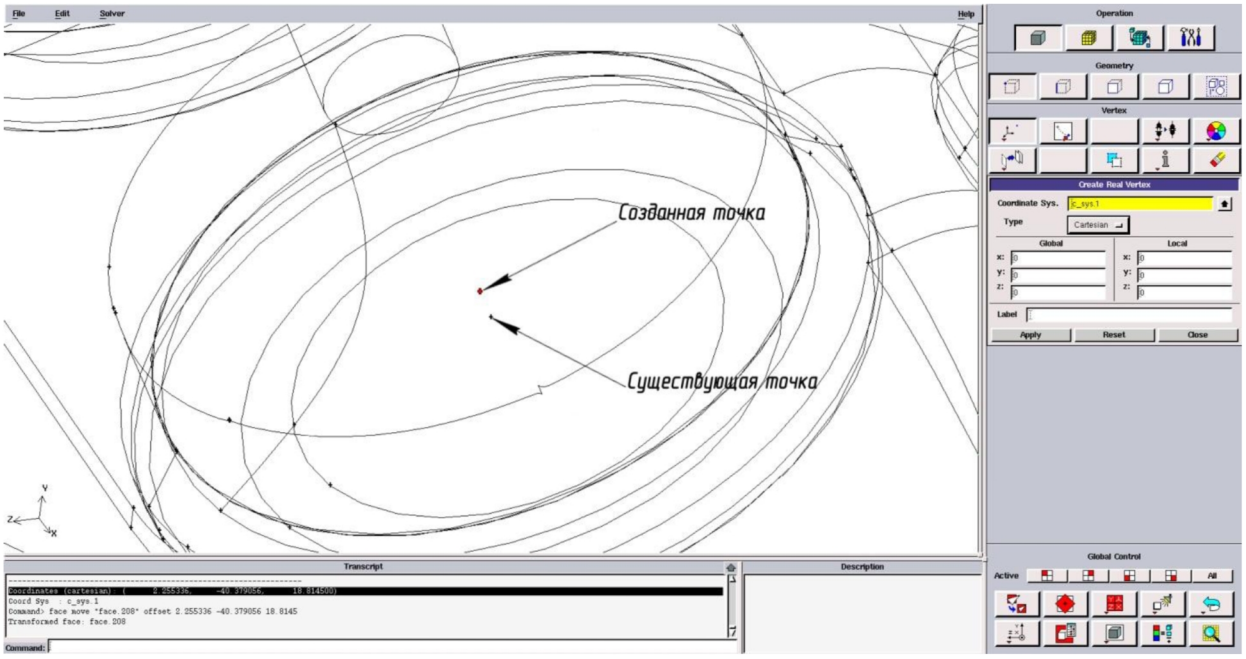


Рисунок 19 – Созданная вспомогательная точка

Вспомогательную поверхность относительно её центра необходимо переместить в созданную точку, находящуюся выше существующей точки центра дна клапана:

Geometry (Геометрия) → ***Face*** (Поверхность) → **Move/Copy Faces** (Переместить/Скопировать поверхности)

В появившемся меню *Move/Copy Faces*, в поле *Faces* необходимо выбрать вспомогательную поверхность, в меню *Operation* отметить опцию *Translate*, в полях меню *Global* ввести координаты созданной точки. Для

завершения операции перемещения поверхности нажимается кнопка *Apply*, в результате поверхность перемещается в созданную точку (рисунок 20).

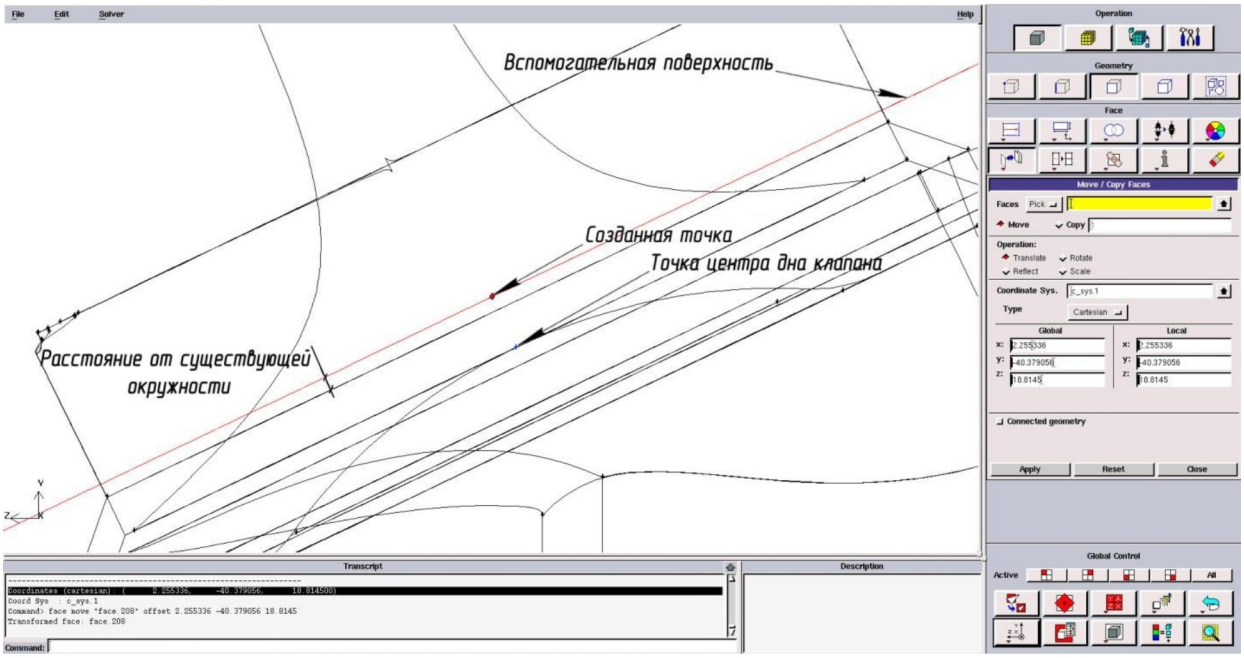


Рисунок 20 – Перемещенная вспомогательная поверхность

Перед перемещением копии вспомогательной поверхности в область клапана, необходимо выполнить рассечение наружной поверхности на кольцевом объеме. Для этого создается вспомогательная поверхность в плоскости YZ:

Geometry (Геометрия) → ***Face*** (Поверхность) → **Create face** (Создание поверхности)

В появившемся меню *Create Real Rectangular Face*, в полях *Width* и *Height* вводятся значения 100, во вкладке *Direction* выбирается *YZ Centered*, для завершения операции построения поверхности необходимо нажать кнопку *Apply*, в результате будет построена поверхность (рисунок 21) размером 100х100 *мм*.

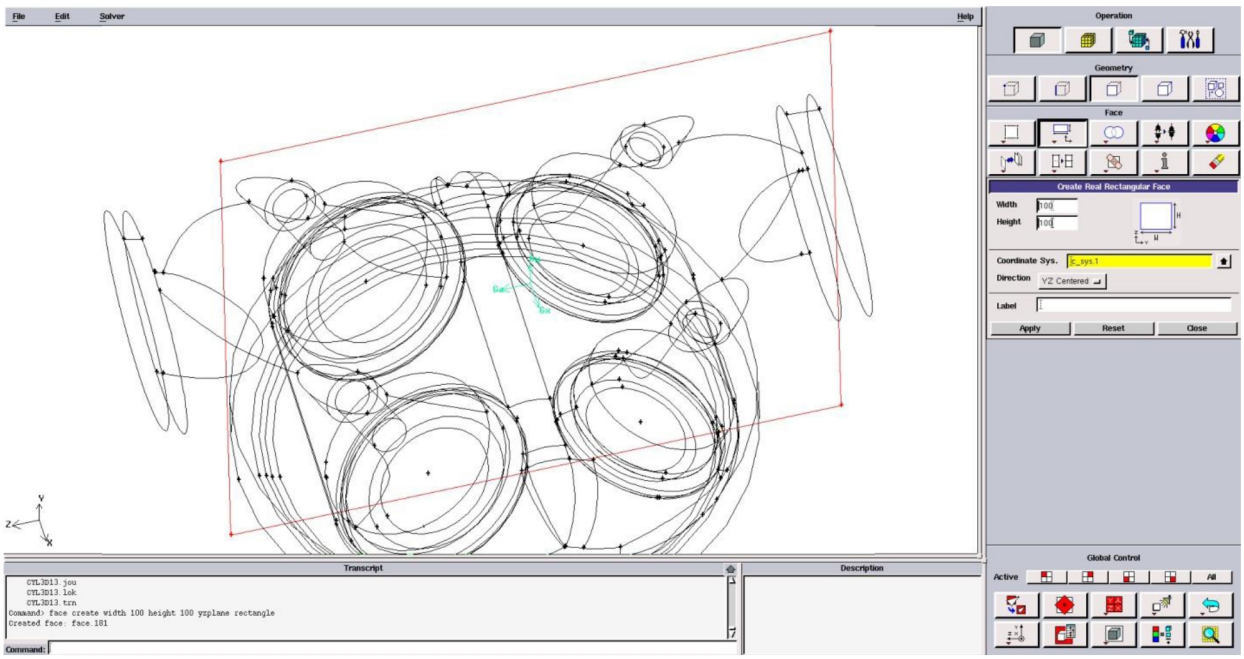


Рисунок 21 – Построение вспомогательной поверхности в плоскости YZ

Вспомогательную поверхность относительно её центра необходимо переместить в точку центра дна клапана:

Geometry (Геометрия)  → ***Face*** (Поверхность)  → **Move/Copy Faces** (Переместить/Скопировать поверхности) 

В появившемся меню *Move/Copy Faces*, в поле *Faces* необходимо выбрать вспомогательную поверхность, в меню *Operation* отметить опцию *Translate*, в полях меню *Global* ввести координаты точки центра дна клапана, для завершения операции перемещения поверхности необходимо нажать кнопку *Apply*, в результате поверхность будет перемещена в созданную точку, результат этой операции представлен на рисунке 22.

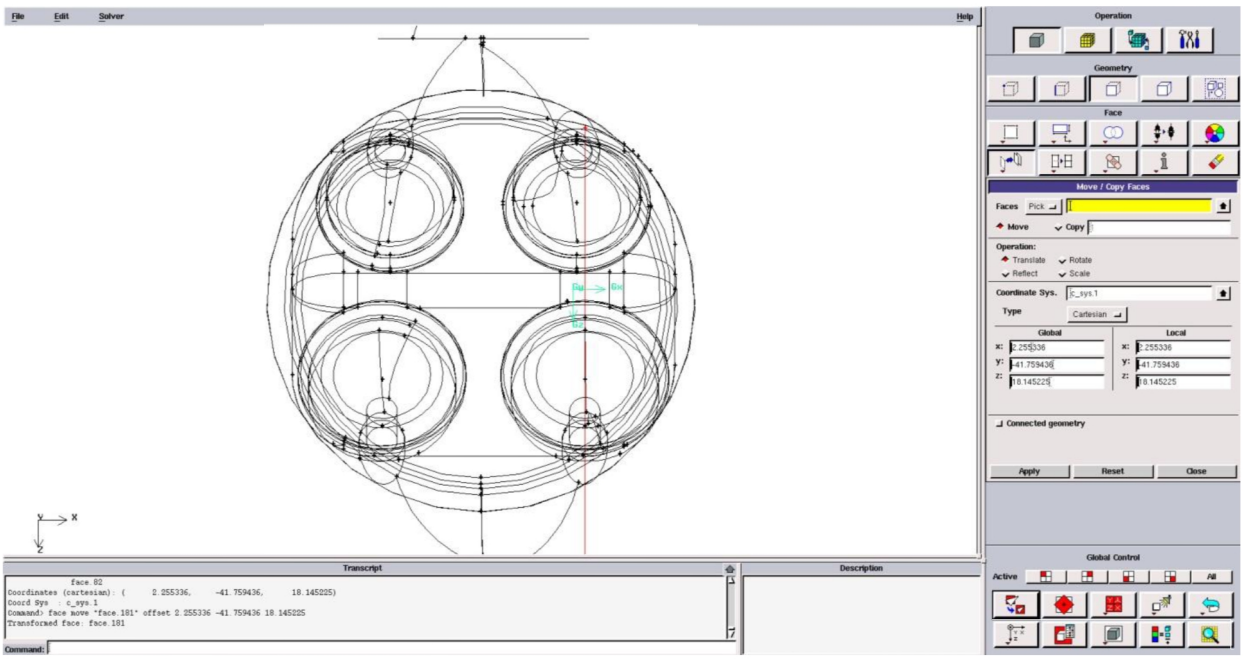


Рисунок 22 – Перемещение вспомогательной поверхности в плоскости YZ в точку центра дна клапана

Перемещенной поверхностью необходимо рассечь наружную поверхность кольцевого объема:

Geometry (Геометрия)  → ***Face*** (Поверхность)  → ***Split Face*** (Разделение поверхности) 

В появившемся меню *Split Face* выбирается опция *Split With Faces*, в поле *Face* выбирается поверхность на кольцевом объеме, в поле *Faces* вспомогательная поверхность (рисунок 23). Для правильного выполнения операции необходимо включить опцию *Connected*. Для завершения операции нажимается кнопка *Apply*. В результате поверхность рассечется на две соединённые поверхности, в местах соединений появятся отрезки и точки (рисунок 24).

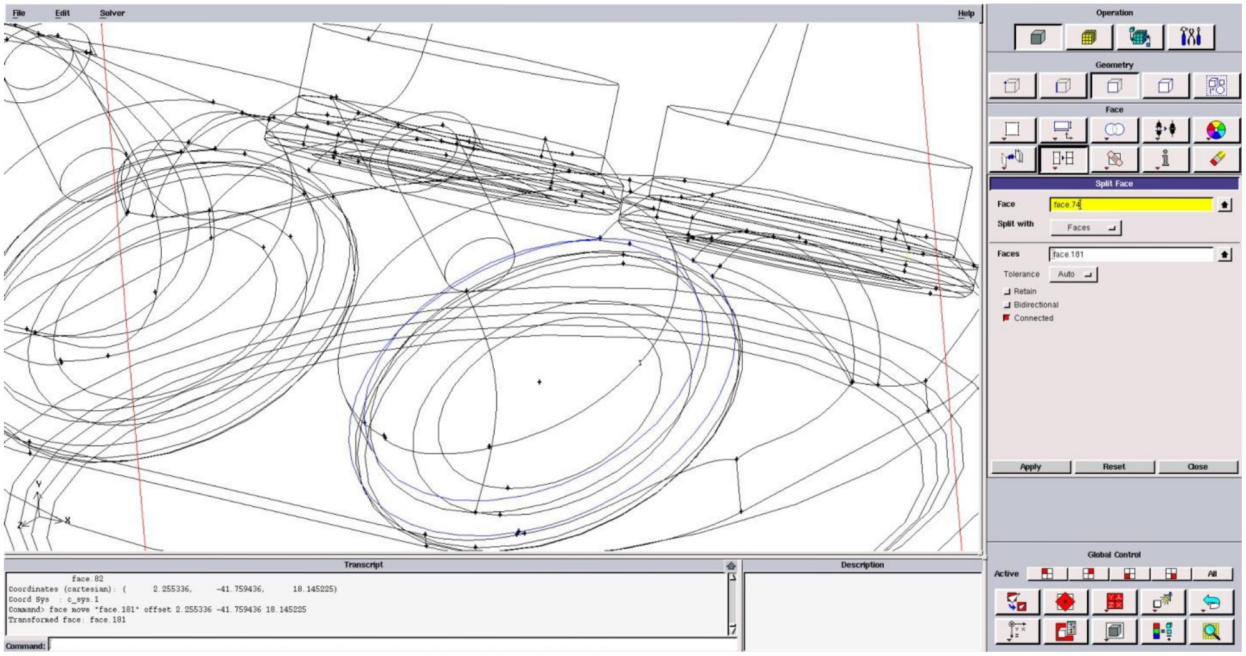


Рисунок 23 – Рассечение поверхности на кольцевом объеме

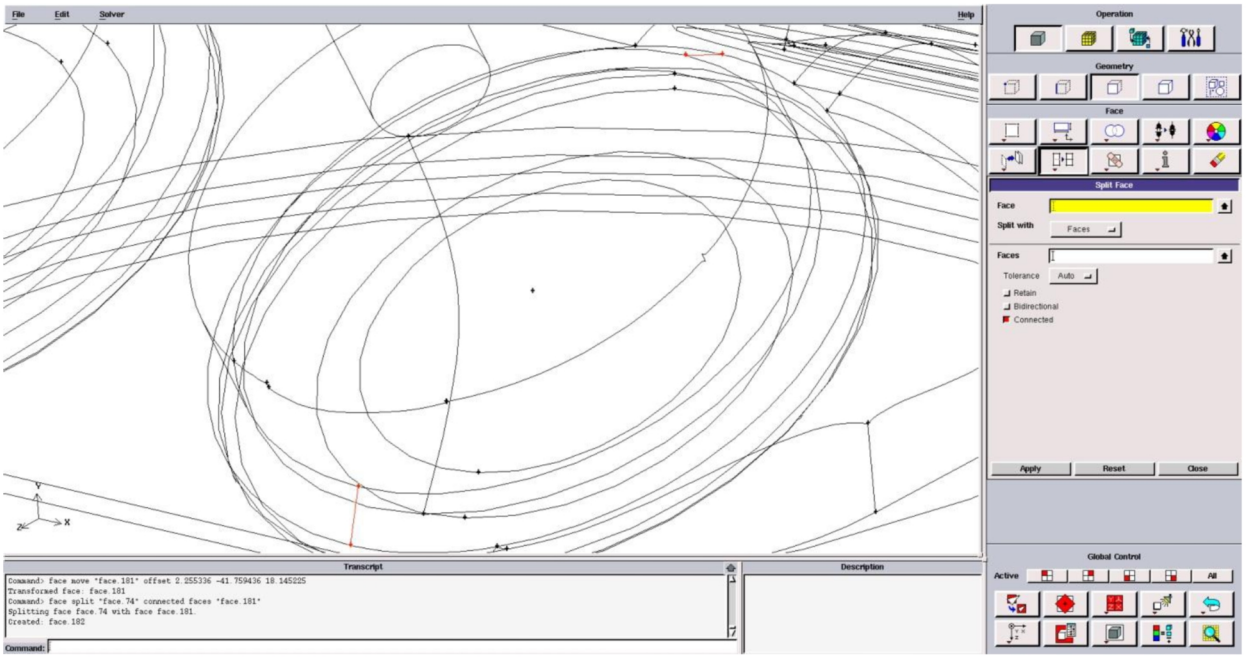


Рисунок 24 – Рассеченная поверхность на кольцевом объеме

Копию наклоненной вспомогательной поверхности относительно её центра необходимо переместить в точку, принадлежащую одному из отрезков на поверхности кольцевого объема:

Geometry (Геометрия) → ***Face*** (Поверхность) → **Move/Copy Faces** (Переместить/Скопировать поверхности)

В появившемся меню *Move/Copy Faces*, в поле *Faces* выбирается вспомогательная поверхность, в меню *Operation* отмечается опция *Translate*, в полях меню *Global* вводятся координаты точки принадлежащей отрезку, для завершения операции перемещения поверхности нажимается кнопка *Apply*, в результате поверхность будет перемещена в указанную точку (рисунок 25).

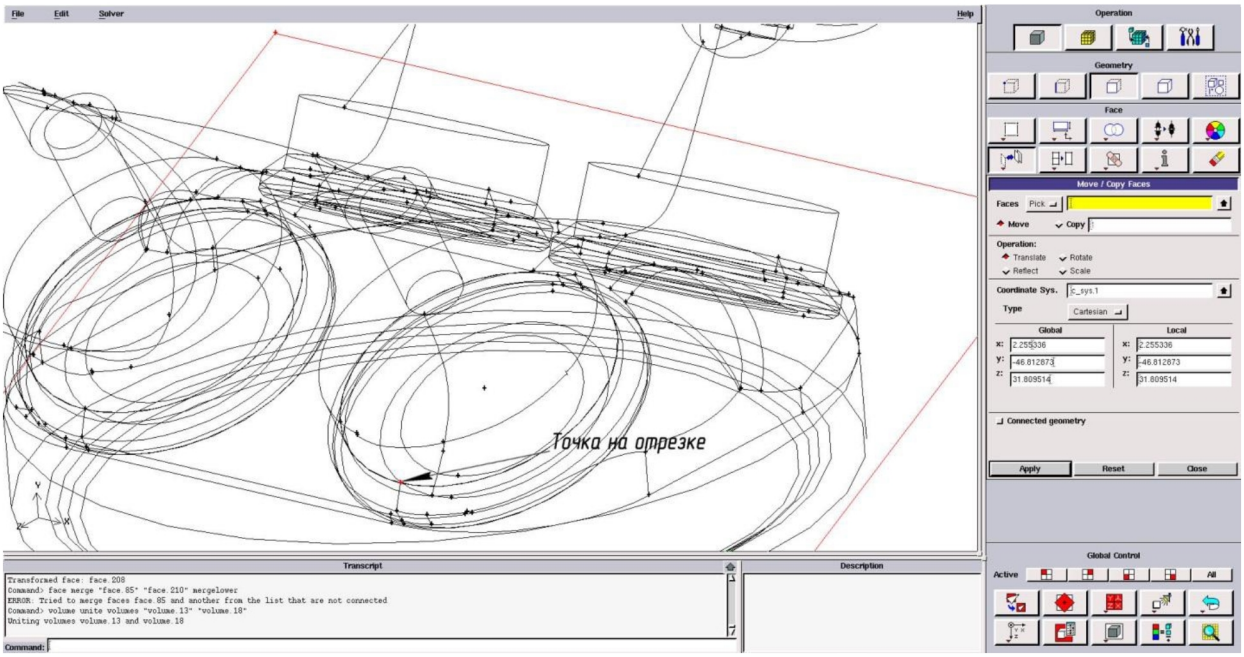


Рисунок 25 – Перемещенная копия вспомогательной поверхности в точку на кольцевом объеме

Перемещенной поверхностью будет рассечена поверхность образующая «пустоту» клапана во впускном канале:

Geometry (Геометрия) → ***Face*** (Поверхность) → ***Split Face*** (Разделение поверхности)

В появившемся меню *Split Face* выбирается опция *Split With Faces*, в поле *Face* выбирается поверхность образующая «пустоту» клапана, в поле *Faces* вспомогательная поверхность (рисунок 26). Для правильного

выполнения операции необходимо включить опцию *Connected*. Для завершения операции нажимается кнопка *Apply*. В результате поверхность рассечется на две, а в месте соединения появятся необходимая окружность с точками (рисунок 27).

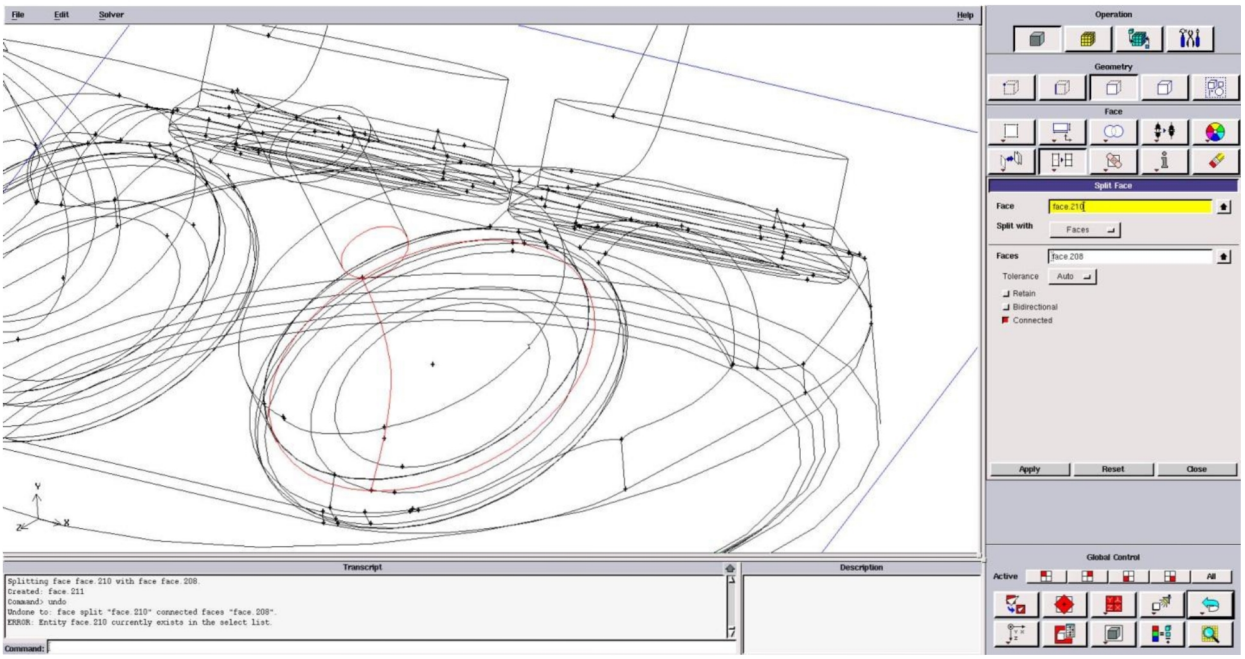


Рисунок 26 – Рассечение поверхности образующей «пустоту» клапана

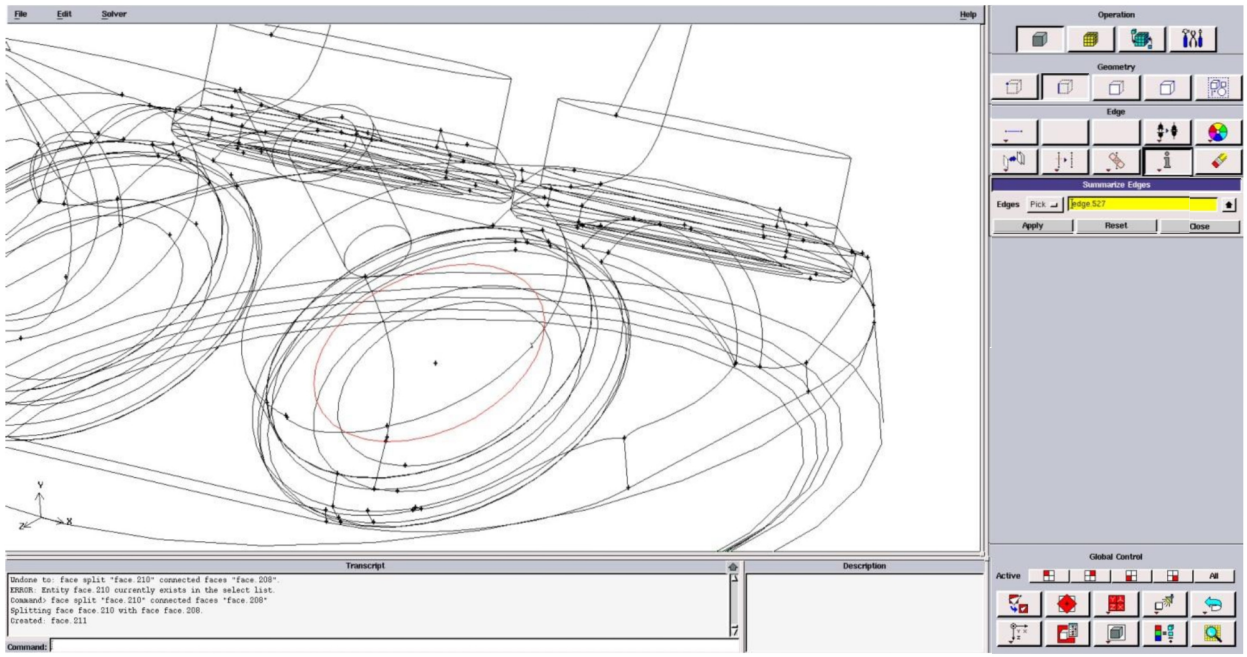


Рисунок 27 – Окружность образованная после рассечения поверхности образующей «пустоту» клапана

Окружность, полученная операцией рассечения, будет необходима для построения цилиндра, с помощью которого будет вырезан отдельный цилиндрический объем из впускного канала. Для этого сначала необходимо построить точку находящуюся на уровне существующей окружности в области направляющей втулки клапана, с такими координатами, чтобы будущий отрезок имел тот же наклон что и ось клапана и кольцевой объем:

Geometry (Геометрия)  → ***Vertex*** (Точка)  → **Create Real Vertex** (Создание реальной точки) 

В полях меню *Global* вводятся координаты точки, после чего для завершения операции необходимо нажать кнопку *Apply* (рисунок 28).

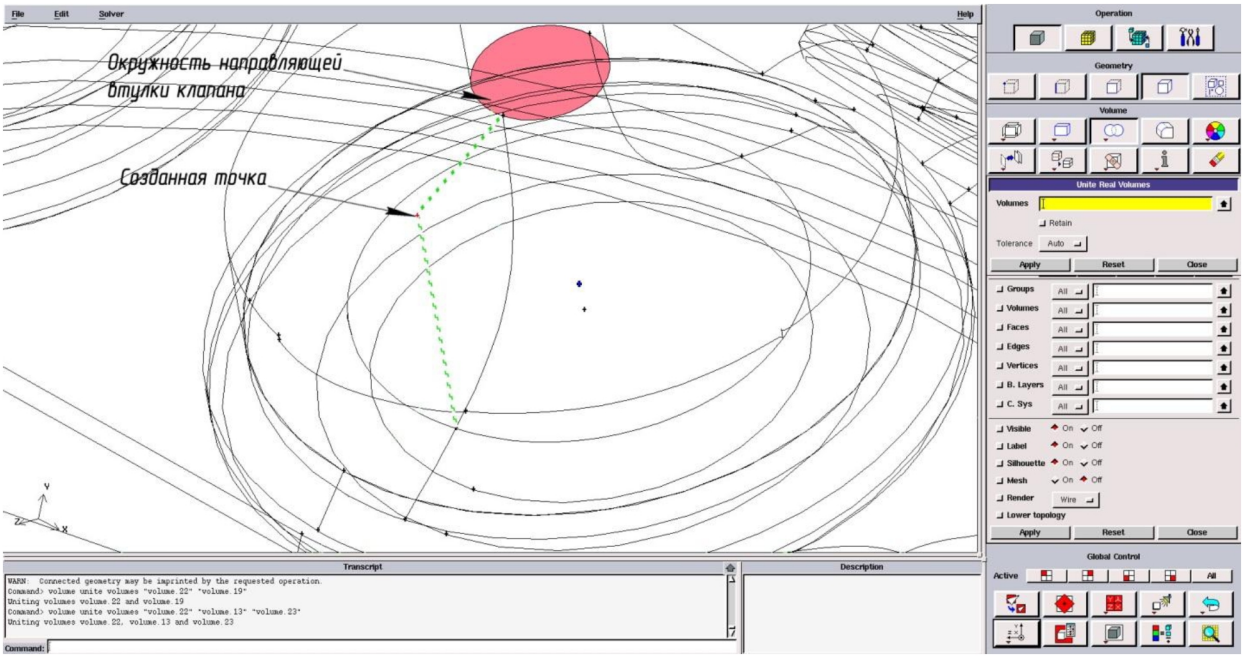


Рисунок 28 – Созданная точка

Построение отрезка выполняется с помощью следующих действий:

Geometry (Геометрия)  → ***Edge*** (Отрезок)  → **Create Straight Edge** (Создание прямого отрезка) 

В появившемся меню *Create Straight Edge* выбирается опция *Vertex List (Multiple)*, в которой показаны доступные (*Available*) для выбора точки и выбранные (*Picked*). С помощью мыши необходимо выбрать созданную точку и существующую точку на окружности, после чего для завершения операции нажимается кнопка *Apply* (рисунок 29).

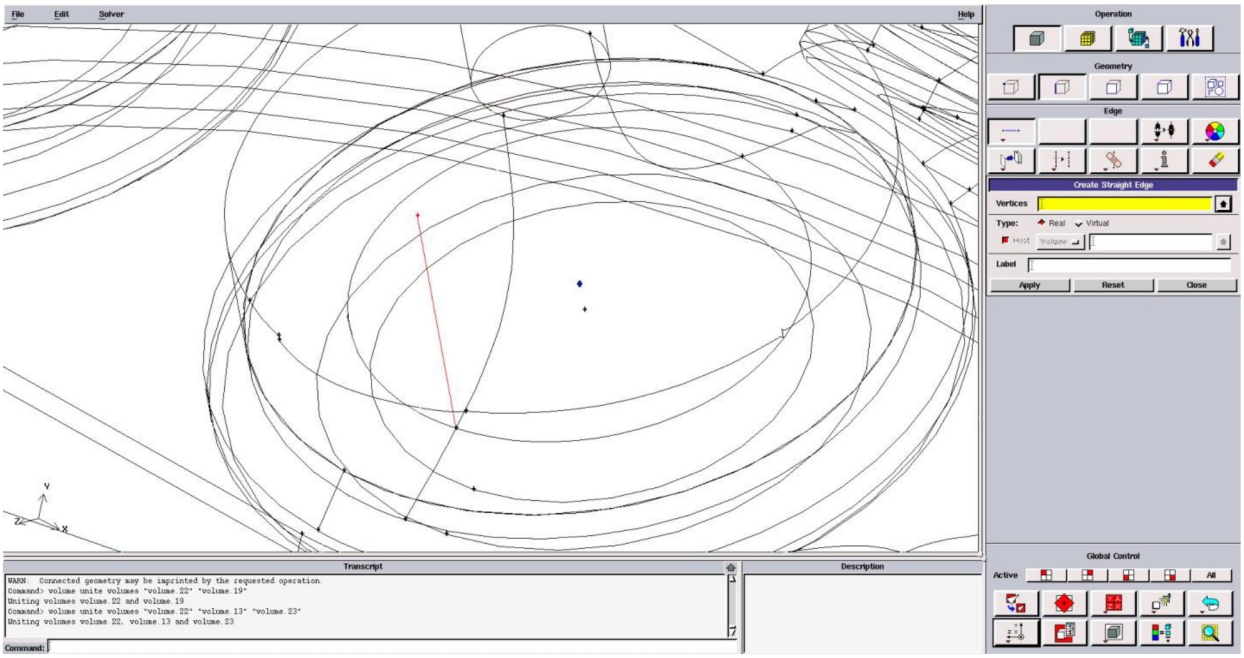


Рисунок 29 – Построенный отрезок

Построенный отрезок будет выполнять роль вектора направления в развертке поверхности цилиндра созданного из окружности. Создание поверхности круга из окружности выполняется следующим образом:

Geometry (Геометрия) → ***Face*** (Поверхность) → **Form face** (Формирование поверхности)

В появившемся меню *Create Face from Wireframe* выбирается опция *Edge List (Multiple)*, в которой показаны доступные (*Available*) для выбора отрезки и выбранные (*Picked*). С помощью мыши выбирается окружность из точки которой был построен отрезок описанный выше. Для завершения операции построения поверхности нажимается кнопка *Apply*, в результате чего будет построена круговая поверхность.

Создание объема цилиндра выполняется разверткой поверхности по направлению отрезка:

Geometry (Геометрия) → ***Volume*** (Объем) → ***Sweep Faces*** (Развертка поверхностей)

В появившемся меню *Sweep Faces* в поле *Faces* выбирается круговая поверхность, в поле *Path: Edge* – отрезок, на котором появится стрелка указывающая направление развертки, в данном случае направление должно быть указано вверх (рисунок 30). Для завершения операции нажимается кнопка *Apply* (рисунок 31).

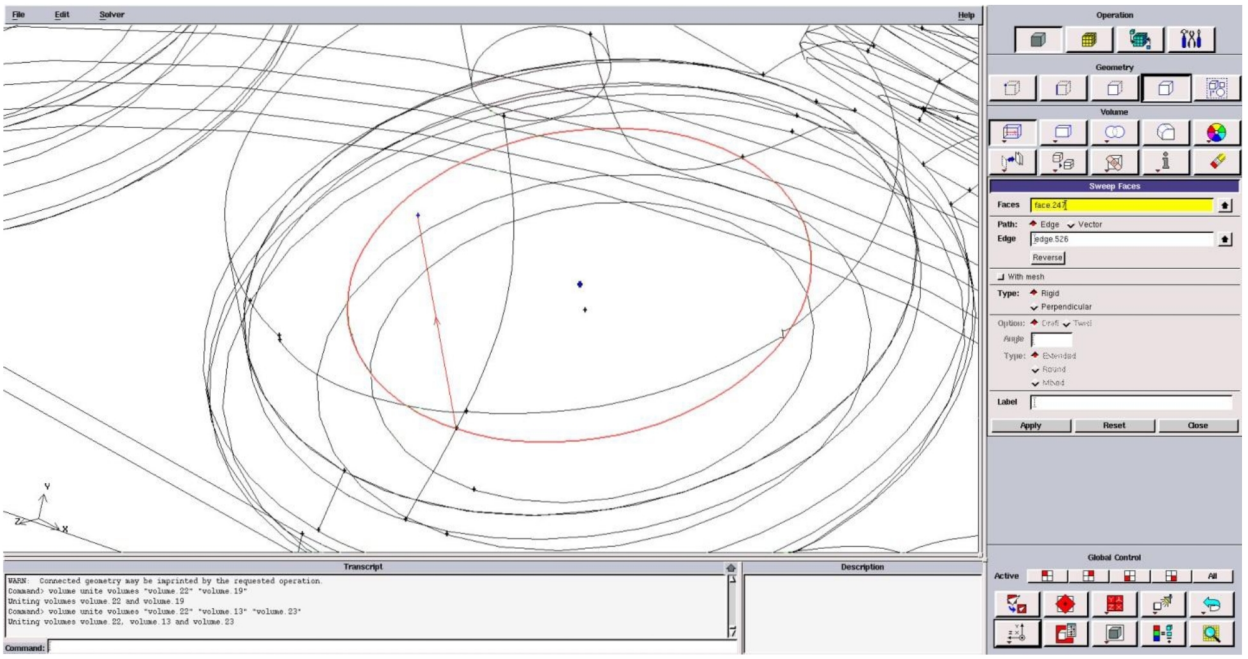


Рисунок 30 – Выбор отрезка и окружности для создания объема с помощью развёртки

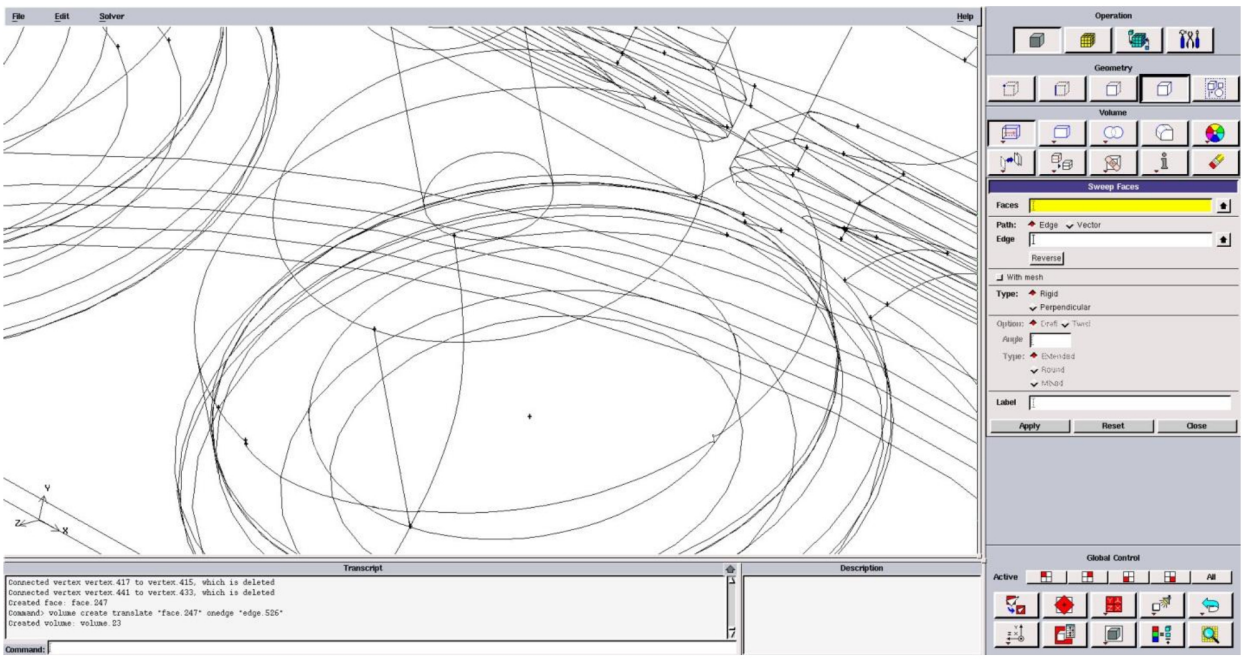


Рисунок 31 – Построенный цилиндр

После построения цилиндра, необходимо выполнить рассечение объема впускного канала:

Geometry (Геометрия) → ***Volume*** (Объем) → ***Split Volume*** (Разделение объема)

В появившемся меню *Split Volume* выбрать опцию *Split With Volumes (Real)*, в которой показаны доступные (*Available*) для выбора объемы и выбранные (*Picked*). С помощью мыши выбираются созданный цилиндр и объем впускного канала (рисунок 32). Для правильного выполнения операции отключены опции *Retain*, *Bidirectional* и *Connected*. Для завершения операции нажимается кнопка *Apply* (рисунок 33).

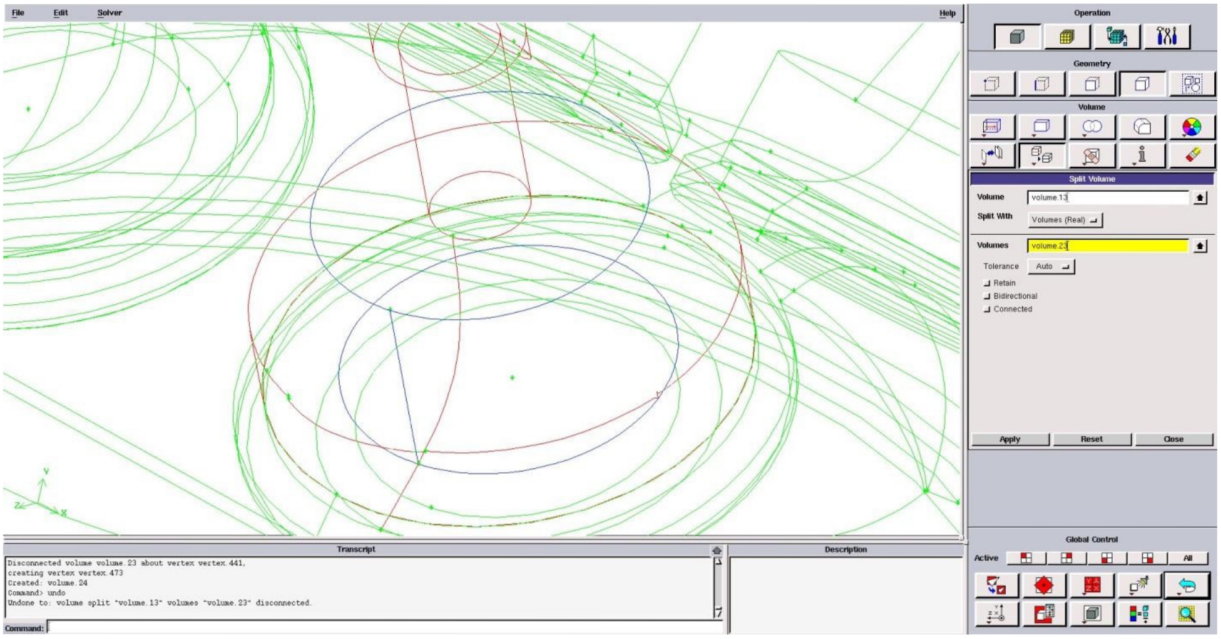


Рисунок 32 – Выбор объемов для операции рассечения

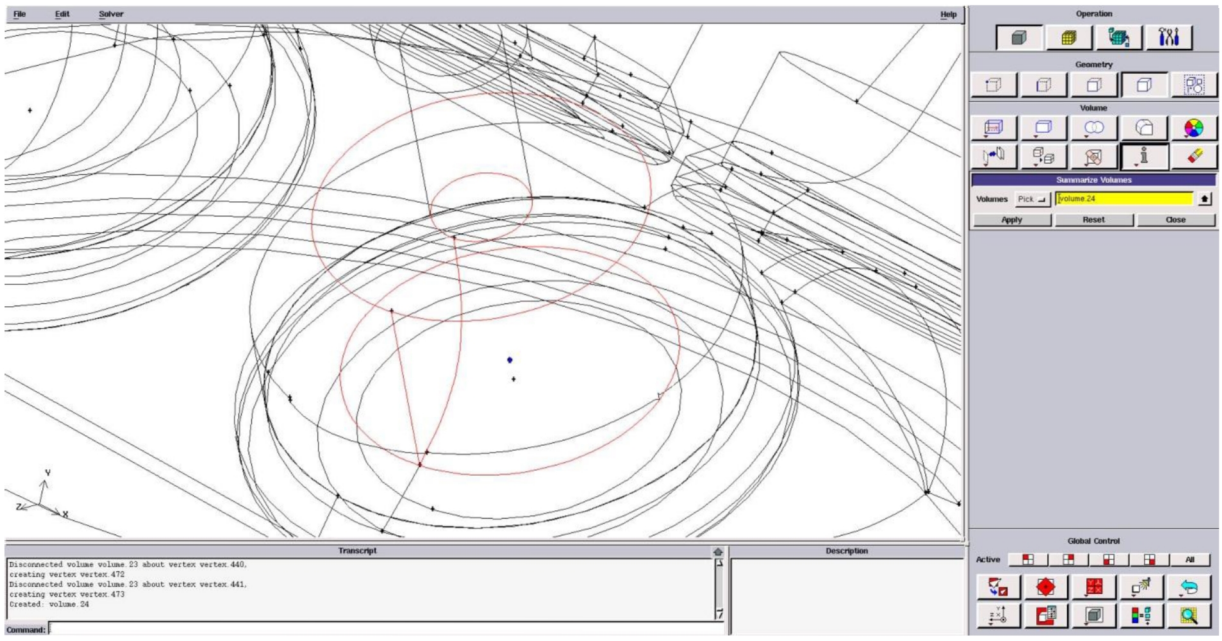


Рисунок 33 – Цилиндрический объем после операции рассечения

Далее вспомогательной поверхностью согласно рисунку 20 необходимо выполнить рассечение объема впускного канала следующими действиями:

Geometry (Геометрия)  → ***Volume*** (Объем)  → ***Split Volume*** (Разделение объема) 

В появившемся меню *Split Volume* в поле Volume выделяется объем впускного канала, далее выбирается опция *Split With Faces (Real)*, в которой показаны доступные (*Available*) для выбора поверхности и выбранные (*Picked*). С помощью мыши выбирается вспомогательная наклоненная поверхность, построенная ранее. Для правильного выполнения операции необходимо отключить опции *Bidirectional* и *Connected*. Для завершения операции нажимается кнопка *Apply* (рисунок 34).

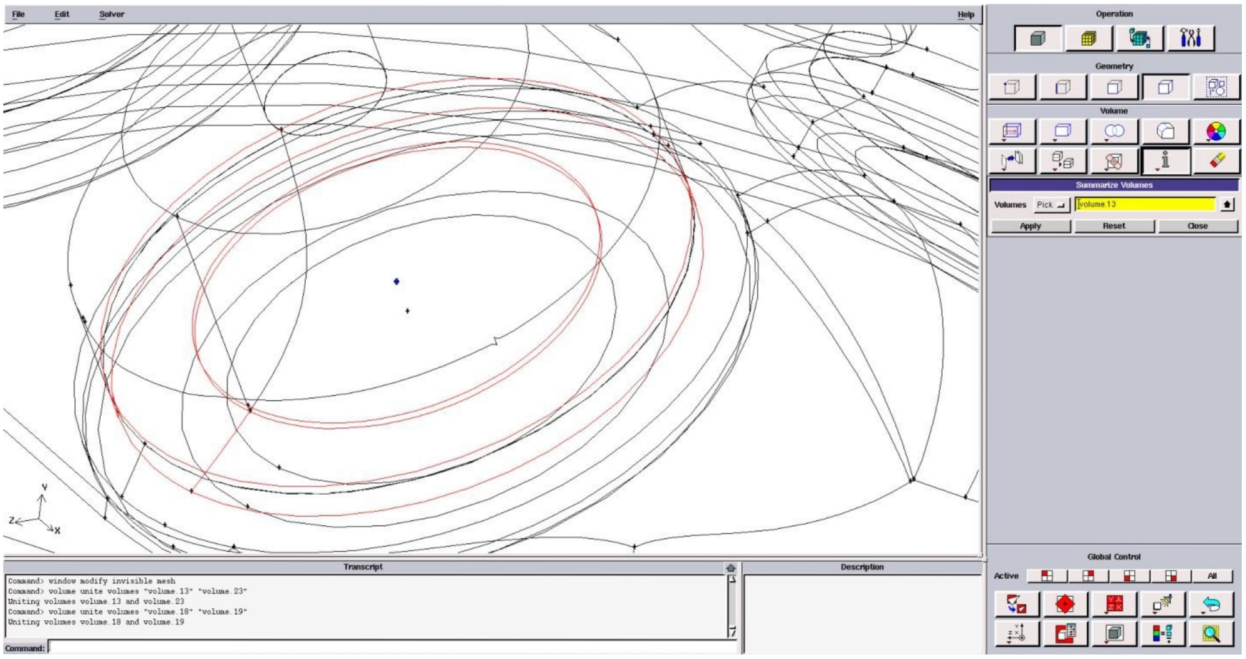


Рисунок 34 – Кольцевой объем после операции рассечения

Аналогичным образом необходимо объемы на остальных клапанах, результат построения показан на рисунке 35

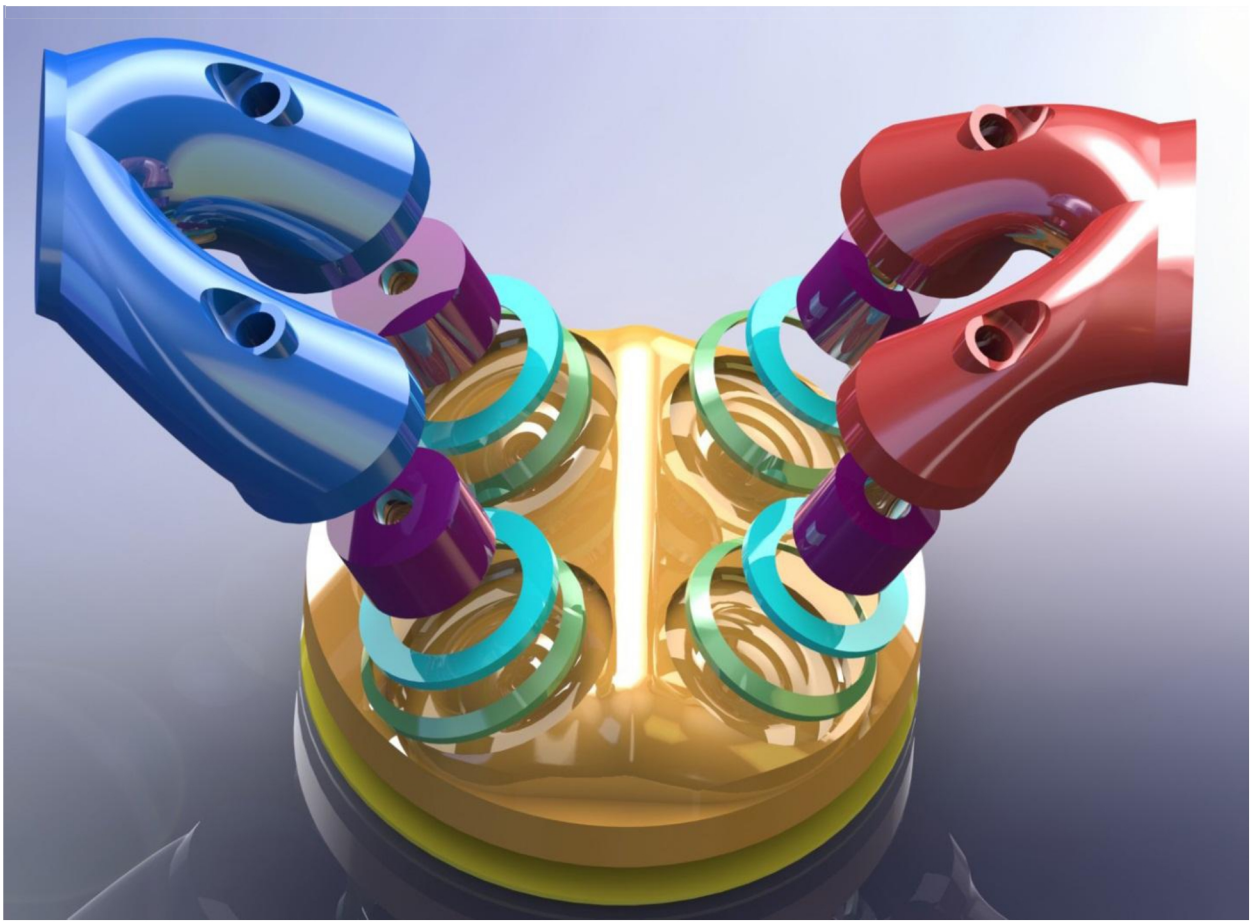


Рисунок 35 – Объемы в модели полученные операциями рассечения

Каждый из составляющих модель объемов должен быть рассечен вдоль с помощью вспомогательных плоскостей (по плоскости на каждый объем), центр которых проходит через существующие точки центра дна клапанов. Построение плоскостей, перемещение центра плоскостей в необходимые точки, выполняются аналогично шагу соответствующему рассечению поверхности на кольцевом объеме, с одним отличием - вместо операции *Split Face* необходимо применить операцию *Split Volume*, в меню которой выбирается опция *Split With Faces (Real)*, в поле *Volume* выбираются (операция рассечения применяется поочередно для каждого объема) объемы - кольцевой с профилем параллелограмма, кольцевой с профилем трапеции, цилиндрический с внутренней поверхностью образующей «пустоту» клапана; в поле Faces вспомогательная поверхность в координатной плоскости YZ. Для правильного выполнения операции необходимо

отключить опции *Retain*, *Bidirectional* и включить опцию *Connected*. Завершение операции выполняется нажатием кнопки *Apply* (рисунок 12). В результате каждый из объемов будет поделен на два, а в месте соединений будут получены поверхности. Результат построений представлен на рисунке 36.

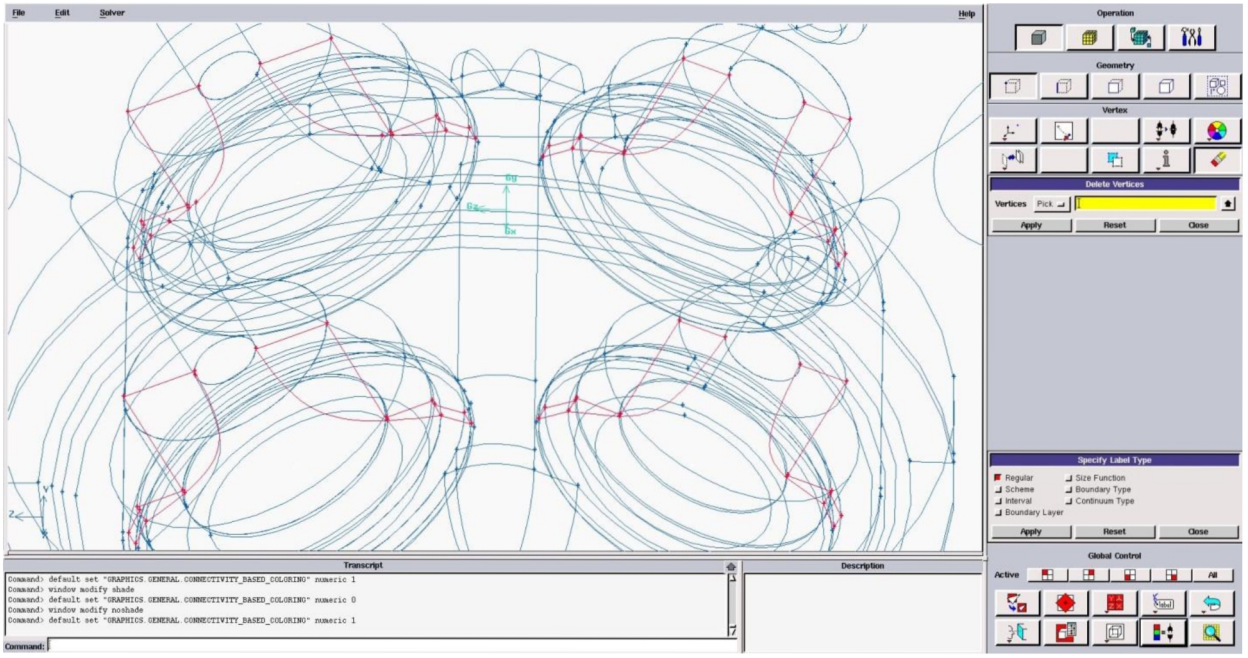


Рисунок 36 – Объемы в модели после рассечения поверхностями в плоскости YZ

1.3. Построение сетки

Разбиение поверхностей конечно-элементной сеткой осуществляется с помощью команды *Mesh faces*:

Mesh (Сетка)  → ***Face*** (Поверхность)  → ***Mesh faces*** (Разбить поверхности) 

В появившемся меню с помощью мыши выбираются симметричные поверхности в цилиндрическом объеме. Так же выбирается четырехугольный элемент *Quad* во вкладке *Elements*, тип разбиения *(Type) Pave*. Далее в поле *Spacing* вводится размер конечного элемента равный 0,5 *мм*. Для построения

сетки нажимается кнопка *Apply*, в результате на выделенных поверхностях появится сетка (рисунок 37).

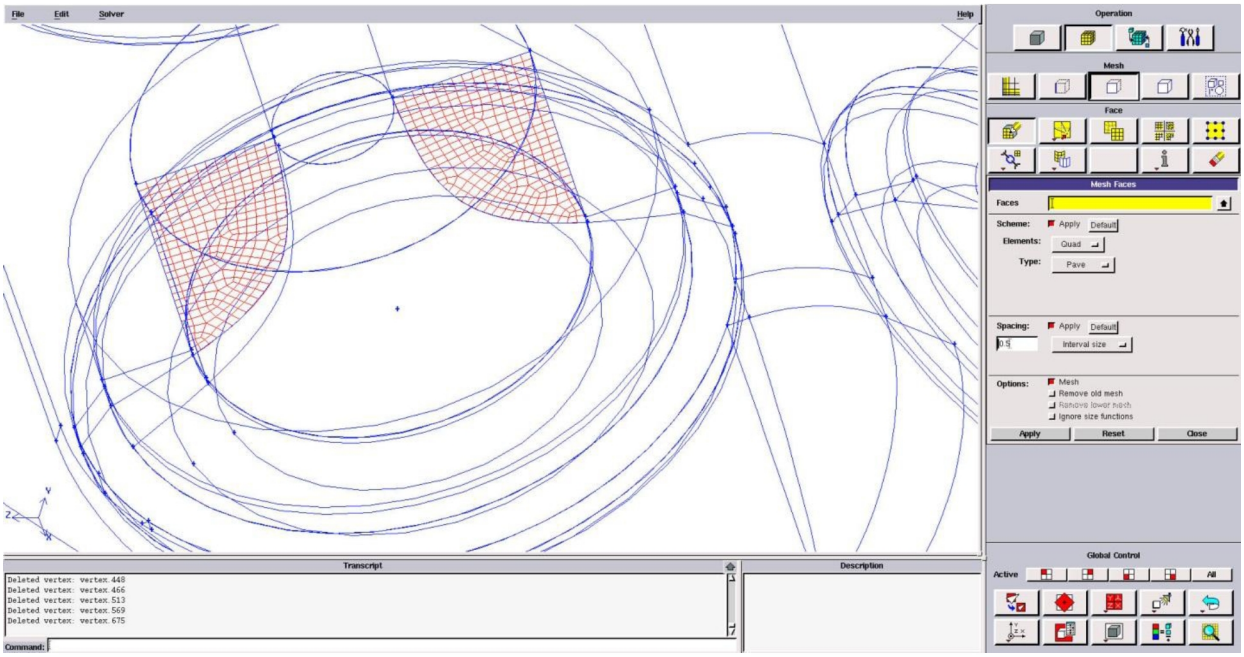


Рисунок 37 – Результат построения сетки на поверхностях цилиндрического объема

Этой же командой разбиваются поверхности в кольцевом объеме с профилем трапеции и объеме с профилем параллелограмма. Тип разбиения *(Type)* выбирается *Map*, в поле *Spacing* вводится размер конечного элемента равный 0,3 *мм*.

Результаты построения сетки из четырехугольных элементов на поверхностях объемов представлены на рисунке 38.

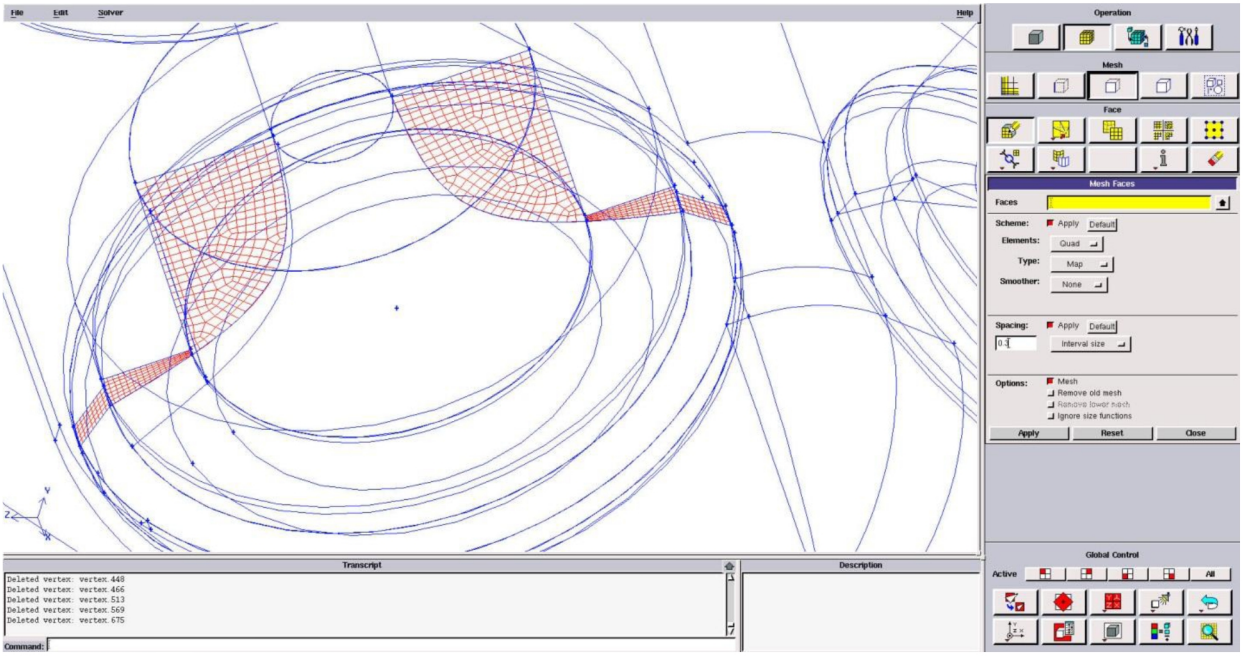


Рисунок 38 – Результат построения сетки на поверхностях кольцевого объема с профилем трапеции и объема с профилем параллелограмма

Далее выполняется разбиение сеткой объемов с помощью следующей команды:

Mesh (Сетка) → ***Volume*** (Объем) → ***Mesh Volumes*** (Разбить объем)

В появившемся меню *Mesh Volumes* в поле *Volumes* с помощью мыши выбираются объемы, составляющие цилиндрический объем. Назначается гексагональный элемент *Hex/Wedge* во вкладке *Elements*, тип разбиения *(Type) Cooper*. В поле *Spacing* введен размер конечного элемента 1 *мм*. Для выполнения операции нажимается кнопка *Apply*, в результате цилиндрический объем будет разбит сеткой (рисунок 39).

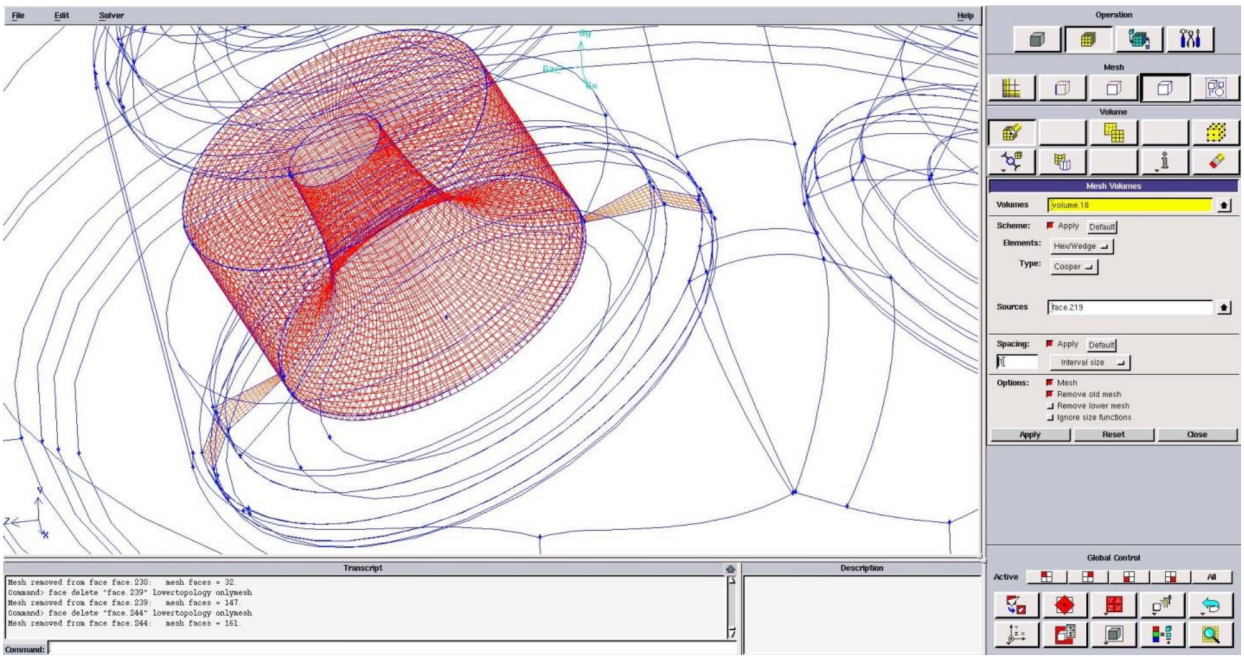


Рисунок 39 – Результат разбиения сеткой цилиндрического объема

Далее той же командой производится разбиение сеткой кольцевого объема с профилем трапеции и объема с профилем параллелограмма. Результаты построения сетки из гексагональных элементов в этих объемах представлены на рисунке 40.

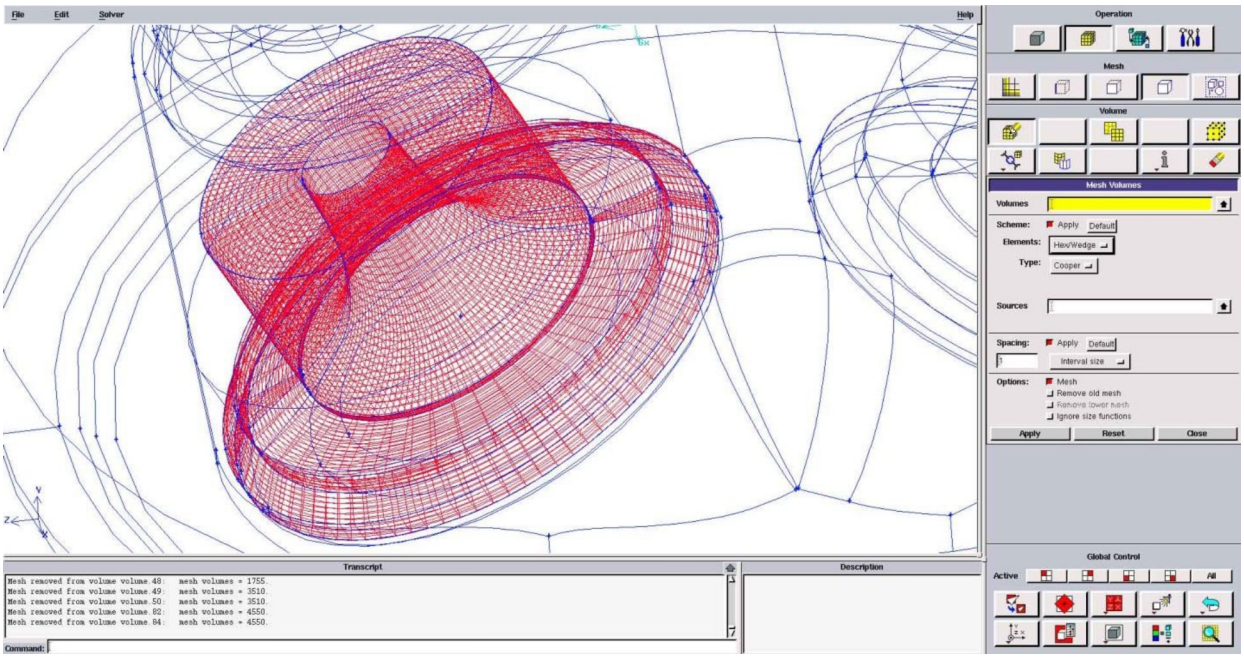


Рисунок 40 – Результат разбиения сеткой кольцевого объема с профилем трапеции и объема с профилем параллелограмма

Аналогичным образом разбиваются объемы вокруг остальных клапанов, результат построения сетки из гексагональных элементов в этих объемах представлен на рисунке 41.

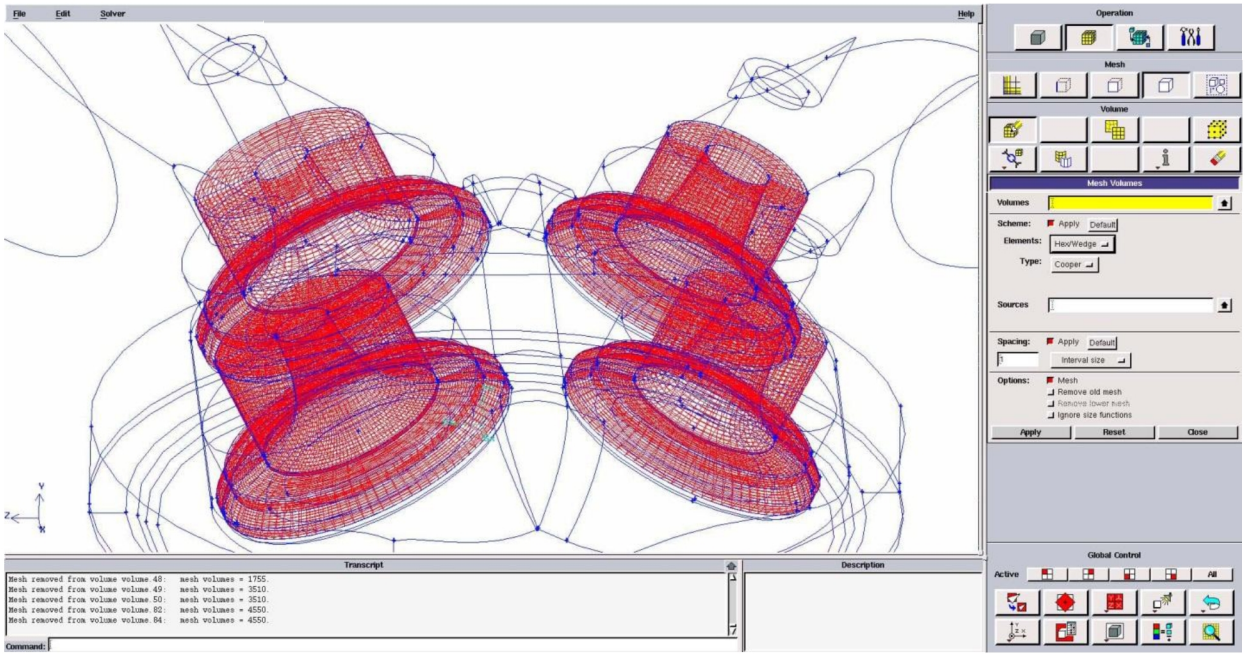


Рисунок 41 – Результат разбиения сеткой цилиндрических и кольцевых объемов

Далее выполняется разбиение сеткой поверхности поршня с помощью команды *Mesh faces*:

Mesh (Сетка)  → ***Face*** (Поверхность)  → ***Mesh faces*** (Разбить поверхности) 

В появившемся меню с помощью мыши выбираются поверхности поршня. Выбирается четырехугольный элемент *Quad* во вкладке *Elements*, тип разбиения *(Type) Pave*. Далее в поле *Spacing* вводится размер конечного элемента равный 1 *мм*. Для построения сетки нажимается кнопка *Apply*, в результате на выбранных поверхностях появится сетка (рисунок 42).

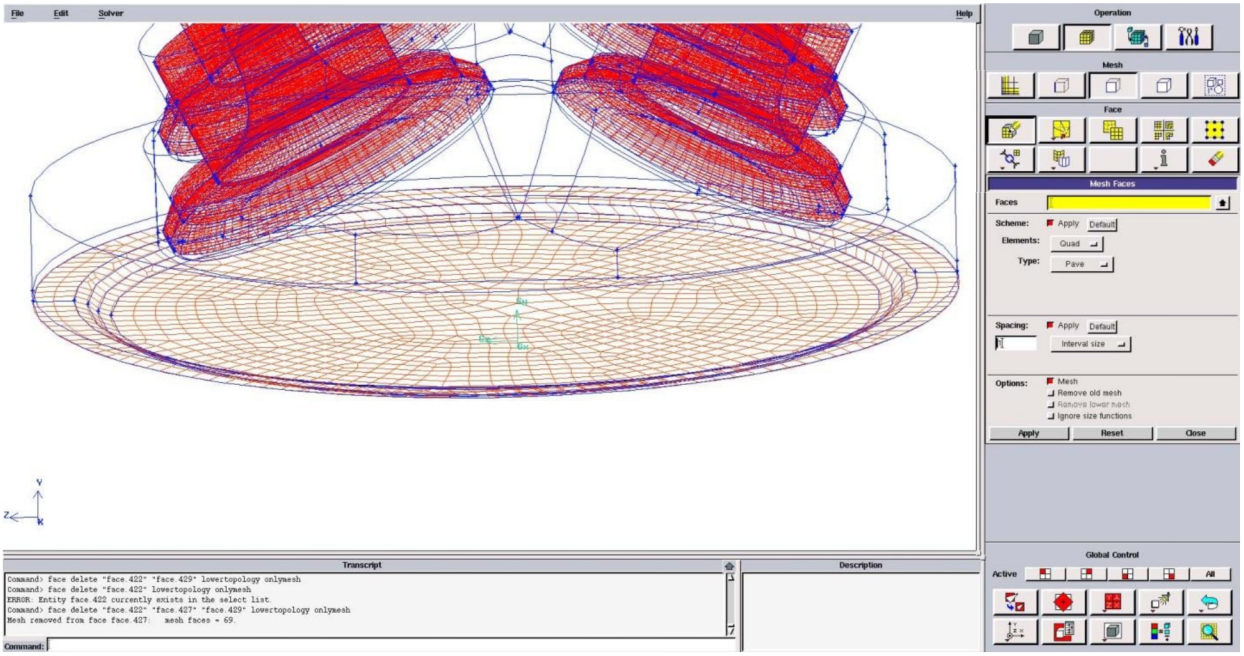


Рисунок 42 – Результат разбиения сеткой поверхностей поршня

Следующим шагом производится разбиение сеткой объема над поршнем с помощью команды:

Mesh (Сетка) → ***Volume*** (Объем) → ***Mesh Volumes*** (Разбить объем)

В появившемся меню *Mesh Volumes* в поле *Volumes* с помощью мыши выбирается объем над поршнем, назначается гексагональный элемент *Hex/Wedge* во вкладке *Elements*, тип разбиения *(Type) Cooper*. В поле *Spacing* вводится размер конечного элемента 1 *мм*. Для построения сетки нажимается кнопка *Apply*, в результате надпоршневой объем будет разбит сеткой (рисунок 43).

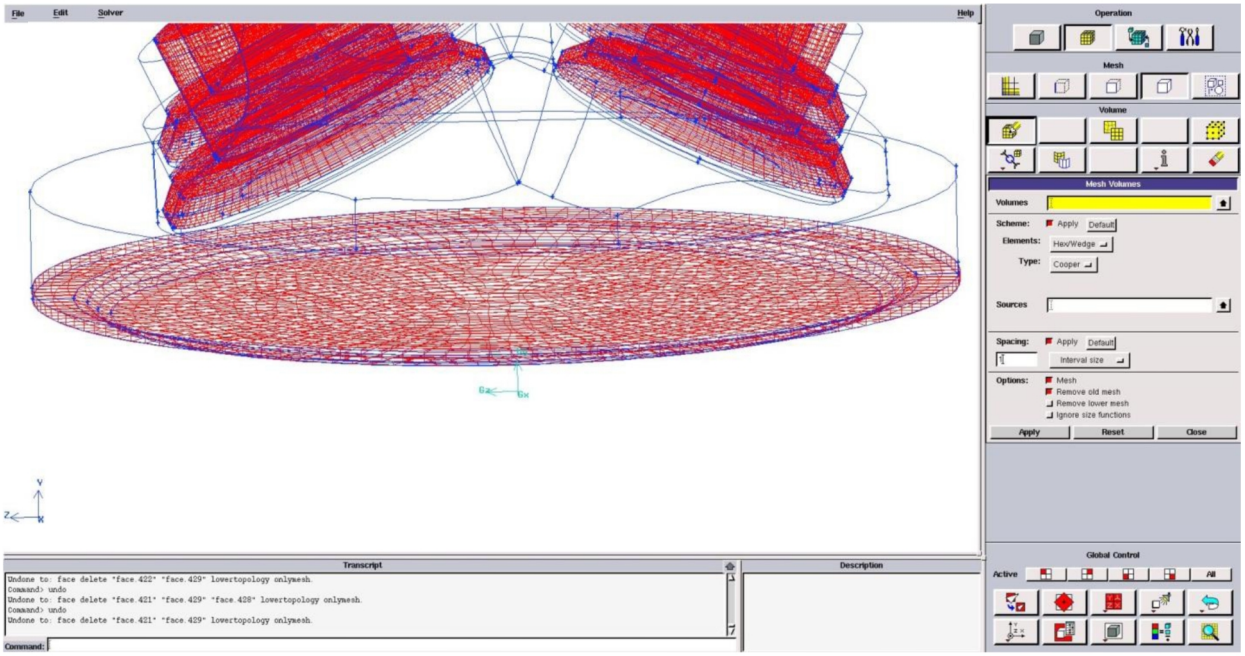


Рисунок 43 – Результат разбиения сеткой объема над поршнем

Объем камеры сгорания разбивается сеткой из тетраэдрагибридных элементов (*Tet/Hybrid*) тип разбиения *TGrid* с размером конечного элемента равным 1 *мм* (рисунок 44).

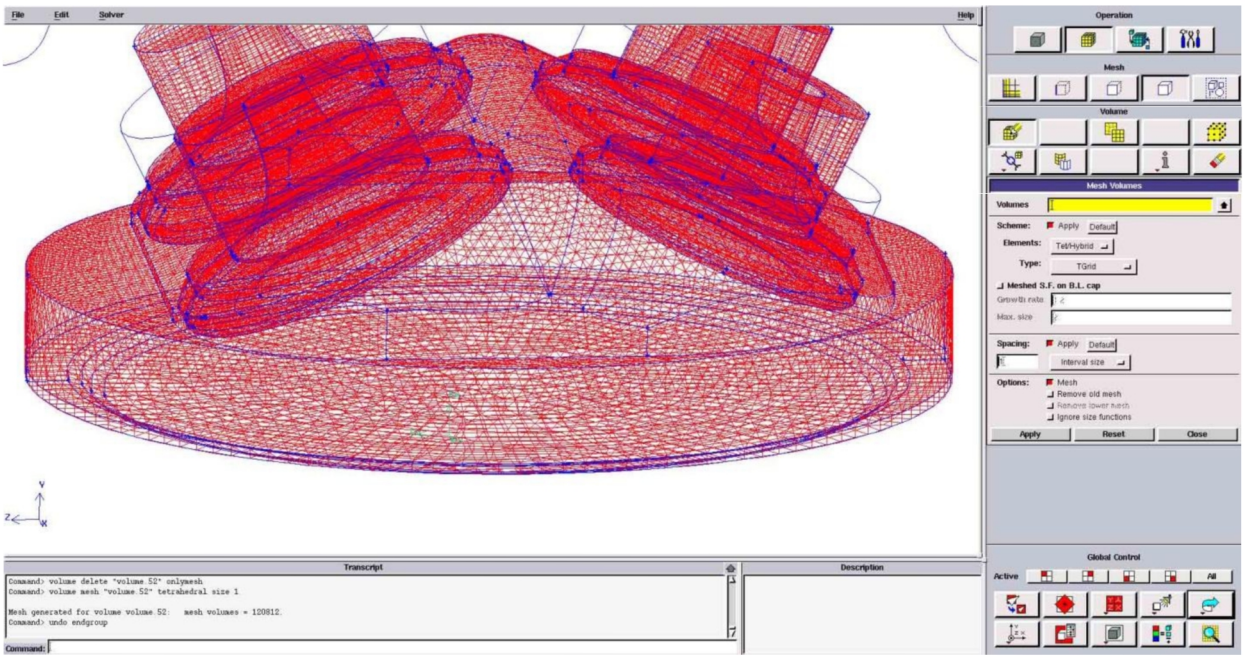


Рисунок 44 – Результат разбиения сеткой объема камеры сгорания

Объемы впускного и выпускного каналов разбивается также сеткой из тетраэдрагибридных элементов (*Tet/Hybrid*) с типом разбиения *TGrid* и размером конечного элемента равным 2 *мм* (рисунок 45).

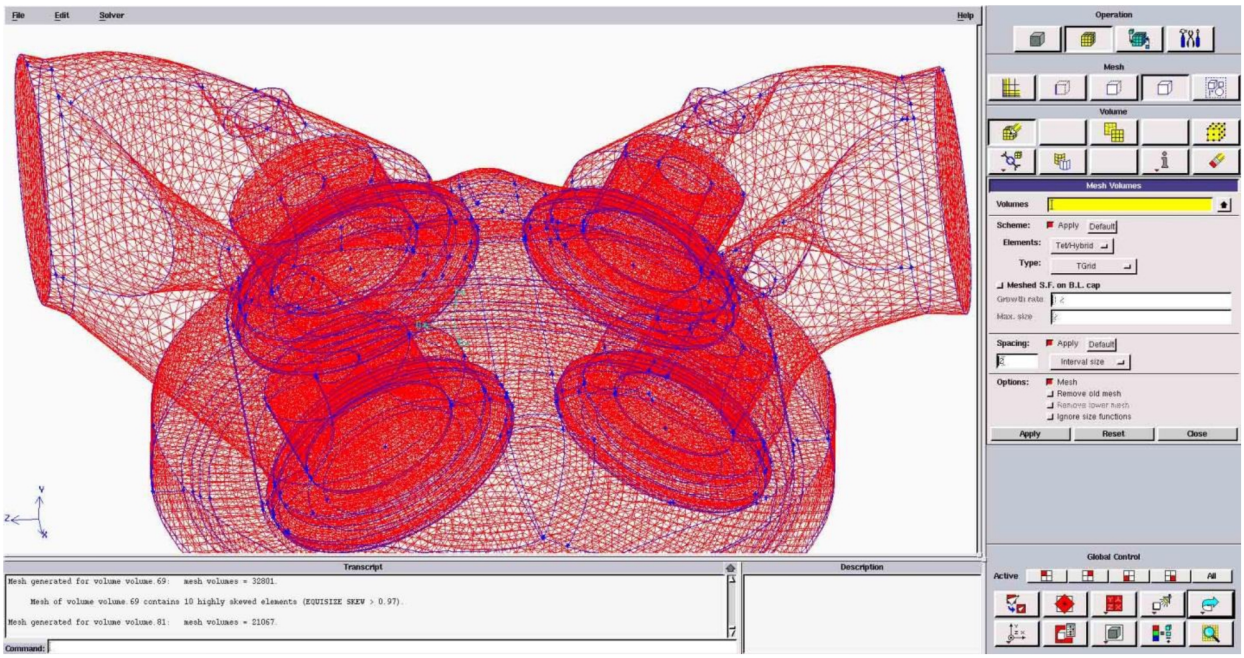


Рисунок 45 – Результат разбиения сеткой объемов впускного и выпускного каналов

1.4. Назначение граничных условий

Задание граничных условий производится в меню *Specify Boundary Types*:

Zones (Зоны)  → ***Specify Boundary Types*** (Указать типы граничных условий) 

В меню *Specify Boundary Types* с помощью мыши выбирается соответствующая поверхность во впускном канале. В окне *Name* необходимо ввести имя *Pressure_inlet*. Во вкладке *Type* выбрать тип *PRESSURE_INLET*. Для применения граничного условия нажимается0 кнопка *Apply* (рисунок 46).

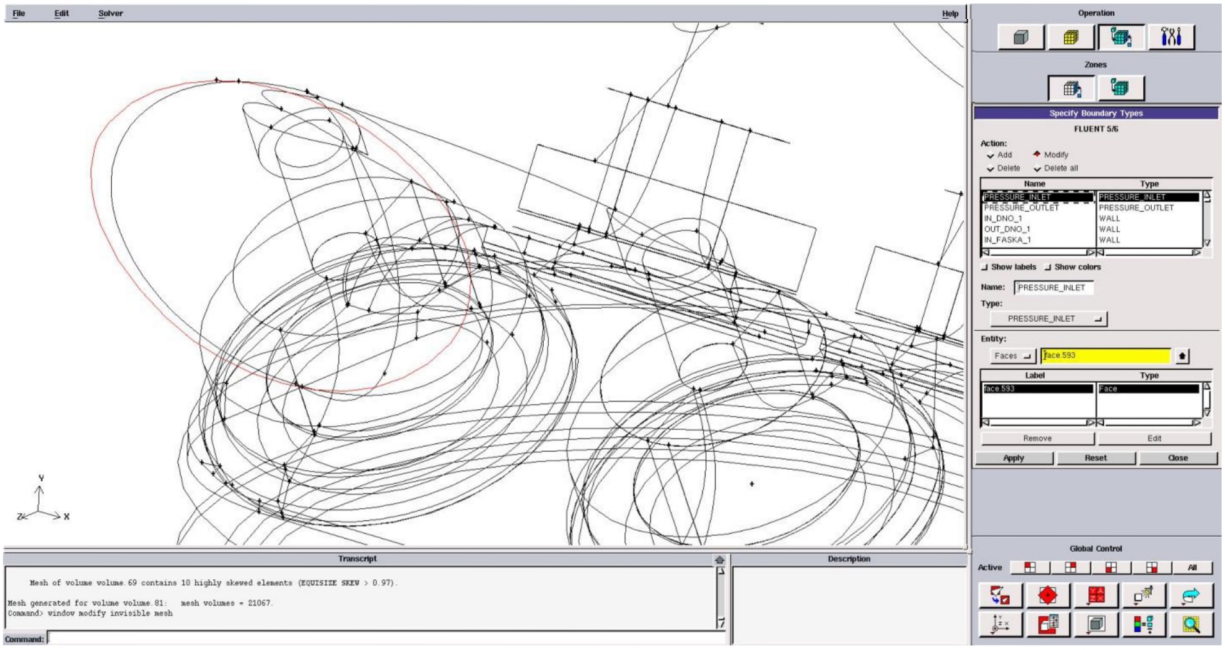


Рисунок 46 – Назначение граничных условий *Pressure_inlet*

Другие граничные условия задаются аналогично. Названия и выбираемые поверхности представлены на рисунке 47, нумерация клапанов показана на рисунке 48, типы граничных условий представлены в таблице 1.

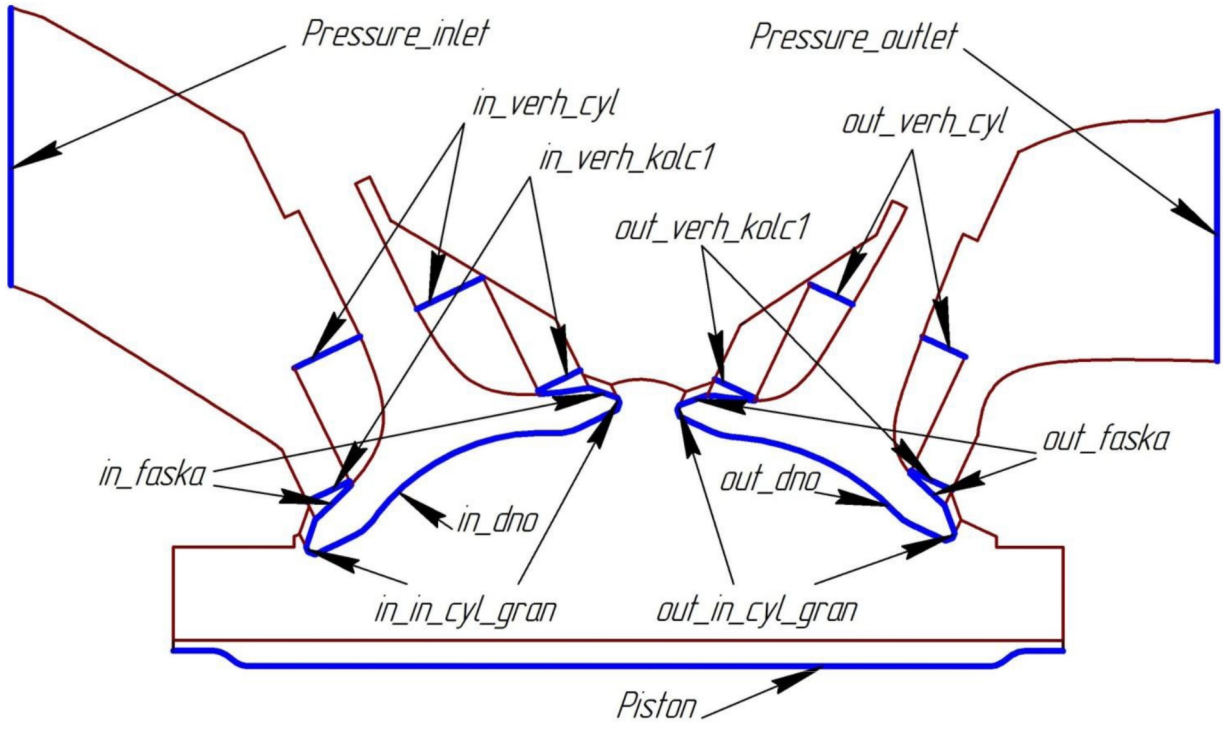


Рисунок 47 – Граничные условия для остальных поверхностей

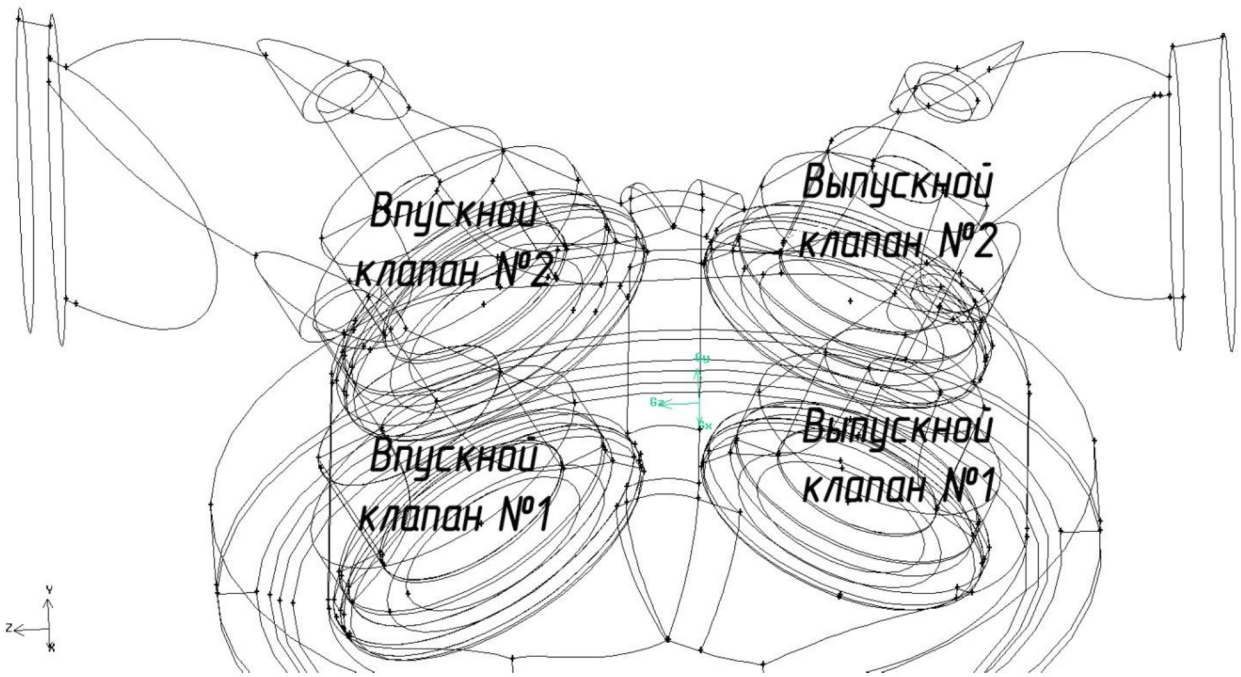


Рисунок 48 – Нумерация клапанов

Таблица 1 – Название и тип граничных условий для поверхностей

Название	**Тип**
Pressure_outlet	PRESSURE_OUTLET
Pressure_inlet	PRESSURE_INLET
in_verh_cyl_1	WALL
in_verh_kolc1_1	WALL
in_faska_1	WALL
in_dno_1	WALL
in_in_cyl_gran_1	WALL
in_verh_cyl_2	WALL
in_verh_kolc1_2	WALL
in_faska_2	WALL
in_dno_2	WALL
in_in_cyl_gran_2	WALL
out_verh_cyl_1	WALL
out_verh_kolc1_1	WALL

Продолжение таблицы 1

Название	Тип
out_faska_1	WALL
out_in_cyl_gran_1	WALL
out_dno_1	WALL
out_verh_cyl_2	WALL
out_verh_kolc1_2	WALL
out_faska_2	WALL
out_in_cyl_gran_2	WALL
out_dno_2	WALL
Piston	WALL

(цифра в названии обозначает номер клапана согласно рисунку 48)

Названия и тип граничных условий для наложенных друг на друга поверхностей представлены в таблице 2, изображение схемы поверхностей показано на рисунке 49.

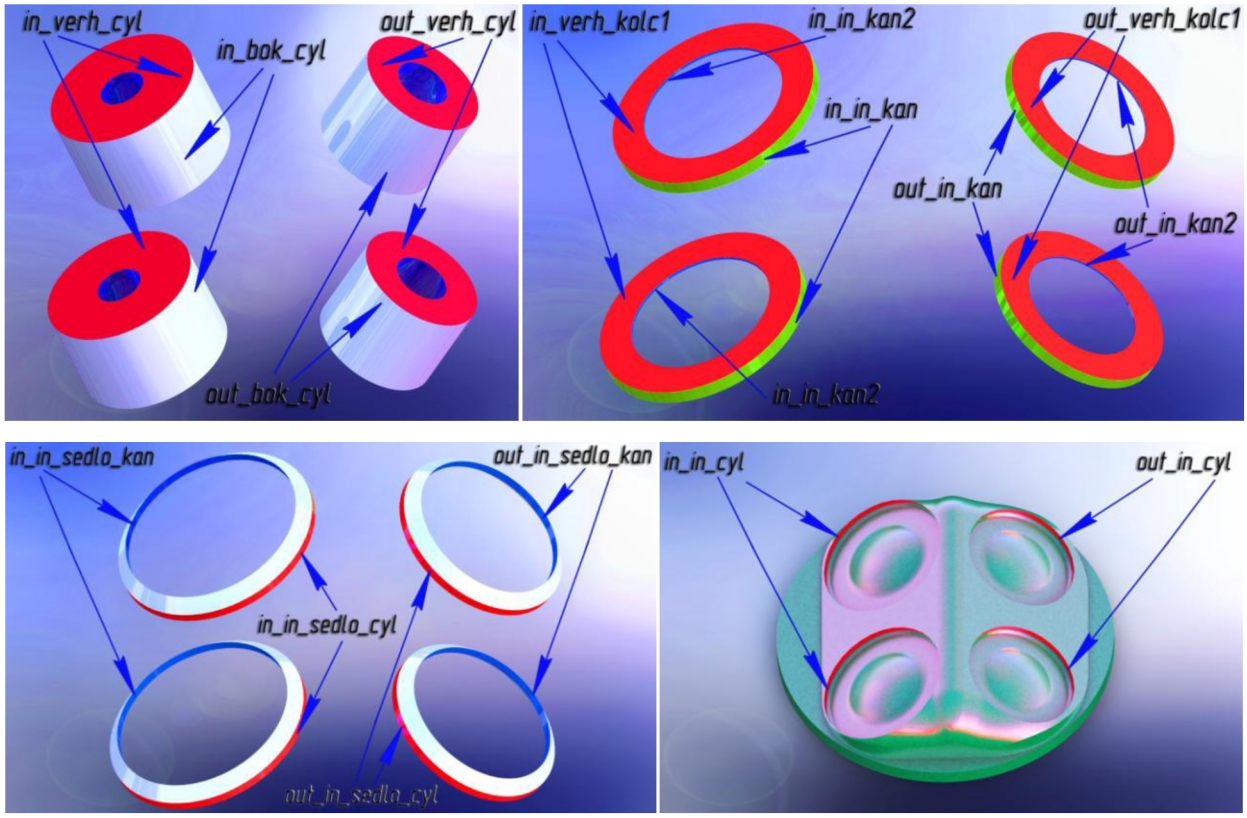


Рисунок 49 – Схема поверхностей

Таблица 2 – Название и тип граничных условий для наложенных поверхностей

Кольцевая поверхность	**Название**	**Тип**
Для первого впускного клапана		
принадлежащая камере сгорания	in_in_cyl_1	INTERFACE
принадлежащая кольцевому объему с профилем параллелограмма со стороны камеры сгорания	in_in_sedlo_cyl_1	INTERFACE
принадлежащая кольцевому объему с профилем параллелограмма со стороны кольцевого объема с профилем трапеции	in_in_sedlo_kan_1	INTERFACE
принадлежащая кольцевому объему с профилем трапеции со стороны кольцевого объема с профилем параллелограмма	in_in_kan_1	INTERFACE
принадлежащая кольцевому объему с профилем трапеции со стороны цилиндрического объема	in_in_kan2_1	INTERFACE
являющаяся боковой поверхностью цилиндрического объема	in_bok_cyl_1	INTERFACE
Для второго впускного клапана		
принадлежащая камере сгорания	in_in_cyl_2	INTERFACE

Продолжение таблицы 2

Кольцевая поверхность	Название	Тип
принадлежащая кольцевому объему с профилем параллелограмма со стороны камеры сгорания	in_in_sedlo_cyl_2	INTERFACE
принадлежащая кольцевому объему с профилем параллелограмма со стороны кольцевого объема с профилем трапеции	in_in_sedlo_kan_2	INTERFACE
принадлежащая кольцевому объему с профилем трапеции со стороны кольцевого объема с профилем параллелограмма	in_in_kan_2	INTERFACE
принадлежащая кольцевому объему с профилем трапеции со стороны цилиндрического объема	in_in_kan2_2	INTERFACE
являющаяся боковой поверхностью цилиндрического объема	in_bok_cyl_2	INTERFACE
Для первого выпускного клапана		
принадлежащая камере сгорания	out_in_cyl_1	INTERFACE
принадлежащая кольцевому объему с профилем параллелограмма со стороны камеры сгорания	out_in_sedlo_cyl_1	INTERFACE

Продолжение таблицы 2

Кольцевая поверхность	Название	Тип
принадлежащая кольцевому объему с профилем параллелограмма со стороны кольцевого объема с профилем трапеции	out_in_sedlo_kan_1	INTERFACE
принадлежащая кольцевому объему с профилем трапеции со стороны кольцевого объема с профилем параллелограмма	out_in_kan_1	INTERFACE
принадлежащая кольцевому объему с профилем трапеции со стороны цилиндрического объема	out_in_kan2_1	INTERFACE
являющаяся боковой поверхностью цилиндрического объема	out_bok_cyl_1	INTERFACE
Для второго выпускного клапана		
принадлежащая камере сгорания	out_in_cyl_2	INTERFACE
принадлежащая кольцевому объему с профилем параллелограмма со стороны камеры сгорания	out_in_sedlo_cyl_2	INTERFACE
принадлежащая кольцевому объему с профилем параллелограмма со стороны кольцевого объема с профилем	out_in_sedlo_kan_2	INTERFACE

Продолжение таблицы 2

Кольцевая поверхность	Название	Тип
принадлежащая кольцевому объему с профилем трапеции со стороны кольцевого объема с профилем параллелограмма	out_in_kan_2	INTERFACE
принадлежащая кольцевому объему с профилем трапеции со стороны цилиндрического объема	out_in_kan2_2	INTERFACE
являющаяся боковой поверхностью цилиндрического объема	out_bok_cyl_2	INTERFACE

На остальных поверхностях модели, которые не были отмечены как граничные, по умолчанию будут установлены граничные условия стенки (*Wall*). Изображение граничных условий для наложенных поверхностей показано на рисунке 50.

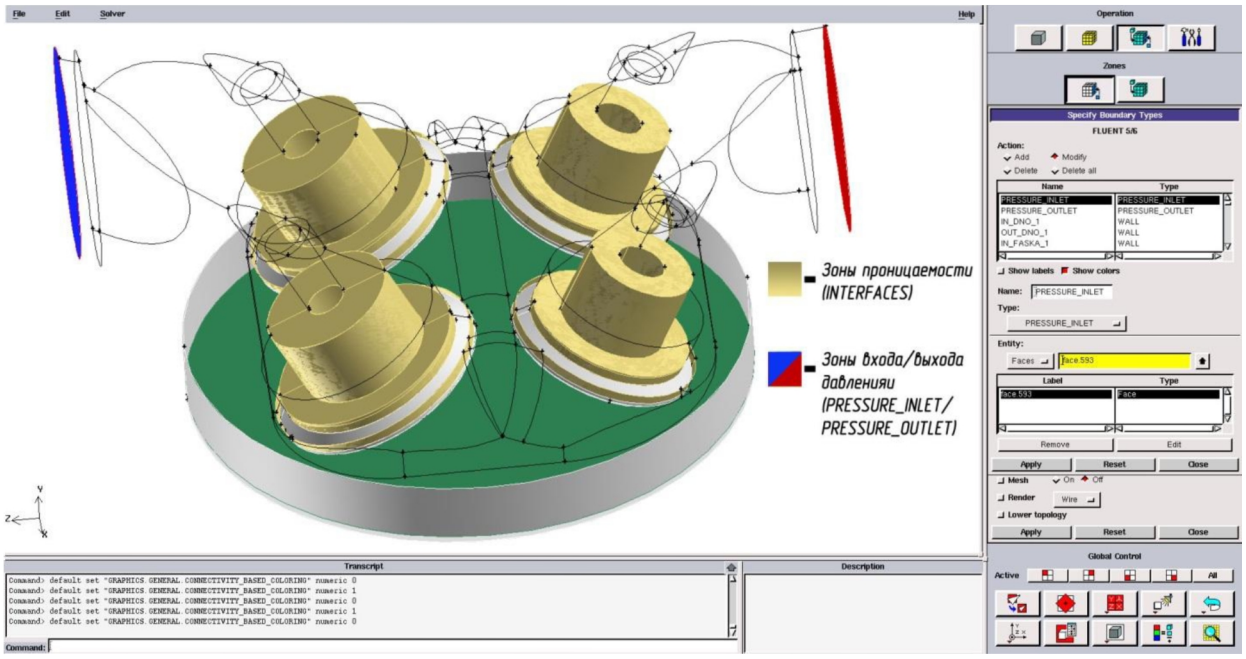


Рисунок 50 – Граничные условия для наложенных поверхностей

1.5. Назначение типа зон

Для задания типа зон используется меню *Specify Continuum Types*:

Zones  → ***Specify Continuum Types*** 

(Зоны) (Указать типы сплошных зон)

В появившемся окне *Specify Continuum Types* в меню *Entity* необходимо выбрать *Volumes*, далее с помощью мыши выбрать объем впускного канала. В окне *Name* ввести название *Vpysk*. Во вкладке *Type* выбрать *FLUID*. Для применения задания типа зоны необходимо нажать кнопку *Apply* (рисунок 51)

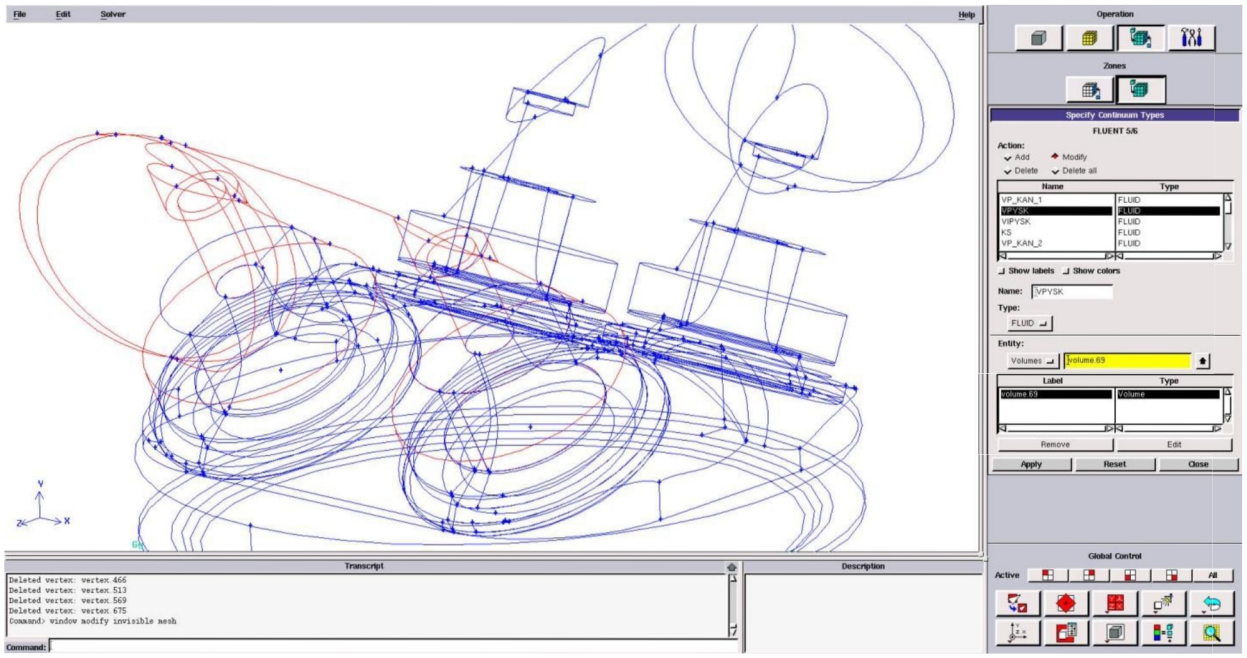


Рисунок 51 – Задание зоны *Vpysk*

Другие зоны задаются аналогично. Тип зон и их названия представлены в таблице

Таблица 3 – Название и тип зон

Зона	**Название**	**Тип**
Впускной канал	Vpysk	Fluid
Выпускной канал	Vipysk	Fluid
Камера сгорания	Ks	Fluid
Надпоршневой объем	Porsh	Fluid

Продолжение таблицы 3

Зона	Название	Тип
Для впускных клапанов		
Цилиндрический объем первого клапана	Vp_cyl_1	Fluid
Цилиндрический объем второго клапана	Vp_cyl_2	Fluid
Кольцевой объем с профилем трапеции первого клапана	Vp_kan_1	Fluid
Кольцевой объем с профилем трапеции второго клапана	Vp_kan_2	Fluid
Кольцевой объем с профилем параллелограмма первого клапана	Vp_sedlo_1	Fluid
Кольцевой объем с профилем параллелограмма второго клапана	Vp_sedlo_2	Fluid
Для выпускных клапанов		
Цилиндрический объем первого клапана	Vip_cyl_1	Fluid
Цилиндрический объем второго клапана	Vip_cyl_2	Fluid
Кольцевой объем с профилем трапеции первого клапана	Vip_kan_1	Fluid
Кольцевой объем с профилем трапеции второго клапана	Vip_kan_2	Fluid
Кольцевой объем с профилем параллелограмма первого клапана	Vip_sedlo_1	Fluid

Продолжение таблицы 3

Зона	Название	Тип
Кольцевой объем с профилем параллелограмма второго клапана	Vip_sedlo_2	Fluid

После задания названия и типа всех зон необходимо экспортировать сеточную модель в файл с расширением *.msh* для дальнейшего расчета в программном комплексе *ANSYS Fluent*.

1.6. Подготовка текстового файла описывающего профиль клапанов и перемещение границы между сетками с треугольными и прямоугольными элементами

Для описания профиля клапанов и перемещения границы между сетками с треугольными и прямоугольными элементами используется программа *Microsoft Excel*. В качестве исходных данных вводятся радиус кривошипа и длина шатуна, углы наклона, высота подъемов, углы открытия и закрытия впускного и выпускного клапанов.

Для описания перемещения границы между сетками с треугольными и прямоугольными элементами использовалось уравнение поршня $L(\varphi)=R((1-\cos\varphi)+0.25\lambda(1-\cos2\varphi))$. Перемещение клапанов описано по уравнению синуса.

Полученные результаты необходимо сохранить в текстовом файле *3dprof.txt*. Далее необходимо открыть файл в программе *Microsoft WordPad*, в которой удалить не нужные строки *«лишнее»*, заменить абзацные отступы *Tab* на пробелы и запятые на точки. Затем сохранить файл с изменением его расширения на «*.prof*».

2 МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЕ ДВС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ *ANSYS FLUENT*

Для расчета тепловых и газодинамических процессов в программе *ANSYS Fluent* необходимо загрузить созданные ранее сеточную модель и файл профиля движения клапанов.

2.1 Настройка параметров сетки

Сеточная модель построена в *ANSYS Gambit* в миллиметрах. Размеры расчетных моделей в программе *ANSYS Fluent* должны быть обязательно заданы в метрах, поэтому построенную сетку необходимо масштабировать с помощью команды *Scale Mesh* (*Mesh* → *Scale...*) представленной на рисунке 52.

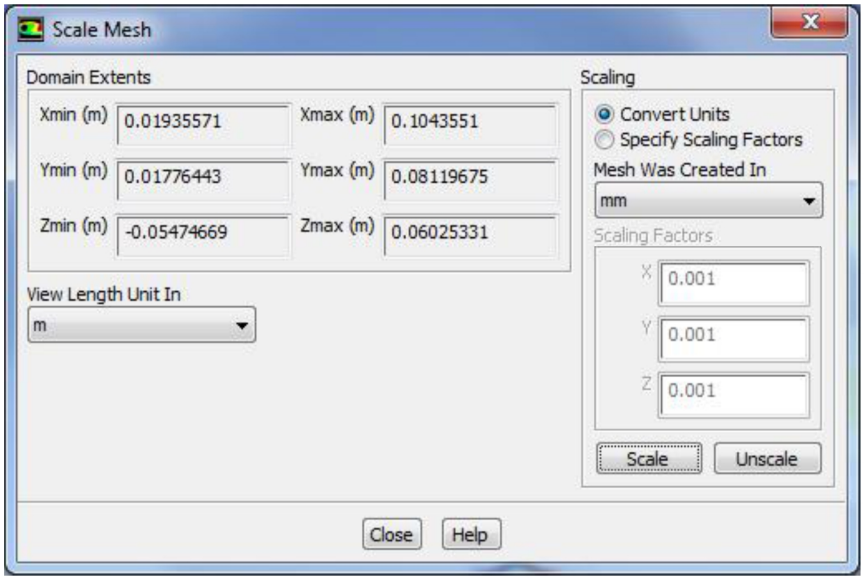


Рисунок 52 – Меню масштаба сетки (*Scale Mesh*)

Далее сетка отображается с помощью команды *Mesh Display* (*Display* → *Mesh...*). Результат отображения представлен на рисунке 53.

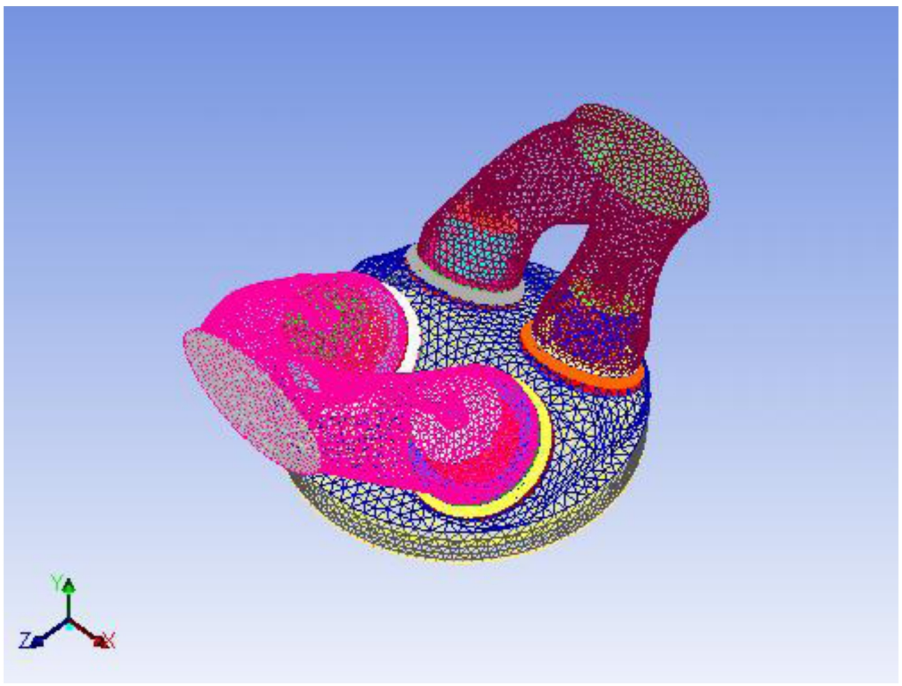


Рисунок 53 – Внешний вид расчетной модели

2.2 Настройка модели решателя

Для решения данной задачи необходимо выбрать нестационарный метод моделирования (рисунок 54) с помощью команды: *Define* → *General* → *Solver...*

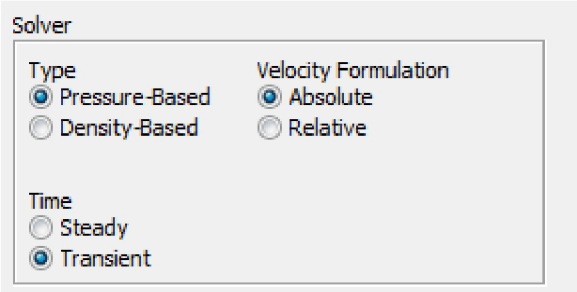


Рисунок 54 – Меню опций решателя (*Solver*)

Для обеспечения высокой точности расчетов необходимо выбрать соответствующую для данной задачи модель турбулентности. Учитывая сложность задачи, необходимо использовать *k-ε* модель турбулентности (рисунок 55). Которая задается с помощью команды: *Define* → *Models* →*Viscous*.

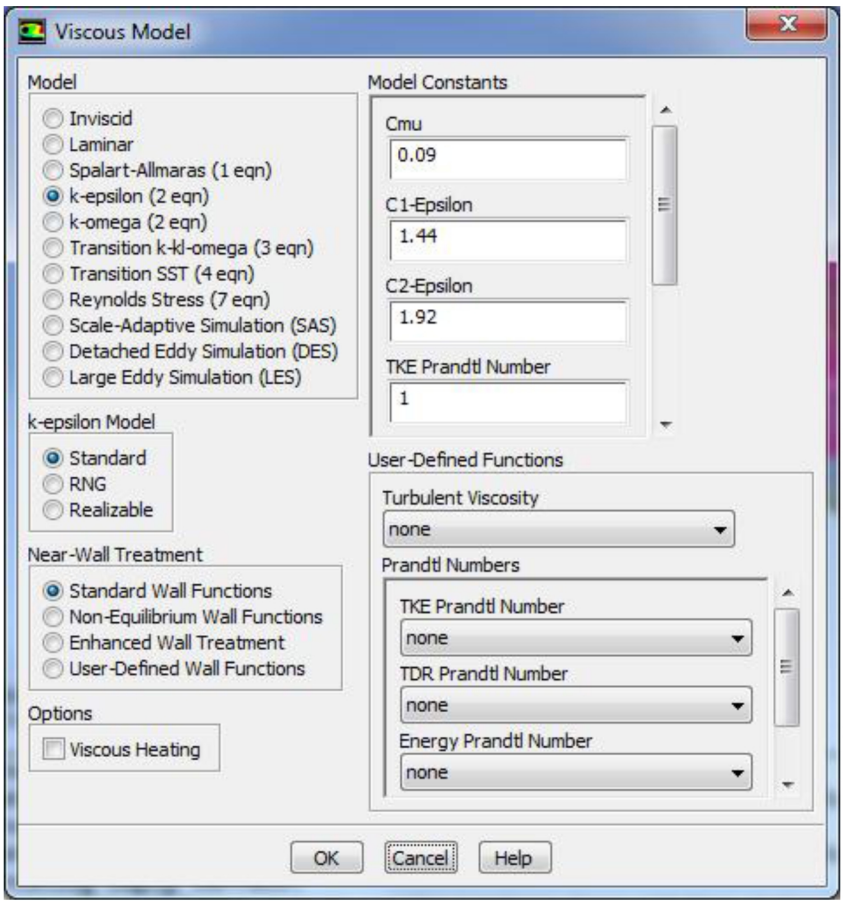


Рисунок 55 – Меню выбора модели турбулентности (*Viscous Model*)

При решении данной задачи необходимо учитывать теплообмен и теплопередачу. Для этого к решению подключается уравнение энергии (рисунок 56) с помощью команды: *Define* → *Models* → *Energy*...

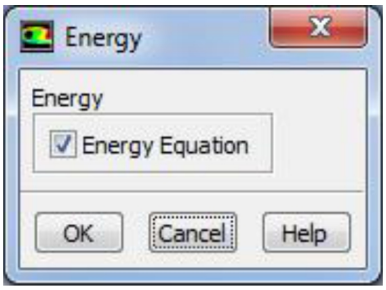


Рисунок 56 – Меню включения уравнения энергии (*Energy*)

2.3 Задание параметров модели смешения и свойств рабочего тела

На данном этапе моделирования задаются параметры смешивания химических веществ (рисунок 23). Для этого выполняются следующие действия: *Define* → *Models* → *Species*...

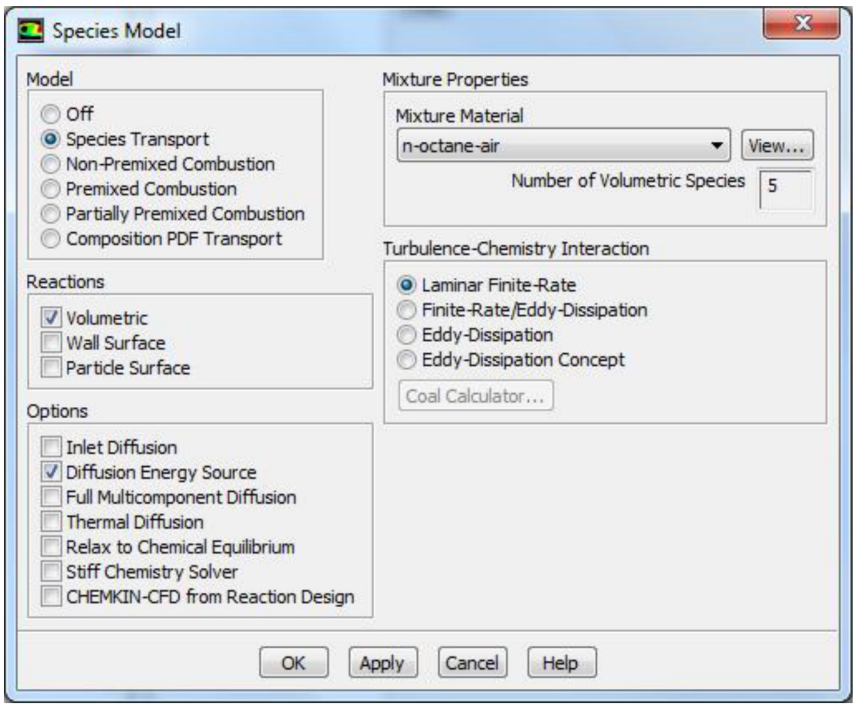


Рисунок 57 – Меню компонентов (*Species Model*)

а) В перечне моделей *Model* выбирается опция *Species Transport.*

б) В списке реакций *Reactions* выбирается опция *Volumetric.*

в) Выбирается *Diffusion Energy Source* в перечне опций *Options.*

г) В свойствах смеси *Mixture Properties* выбирается *n-octane-air* в материалах смеси *Mixture Material*.

Так как топливо, используемое в двигателе, является жидким то необходимо настроить параметры процесса испарения топлива (рисунок 58).

Define → *Models* → *Discrete Phase...*

а) Необходимо определить влияние границ раздела фаз:

Выбрав опцию *Interaction with Continuous Phase* в списке *Interaction*, граница разделения фаз будет использоваться по умолчанию.

Затем выбирается опция *Update DPM Sources Every Flow Iteration* в списке настроек *Interaction*.

б) Во вкладке физических моделей *Physical Models* настраивается учет соударения капель *Droplet Collision* и дробления капель *Droplet Breakup* в разделе модели распыления *Spray Model.*

Выбирается *TAB* модель в разделе моделей дробления *Breakup Model.*

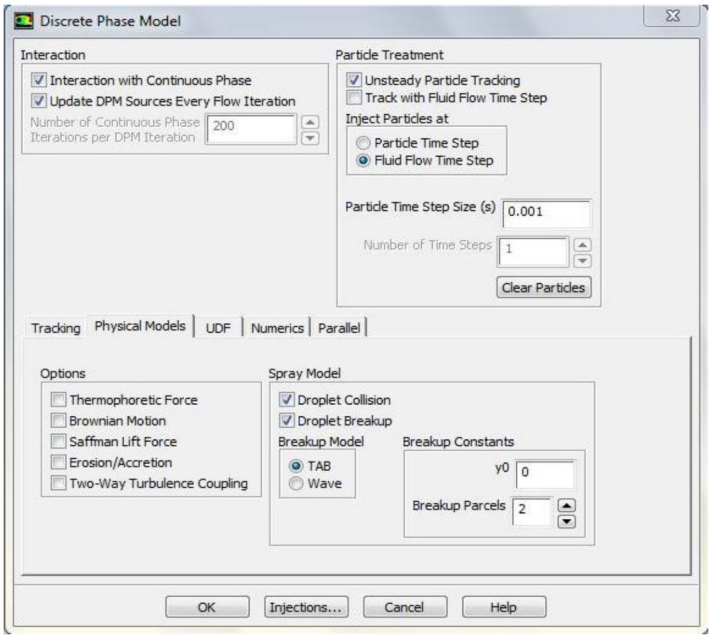


Рисунок 58 – Меню настройки параметров испарения (*Discrete Phase Model*)

Так как происходит реакция горения и выбрана смесь *n-octane-air,* то отдельный воздух (*air*) не нужен и его необходимо удалить. Для этого в меню *Materials* (*Define* → *Materials*) представленном на рисунке 59 выделен *air* и удален с помощью клавиши *delete.*

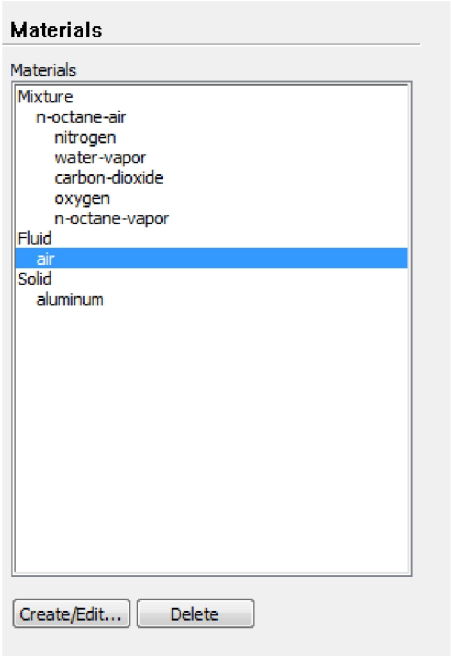


Рисунок 59 – Меню настройки веществ (*Materials*)

2.4 Настройка граничных условий

В меню *Boundary Conditions* (*Define* → *Boundary Conditions*...) задаются граничные условия, определенные в *ANSYS Gambit* (рисунок 60).

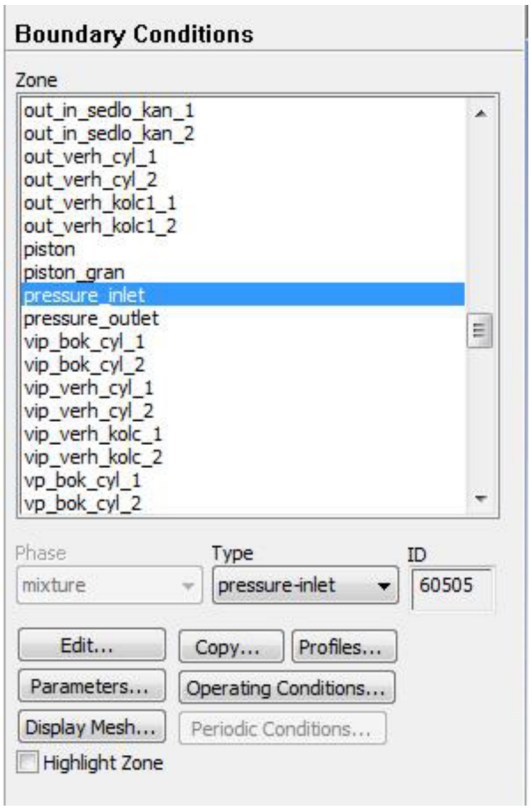


Рисунок 60 – Меню настройки граничных условий (*Boundary Conditions*)

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

Задание граничных условий начинается с *pressure_inlet* (рисунок 61).

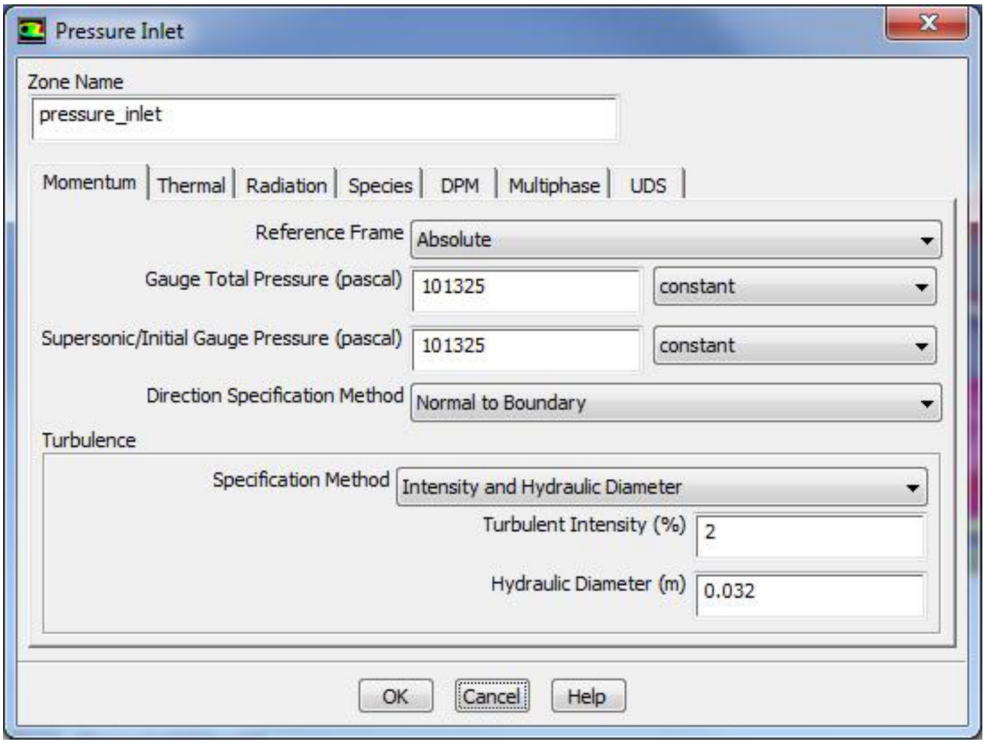


Рисунок 61 – Меню настройки давления на входе (*pressure_inlet*)

Значения избыточного давления на входе в строках *Gauge Total Pressure* и *Supersonic/Initial Gauge Pressure* равны нормальному атмосферному давлению *101325Па*. Это связано с тем, что рабочее давление (опция *Operating Conditions*) равно *0Па*.

В выпадающем списке *Specification Method* выбирается опция *Intensity and Hydraulic Diameter*. В строке интенсивности турбулентности *Turbulence Intensity* вводится значение *2%*. В строке гидравлического диаметра *Hydraulic Diameter* вводится значение *0,032м*. Гидравлический диаметр рассчитывается по формуле:

$$d_э = 4F/P, \quad (1)$$

где F – площадь входного сечения канала;

P – периметр входного сечения канала.

Во вкладке *Thermal* в строке *Total Temperature* вводится значение *300К*.

Для задания граничного условия на выходной границе в меню *Boundary Condition* выбирается данная граница (*pressure_outlet.1*) (рисунок 62).

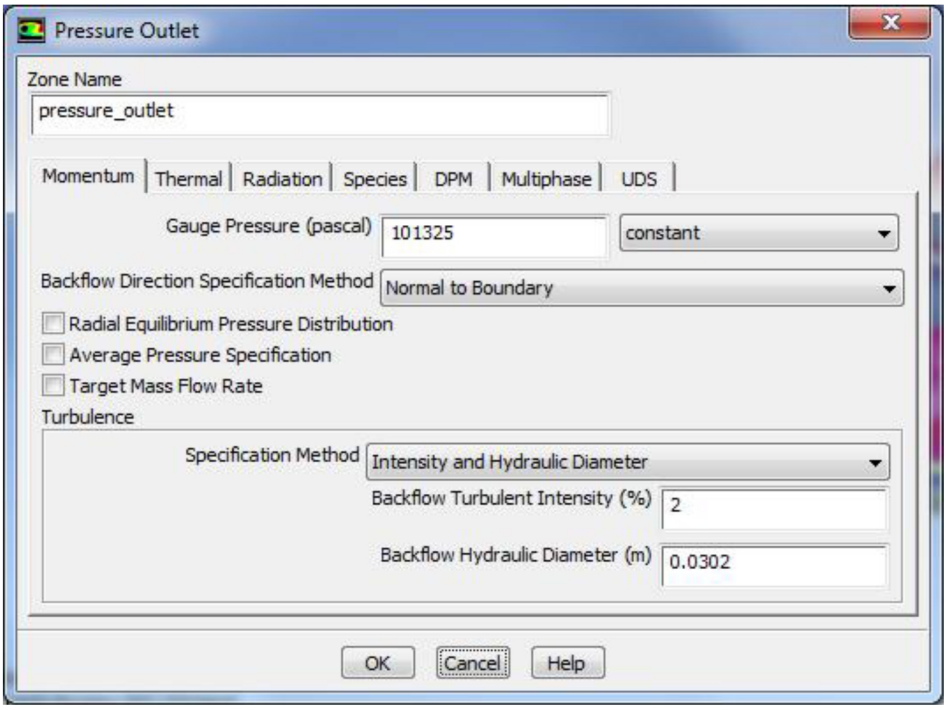


Рисунок 62 – Меню настройки давления на выходе (*pressure_outlet)*

Значения избыточного давления на выходе в строках *Gauge Pressure* задается равным нормальному атмосферному давлению *101325Па*.

Выбирается опция *Intensity and Hydraulic Diameter* в выпадающем списке *Specification Method*.

В строке интенсивности турбулентности *Back flow turbulence Intensity* вводится значение *2%*.

В строке гидравлического диаметра *Back flow Hydraulic Diameter* вводится значение 0,0302 *м*. Гидравлический диаметр рассчитывается аналогично подобному расчету для впускного канала (*pressure_inlet*).

Во вкладке *Thermal* в строке *Back flow Total Temperature* вводится значение температуры 300 *К*.

2.5 Настройка зон пересечения сетки

Данная настройка необходима для получения движущейся сетки и на этом этапе настраивается проницаемость границ между расчетными зонами (рисунок 63).

Define → Mesh Interfaces → Create/Edit...

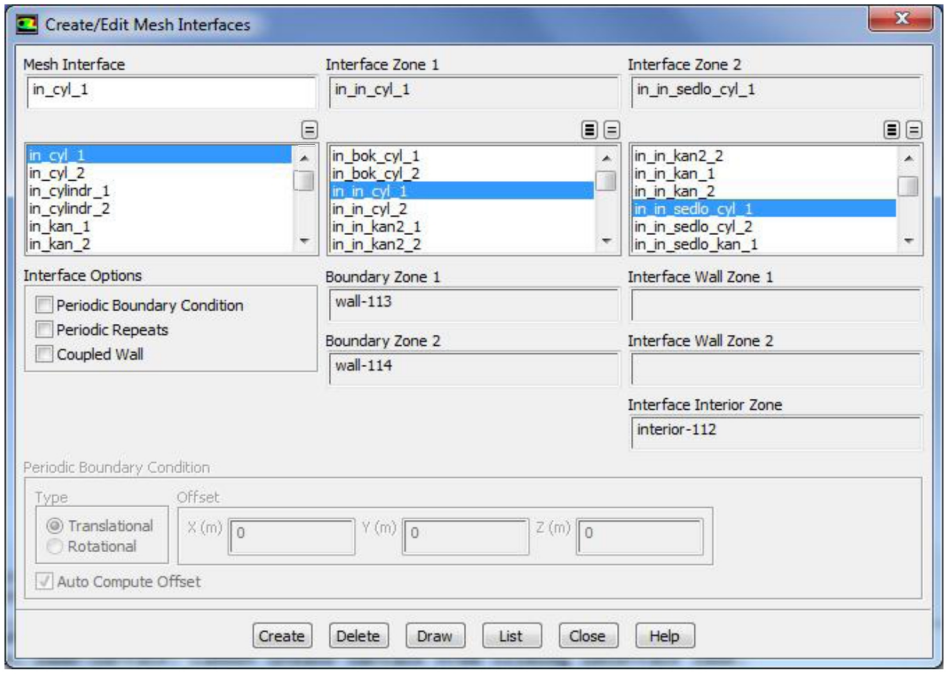


Рисунок 63 – Меню задания проницаемости между зонами (*Create/Edit Mesh Interfaces*)

Для этого в данном меню необходимо выполнить следующую последовательность действий:

- В списке *Interface Zone 1* выбрать строку *in_in_cyl_1*.
- В списке *Interface Zone 2* выбрать строку *in_in_sedlo_cyl_1*.
- В строке *Mesh Interface* ввести название *in_cyl_1*.
- Для завершения создания проницаемой границы нажать клавишу *Create*.

Аналогичным образом задаются границы проницаемости между оставшимися зонами, указанными в таблице 4:

Таблица 4 – Границы проницаемости зон

Interface Zone 1	**Interface Zone 2**	**Mesh Interface**
in_in_cyl_2	*in_in_sedlo_cyl_2*	*in_cyl_2*
in_bok_cyl_1	*in_in_kan2_1;* *vp_bok_cyl_1*	*in_cylindr_1*
in_bok_cyl_2	*in_in_kan2_2;* *vp_bok_cyl_2*	*in_cylindr_2*
in_in_sedlo_kan_1	*in_in_kan_1*	*in_kan_1*
in_in_sedlo_kan_2	*in_in_kan_2*	*in_kan_2*
out_in_cyl_1	*out_in_sedlo_cyl_1*	*out_cyl_1*
out_in_cyl_2	*out_in_sedlo_cyl_2*	*out_cyl_2*
out_bok_cyl_1	*out_in_kan2_1;* *vip_bok_cyl_1*	*out_cylindr_1*
out_bok_cyl_2	*out_in_kan2_2;* *vip_bok_cyl_2*	*out_cylindr_2*
out_in_sedlo_kan_1	*out_in_kan_1*	*out_kan_1*
out_in_sedlo_kan_2	*out_in_kan_2*	*out_kan_2*
out_verh_kolc1_1	*vip_verh_kolc_1*	*vip_kolc_1*
out_verh_kolc1_2	*vip_verh_kolc_2*	*vip_kolc_2*
out_verh_cyl_1	*vip_verh_cyl_1*	*vip_verh_1*
out_verh_cyl_2	*vip_verh_cyl_2*	*vip_verh_2*
in_verh_kolc1_1	*vp_verh_kolc_1*	*vp_kolc_1*
in_verh_kolc1_2	*vp_verh_kolc_2*	*vp_kolc_2*
in_verh_cyl_1	*vp_verh_cyl_1*	*vp_verh_1*
in_verh_cyl_2	*vp_verh_cyl_2*	*vp_verh_2*

2.6 Настройка параметров движения сетки

Задание динамической модели движения сетки и её основных параметров (рисунки 64 - 65) осуществляется следующим образом:

Define → *Dynamic Mesh...*

При этом выполняется следующая последовательность действий:

Устанавливается галочка перед *Dynamic Mesh*, выбираются все возможные типы перестройки параметров сетки во время ее движения. Для этого необходимо установить галочку перед *Smoothing*, *Layering* и *Remeshing*, активировать опцию *In-Cylinder*.

Задание опции *In-Cylinder* позволяет использовать учет дополнительных условий, таких как движение поршня и клапанов.

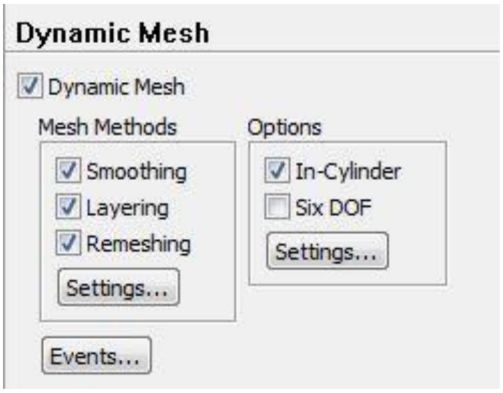


Рисунок 64 – Меню динамической сетки (*Dynamic Mesh*)

В разделе *Mesh Methods* используется опция *Settings*…. В данной опции указываются параметры для схемы перестроения сетки *Smoothing: Spring Constant Factor* – 0,5, *Boundary Node Relaxation* – 0,2. Значения в строках *Convergence Tolerance* и *Number of Iterations* равны соответственно 0,001 и 20.

После этого выполняется настройка параметров для схемы движения расчетной сетки *Layering*. Заданы следующие параметры: *Split Factor* – 0,4, *Collapse Factor* – 0,2.

Аналогичным образом происходит настройка параметров для схемы движения сетки *Remeshing*. Активируется опция *Region Face* и задаются следующие параметры: *Minimum Length Scale (m)* – 0,0005, *Maximum Length Scale (m)* – 0,0035, *Maximum Cell Skewness* – 0,9, *Size Remeshing Interval* – 5.

Если элемент выходил за границы предельных значений *Minimum Length Scale* или *Maximum Length Scale limits*, то элементу назначается переразбиение. Следовательно, решается задача – задания необходимых параметров разбиения. В окне *Mesh Scale Info* показаны значения наименьшего, наибольшего размера разбиения и значение максимальной скошенности начального разбиения. Для задач *3D* моделирования рекомендуются значения максимальной скошенности *Maximum Cell Skewness* от 0,6 до 0,7. Меньшие значения максимальной скошенности приводят к улучшению качества сетки и увеличению точности результатов вычислений.

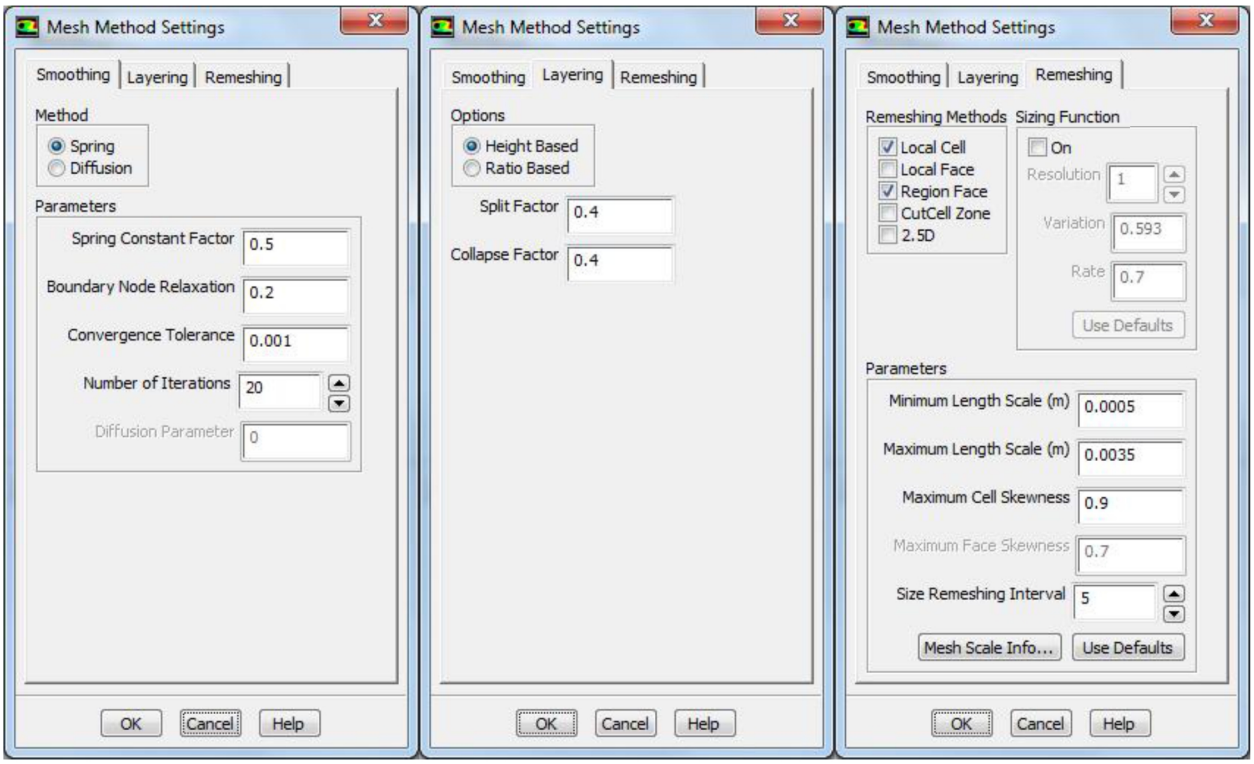


Рисунок 65 – Меню параметров настройки типов движения сетки *(Mesh Methods Settings)*

В разделе *in-Cylinder* используя опцию *Settings*…. Необходимо задать параметры, указанные на рисунке 66. Модель *In-Cylinder* используется при моделировании процессов в ДВС. Это облегчает задачи моделирования движения поршня. Здесь *Crank Shaft Speed* – частота вращения коленчатого вала (об/мин.), *Starting Crank Angle* – начальный угол поворота коленчатого

вала, *Crank Period* – время цикла в градусах (для двухтактного двигателя 360°), *Crank Angle Step Size*– угол поворота коленчатого вала за один шаг, *Piston Stroke*– ход поршня в метрах, *Connecting Rod Length* – длина шатуна в метрах.

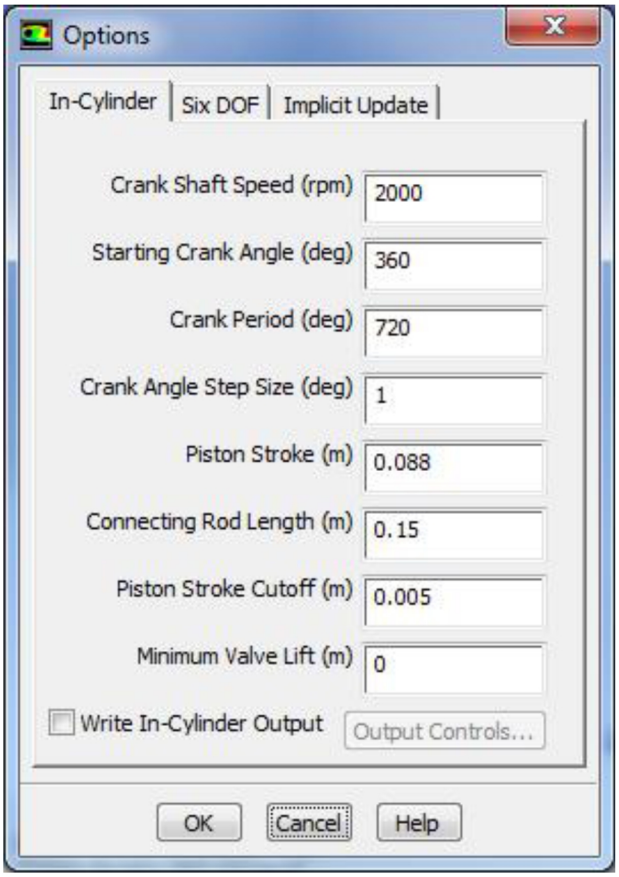


Рисунок 66 – Меню параметров настройки движения поршня (*In-Cylinder Settings*)

Для задания параметров движения поршня, клапанов и других подвижных элементов моделируемого двигателя выполняются следующие действия: *Define* → *Dynamic Mesh*...

Активируется опция *Create/Edit*... под окном *Dynamic Mesh Zones*.

а) Задание параметров области *ks* (рисунок 67):

Выбирается область *ks* в выпадающем списке *Zone Names*, выбирается опция *Deforming* в списке *Type*.

В разделе *Meshing Options* выбирается схема перестроения расчетной сетки *Smoothing* и *Remeshing* в списке *Methods*, вводятся следующие значения

в разделе *Zone Parameters*: *Minimum Length Scale* – 0,0007, *Maximum Length Scale* – 0,0035, *Maximum Cell Skewness* – 0,7.

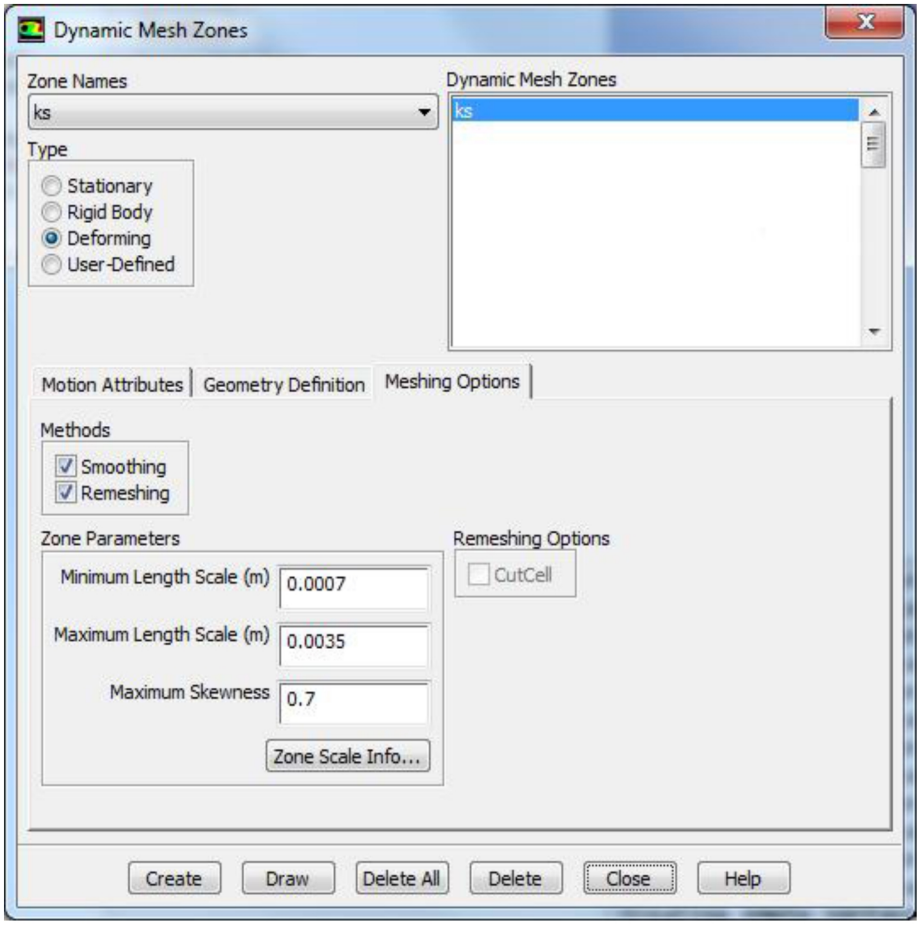


Рисунок 67 – Меню задания параметров зоны сетки *ks*

б) Задание параметров области сетки *in_in_cyl_1* (рисунки 68-69). Выбирается зона *in_in_cyl_1* в выпадающем списке *Zone Names*. В списке типов зон сетки *Type* выбирается *Deforming*. В разделе *Geometry Definition*, выполняются следующие настройки:

- Выбирается тип *cylinder* в выпадающем списке *Definition*.
- Устанавливается значение радиуса тарелки впускного клапана 0,0165м в строке *Cylinder Radius*.
- Устанавливаются значения для *Cylinder Origin*: *X(m)*=0,082255, *Y(m)*=0,038241, *Z(m)*=0,018145, – координаты точки на оси клапана.

- Устанавливаются значения для *Cylinder Axis*: *X*=0, *Y*= *sinα*=0,89981 и *Z*= *cosα*=0,43627, где *α* – угол между осью клапана и осью абсцисс.

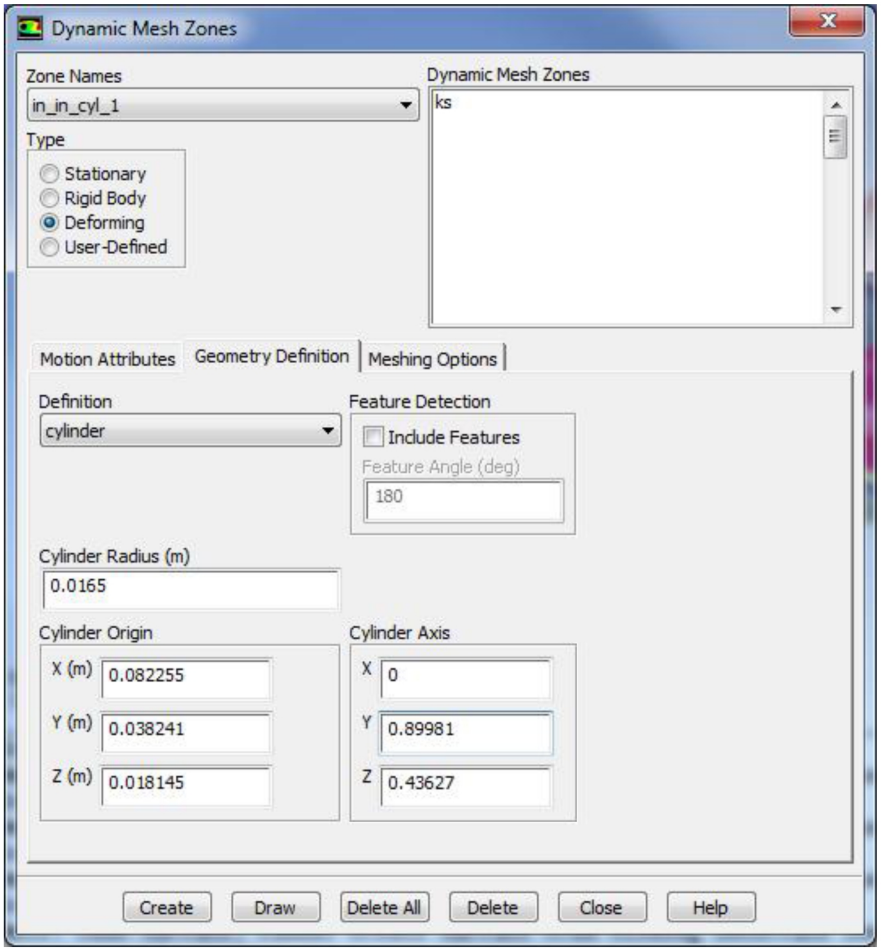


Рисунок 68 – Меню задания параметров зоны сетки *in_in_cyl_1* (*Geometry Definition*)

В разделе *Meshing Options* (рисунок 69) задаются следующие параметры:

- Выбираются схемы перестроения расчетной сетки *Smoothing* и *Remeshing* в списке *Methods*.
- В опции настройки схемы движения расчетной сетки *Smoothing* (*Smoothing Methods*) устанавливатеся *Spring*.
- В опции настройки схемы движения расчетной сетки *Remeshing* (*Remeshing Methods*) устанавливатеся *Region*.

- В разделе *Zone Parameters* вводятся следующие значения: *Minimum Length Scale* – 0,002, *Maximum Length Scale* – 0,00025, *Maximum Cell Skewness* – 0,7

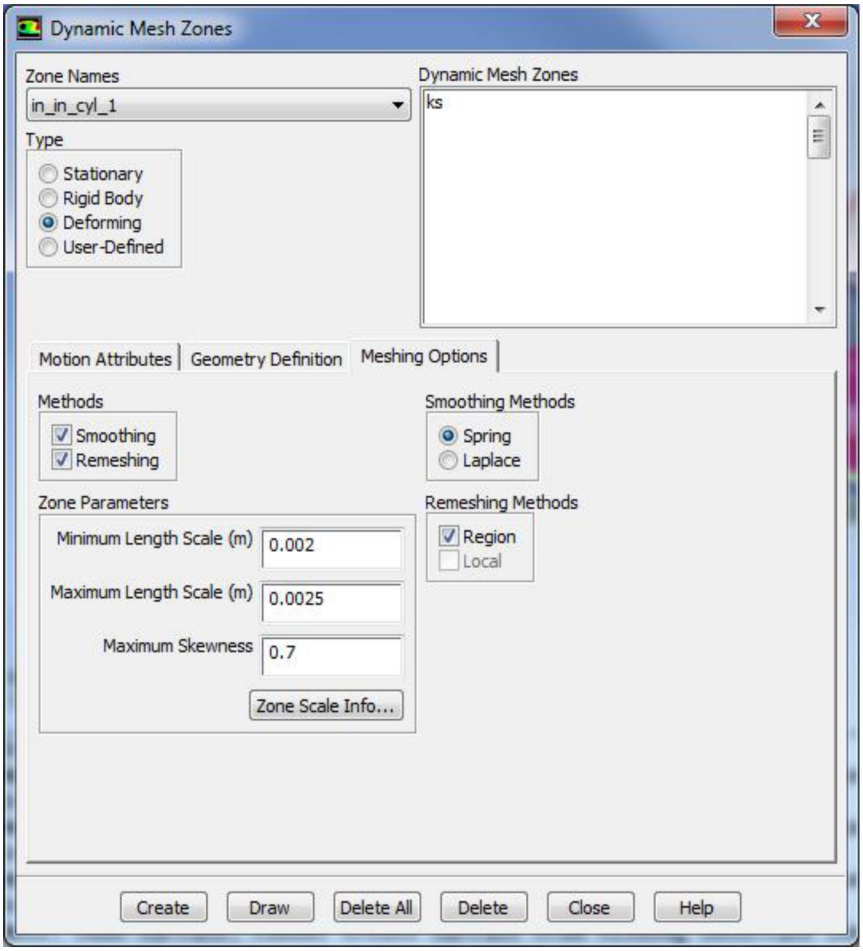


Рисунок 69 – Меню задания параметров зоны сетки *in_in_cyl_1* (*Meshing Options*)

в) Задание параметров области сетки *out_in_cyl_1* (рисунок 70).

Выбирается зона *out_in_cyl_1* в выпадающем списке *Zone Names*. В списке типов зон сетки *Type* выбирается *Deforming*. В разделе *Geometry Definition* выполняются следующие настройки:

- Выбирается *cylinder* в выпадающем списке *Definition*.
- Устанавливается значение радиуса тарелки выпускного клапана 0,01445 *м* в строке *Cylinder Radius*.
- Устанавливаются значения для *Cylinder Origin*: *X(m)*=0,080655, *Y(m)*=0,037672, *Z(m)*=-0,017033, – координаты точки на оси клапана.

- Устанавливаются значения для *Cylinder Axis*: *X=0* и *Y= sinα=0,90482* и *Z= cosα=-0,4258*, где *α* – угол между осью клапана и осью абсцисс.
- На следующем этапе следует провести настройку параметров в разделе *Meshing Options*.

В разделе *Meshing Options* задаются следующие параметры:

- Выбираются схемы перестроения расчетной сетки *Smoothing* и *Remeshing* в списке *Methods*.
- В опции настройки схемы движения расчетной сетки *Smoothing (Smoothing Methods*) устанавливается *Spring*.
- В опции настройки схемы движения расчетной сетки *Remeshing (Remeshing Methods*) Устанавливается *Region*.
- В разделе *Zone Parameters* вводятся следующие значения: *Minimum Length Scale* – 0,002, *Maximum Length Scale* – 0,0025, *Maximum Cell Skewness* – 0,7.

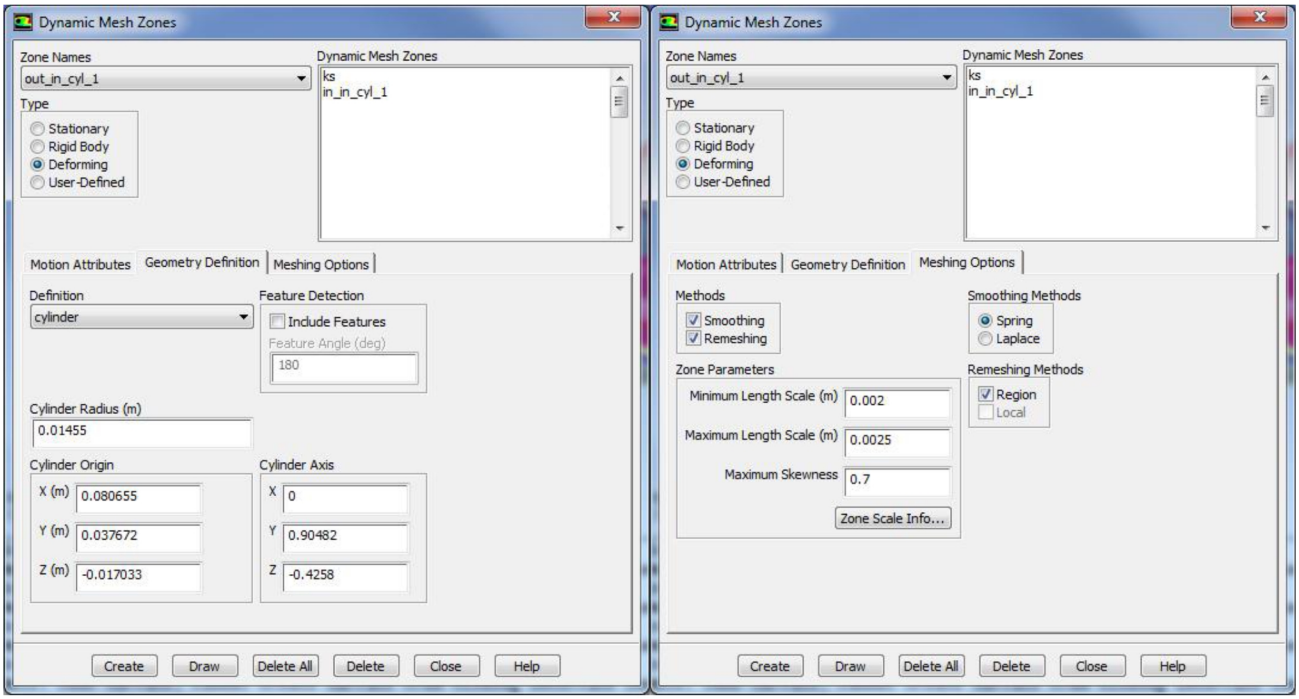


Рисунок 70 – Меню задания параметров зоны сетки *out_in_cyl_1* (*Geometry Definition* и *Meshing Options*)

г) Задание параметров зон подвижной сетки в области твердых тел *Rigid Body*.

Движение поршня задается следующим образом (рисунок 71):

- Выбирается зона *piston* в выпадающем списке *Zone Names*.
- В списке типов зон сетки *Type* выбирается *Rigid Body*.
- Во вкладке *Motion Attributes* в выпадающем списке *Motion UDF/Profile* выбирается ***piston-full***. вводятся следующие значения в разделе *Valve/Piston Axis X=0, Y=1* и *Z=0*.
- В опции *Meshing Options* вводится значение 0,001 *м* в разделе *Cell Height*.

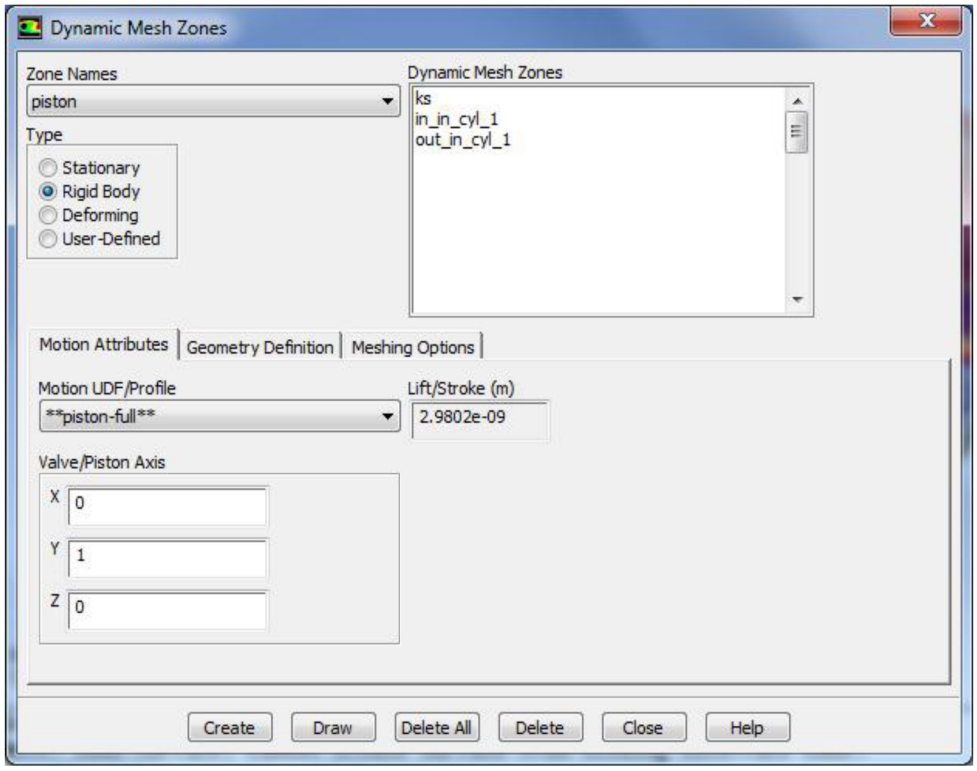


Рисунок 71 – Меню задания параметров зоны сетки *piston*

Аналогичным образом создаются остальные зоны с типом *Rigid Body* по параметрам, приведенным в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры зон с типом *Rigid Body*

Zone Names	**Type**	**Motion Attributes**			**Meshing options (m)**
		Motion UDF/Profile	**Valve/Piston Axis**		
			Y	**Z**	
in_dno_1	*Rigid Body*	*in-valve*	*0,89981*	*0,43627*	*0,0003*
in_dno_2	*Rigid Body*	*in-valve*	*0,89981*	*0,43627*	*0,0003*
in_faska_1	*Rigid Body*	*in-valve*	*0,89981*	*0,43627*	*0,001*
in_faska_1:096	*Rigid Body*	*in-valve*	*0,89981*	*0,43627*	*0,001*
in_faska_2	*Rigid Body*	*in-valve*	*0,89981*	*0,43627*	*0,001*
in_faska_2:094	*Rigid Body*	*in-valve*	*0,89981*	*0,43627*	*0,001*
in_in_cyl_gran_1	*Rigid Body*	*in-valve*	*0,89981*	*0,43627*	*0,001*
in_in_cyl_gran_2	*Rigid Body*	*in-valve*	*0,89981*	*0,43627*	*0,001*
out_dno_1	*Rigid Body*	*ex-valve*	*0,90482*	*-0,4258*	*0,0003*
out_dno_2	*Rigid Body*	*ex-valve*	*0,90482*	*-0,4258*	*0,0003*
out_faska_1	*Rigid Body*	*ex-valve*	*0,90482*	*-0,4258*	*0,0005*
out_faska_2	*Rigid Body*	*ex-valve*	*0,90482*	*-0,4258*	*0,0005*
out_in_cyl_gran_1	*Rigid Body*	*ex-valve*	*0,90482*	*-0,4258*	*0,0005*
out_in_cyl_gran_2	*Rigid Body*	*ex-valve*	*0,90482*	*-0,4258*	*0,0005*
out_in_kan2_1	*Rigid Body*	*ex-valve*	*0,90482*	*-0,4258*	*0,0005*
out_in_kan2_2	*Rigid Body*	*ex-valve*	*0,90482*	*-0,4258*	*0,0005*
piston_gran	*Rigid Body*	***Piston-limit***	*0*	*1*	*0,001*

Z=cosα и Y=sinα, где α – угол между осью клапана и осью абсцисс.

д) Для настройки параметров в неподвижных областях сетки выполняются следующие действия:

Для настройки параметров сетки в области *in_verh_cyl_1:*

- Выбирается зона *in_verh_cyl_1* в выпадающем списке *Zone Names*.

- В списке типов зон сетки (*Type)* выбирается тип *Stationary* в списке *Type*.
- В разделе *Meshing Options* вводится значения 0,001 *м* в строке *Cell Height*.

Аналогично выполняется настройка в других не подвижных областях: *in_verh_cyl_2, in_verh_kolc1_1, in_verh_kolc1_2, out_verh_cyl_1, out_verh_cyl_2, out_verh_kolc1_1, out_verh_kolc1_2, wall.*

е) Меню *Dynamic Mesh Events* (*Define → Dynamic Mesh → Events...*) позволяет установить время, в которое будут происходить то или иное динамическое событие, имеющее место в цилиндре ДВС, такое как открытие и закрытие клапана.

Для настройки динамических событий выполняются следующие действия:

- Вводится количество событий *Number of Events* равное 8 (рисунок 72), имеющих место за четыре такта работы моделируемого ДВС.
- В первой строке списка названий событий (*Name)* вводится – *out_open*.
- Затем отмечается галочкой поле *On* напротив события *out_open*.
- В разделе *At Crank Angle* вводится для *out_open* значение равное 117 (градус поворота коленчатого вала ДВС).
- После этого нажимается клавиша *Define* для открытия окна *Define Event* (рисунок 73).

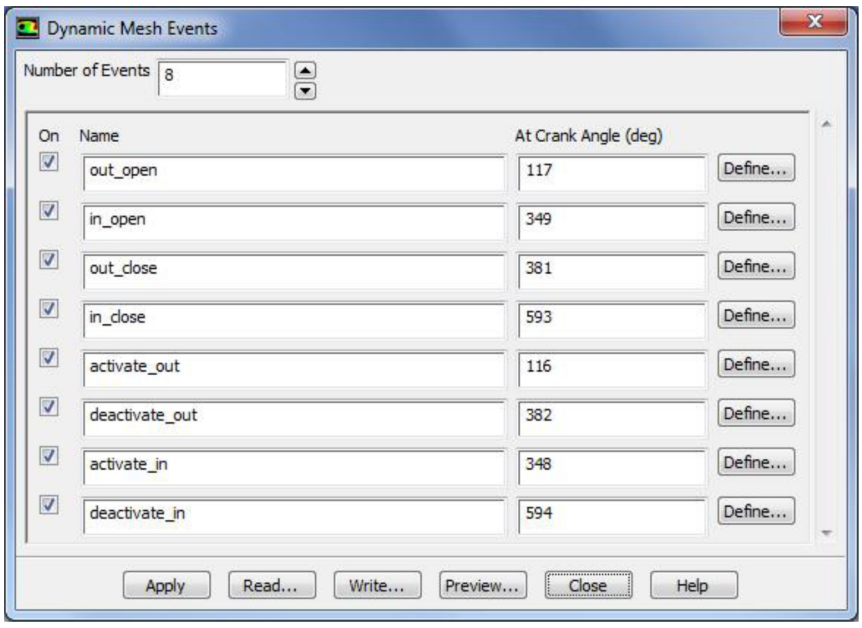


Рисунок 72 – Меню задания динамических событий (*Events*)

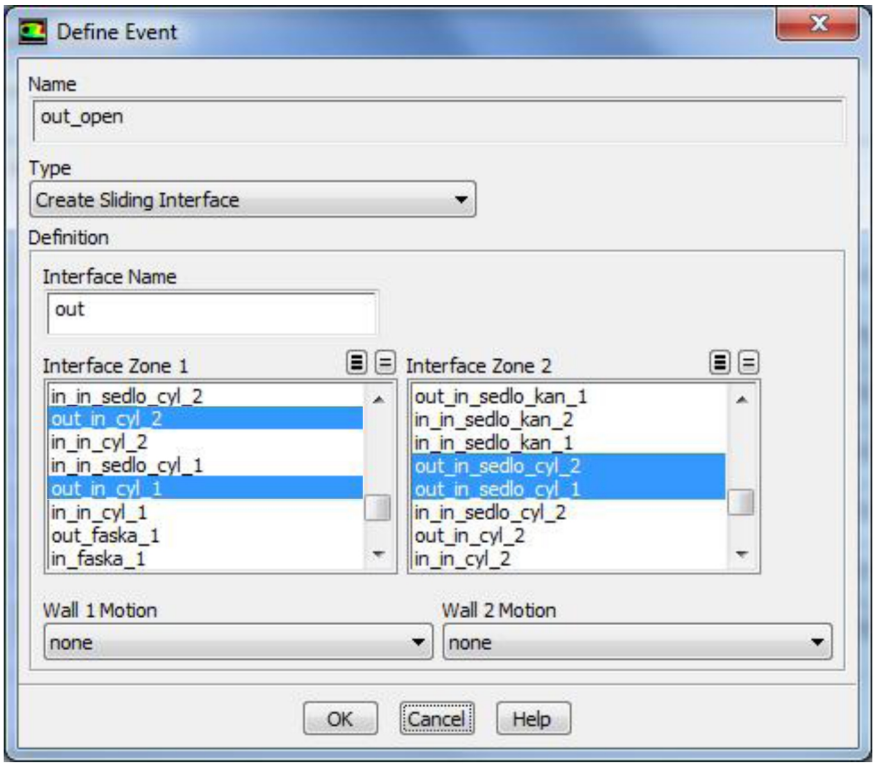


Рисунок 73 – Меню определения событий (*Define Event*)

В данном окне производятся следующие действия:

- Выбирается опция *Create Sliding Interface* в выплывающем списке *Type*.

- Вводится имя *out* в строке указания имени пересечений зон сеток *Interface Name* в разделе *Definition*.
- Выбираются зоны *out_in_cyl_1* и *out_in_cyl_2* в *Interface Zone 1*.
- Выбираются зоны *out_in_sedlo_cyl_1*и *out_in_sedlo_cyl_2* в *Interface Zone 2*.
- Настройки, заданные по умолчанию в строках *Wall 1 Motion* и *Wall 2 Motion* оставляются неизменными.

Подобным образом задаются остальные динамические события *Dynamic Events* приведенные в таблице 6.

Таблица 6 – Динамические события *Dynamic Events*

Название	**Угол поворота КВ**	**Описание процесса установки**
in_open	*349°*	• Выбирается тип *Create Sliding Interface* в выплывающем списке *Type*. • Водится *in* в строке *Interface Name* в разделе *Definition*. • Выбираются зоны *in_in_cyl_1* и *in_in_cyl_2* в *Interface Zone 1*. • Выбираются зоны *in_in_sedlo_cyl_1* и *in_in_sedlo_cyl_2* в *Interface Zone 2*. • После этого нажимается кнопка *OK*.
out_close	*381°*	• Выбирается тип *Delete Sliding Interface* в выплывающем списке*Type*. • Вводится *out* в строке *Interface Name* в разделе *Definition*. • После этого нажимается кнопка *OK*.
in_close	*593°*	• Выбирается тип *Delete Sliding Interface* в выплывающем списке*Type* • Вводится имя *in* в строке *Interface Name* в разделе *Definition*. • После этого нажимается кнопка *OK*.
activate_out	*116°*	• Выбирается тип *Activate Cell Zone* в выплывающем списке*Type*. • Выбираются зоны *vip_cyl_1, vip_cyl_2, vip_kan_1, vip_kan_2, vip_sedlo_1, vip_sedlo_2, vipysk* в строке *Interface Name* в разделе *Definition*. • После этого нажимается кнопка *OK*.

Продолжение таблицы 6

Название	**Угол поворота КВ**	**Описание процесса установки**
deactivate_out	*382°*	• Выбирается тип *Deactivate Cell Zone* в выплывающем списке*Type*. • Выбираются зоны *vip_cyl_1, vip_cyl_2, vip_kan_1, vip_kan_2, vip_sedlo_1, vip_sedlo_2, vipysk* в строке *Interface Name* в разделе *Definition*. • После этого нажимается кнопка *OK*.
activate_in	*348°*	• Выбирается тип *Activate Cell Zone* в выплывающем списке *Type*. • Выбираются зоны *vp_cyl_1, vp_cyl_2, vp_kan_1, vp_kan_2, vp_sedlo_1, vp_sedlo_2, vpysk* в строке *Interface Name* в разделе *Definition*. • После этого нажимается кнопка *OK*.
deactivate_in	*594°*	• Выбирается *Deactivate Cell Zone* в выплывающем списке *Type*. • Выбираются зоны *vp_cyl_1, vp_cyl_2, vp_kan_1, vp_kan_2, vp_sedlo_1, vp_sedlo_2, vpysk* в строке *Interface Name* в разделе *Definition*. • После этого нажимается кнопка *OK*.

Для сохранения произведенной настройки нажимается кнопка *Apply*.

2.7 Настройка параметров процесса впрыска

Настройка параметров и характеристик процесса впрыска топлива выполняются следующим образом: *Define → Injections...*

В окне *Injections* выбирается команда создать *(Create)*. При этом открылось окно свойств процесса впрыска топлива *Set Injection Properties* (рисунок 74).

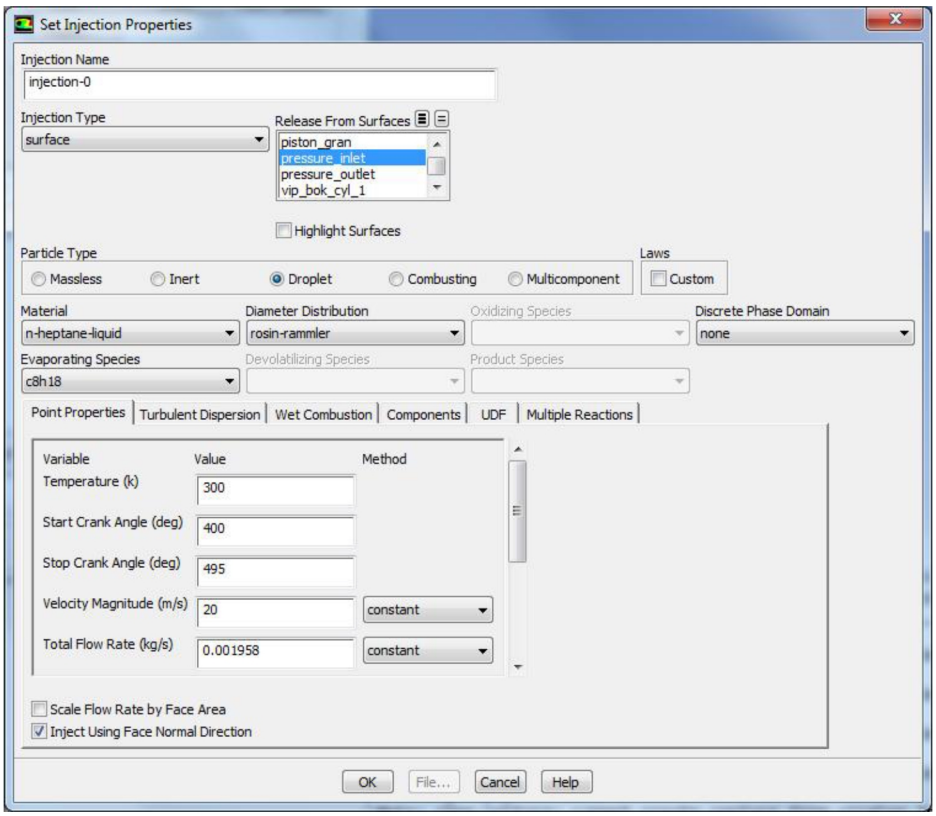


Рисунок 74 – Меню свойств впрыска топлива

(*Set Injection Properties*)

В нем выполняется следующая последовательность действий:

- В строке типа впрыска топлива *Injection Type* выбирается *surface.*
- В строке *Release From Surfaces* выбирается зона *pressure_inlet.*
- В списке *Particle Type* выбирается капельный распыл *Droplet.*
- В строке *Material* выбирается *n-octane-liquid.*
- В строке распределения диаметров капель *Diameter Distribution* выбирается *rosin-rammler.*
- Во вкладке *Point Properties* необходимо установить параметры, приведенные в таблице 7.

Таблица 7 – Параметры *Point Properties*

Variable	**Value**
Temperature (k)	300
Start Crank Angle (deg)	400

Продолжение таблицы 7

Variable	Value
Stop Crank Angle (deg)	495
Velocity Magnitude (m/s)	20
Total Flow Rate (kg/s)	0.001958
Min. Diameter (m)	2e-5
Max. Diameter (m)	5e-5
Mean Diameter (m)	4e-5
Spread Parameter	4.5
Number of Diameters	10

Temperature (K) – температура топлива, *Start Crank Angle* (deg) и *Stop Crank Angle* (deg) – углы начала и конца процесса впрыска топлива, *Velocity Magnitude* (м/с) – скорость струи топлива, *Total Flow Rate* (кг/с) – массовый расход топлива, *Min. Diameter(m)*, *Max. Diameter(м)* и *Mean Diameter(м)* – соотвественно максимальный и минимальный диаметры капель, *Spread Parameter* – параметр распределения капель, *Number of Diameters* – количество диаметров капель.

- Затем во вкладке турбулентной дисперсии *Turbulent Dispersion* включается опция *Discrete Random Walk Model*.

2.8 Предварительный просмотр движения сетки

Предварительный просмотр движения сетки необходим для проверки правильности задания параметров движения. Для просмотра сетка отображается на экране с помощью команды: *Display → Mesh...*

Перед настройкой модель необходимо сохранить путем записи файла с расширением **.cas*.

Для настройки параметров предварительного просмотра сетки (рисунок 75) выполняются следующие действия:

Define → Dynamic Mesh → Preview Mesh Motion...

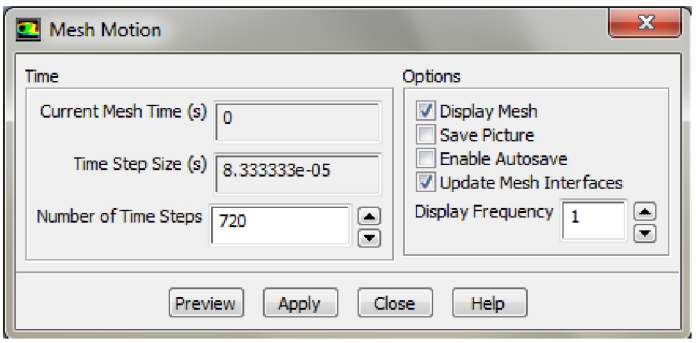


Рисунок 76 – Меню предварительного просмотра движения сетки (*Mesh Motion*)

В строке *Number of Time Steps* вводится число шагов - 720. Данное значение обеспечит два полных поворота коленчатого вала. После этого выполняется предварительный просмотр движения сетки нажатием кнопки *Preview*.

После безошибочного движения сетки равного двум поворотам коленчатого вала выполняется загрузка сохраненной модели.

2.9 Настройка начальных параметров модели

Далее устанавливаются параметры начальных условий для области потока с помощью процесса инициализации процесса решения (рисунок 77):

Solve → Initialization...

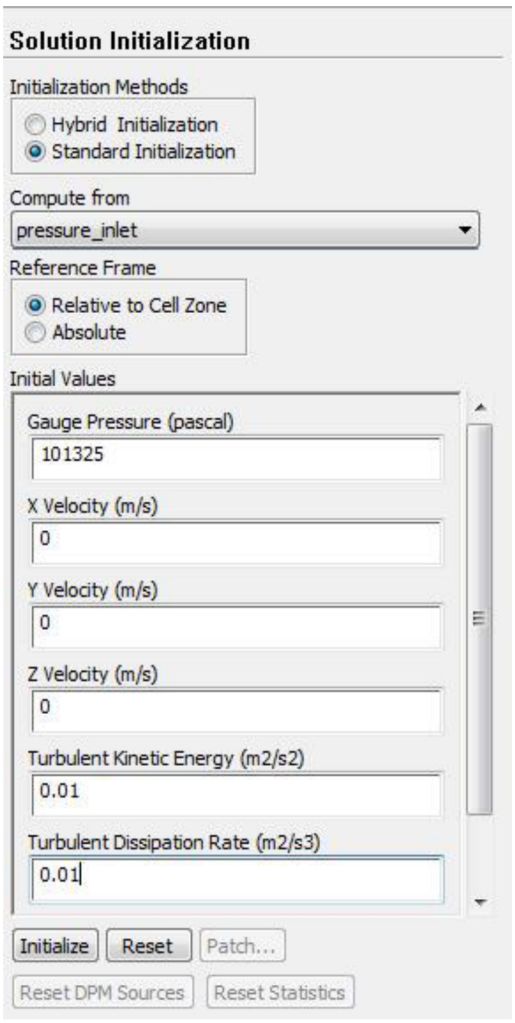


Рисунок 77 – Меню инициализации решателя

При этом выполняются следующие действия:

а) В строке *Compute from* выбирается зона *pressure_inlet*.

б) В строке *X Velocity* вводится значение 0.

в) В строке *Y Velocity* вводится значение 0.

г) В строке *Z Velocity* вводится значение 0.

д) В строке *Turbulent Kinetic Energy* вводится значение 0,01.

е) В строке *Turbulent Dissipation Rate* вводится значение 0,01.

ж) В строке *c8h18* вводится значение 0.

и) В строке O_2 вводится значение 0,21.

к) Затем нажимается клавиша *Initialize*.

2.10 Запуск решения задачи

Для запуска решения задачи выбирается следующая команда:

Solve → Run Calculation...

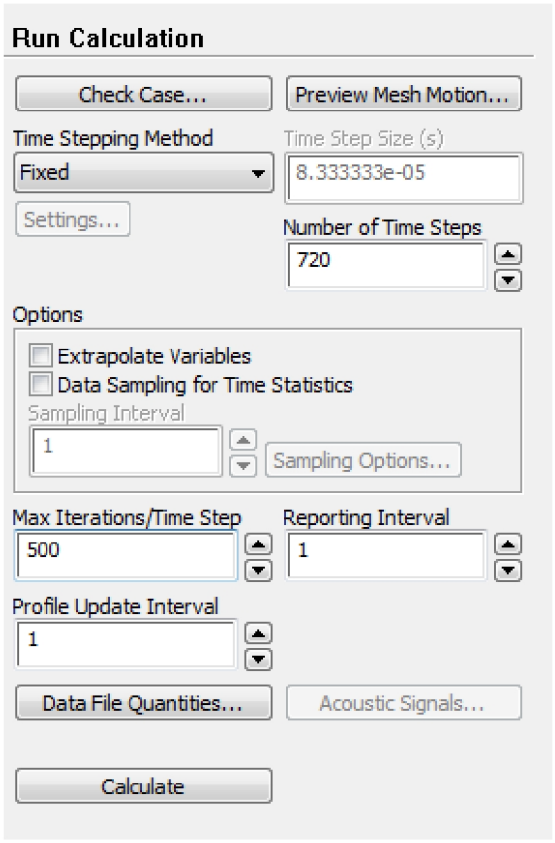


Рисунок 78 – Меню запуска процесса решения (*Run Calculation*)

В меню *Run Calculation* представленном на рисунке 78 выполняются следующие действия:

- В строке *Number of Time Steps* выбирается количество шагов расчета, равное 720.
- В строку *Max Iterations per Time Step* вводится максимальное количество итераций на один шаг расчета равное 500.
- После этого нажатием клавиши *Calculate* будет запущен расчет процессов внутри камеры сгорания ДВС.

2.11 Анализ результатов решения

После газодинамического расчета модели в решателе *ANSYS Fluent* можно получить поля распределения давления, температуры и скоростей в

объеме модели от угла поворота коленчатого вала. Результаты представлены на рисунке 79 – 83.

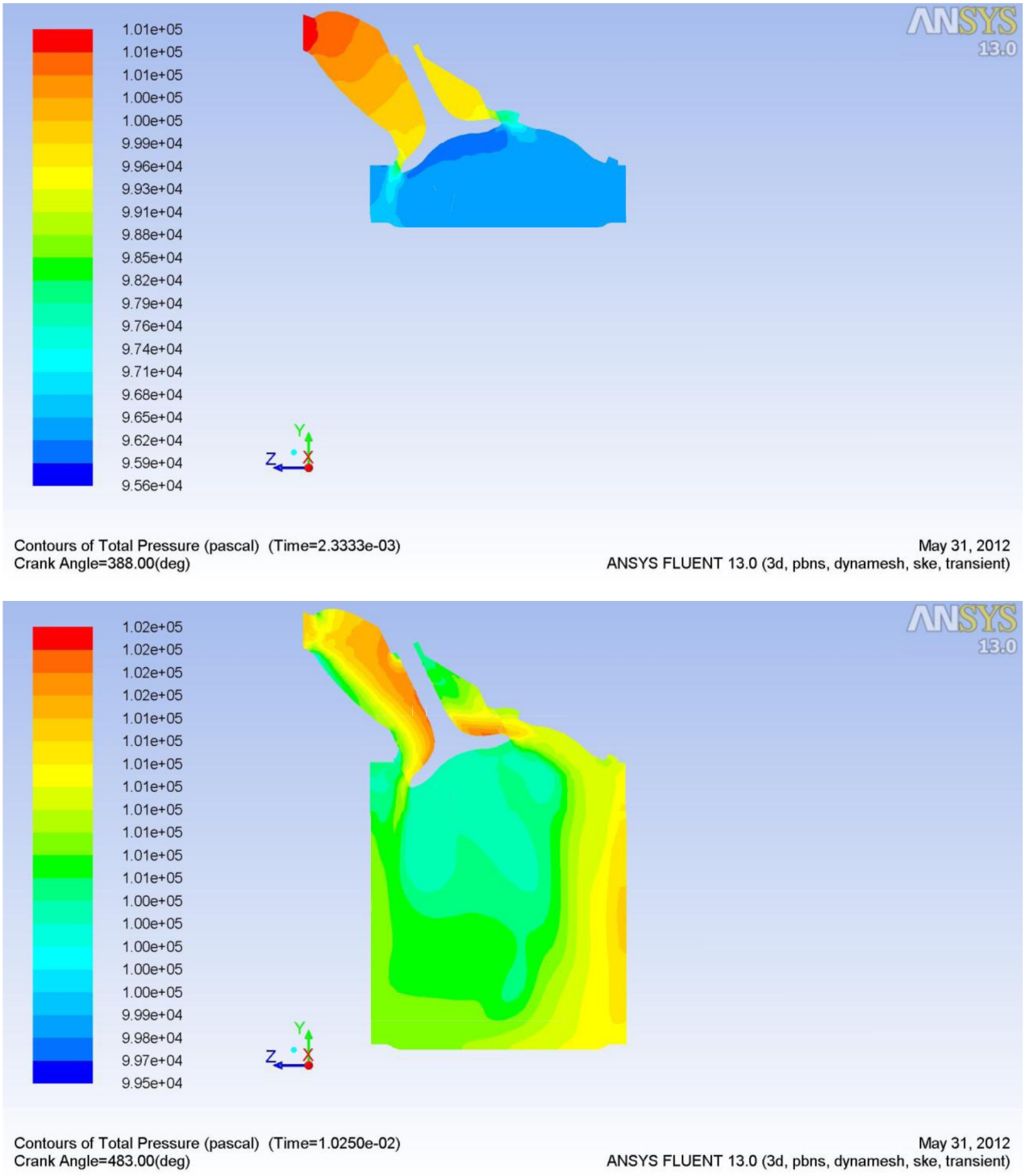


Рисунок 79 – Поля распределения полного давления в такте впуска

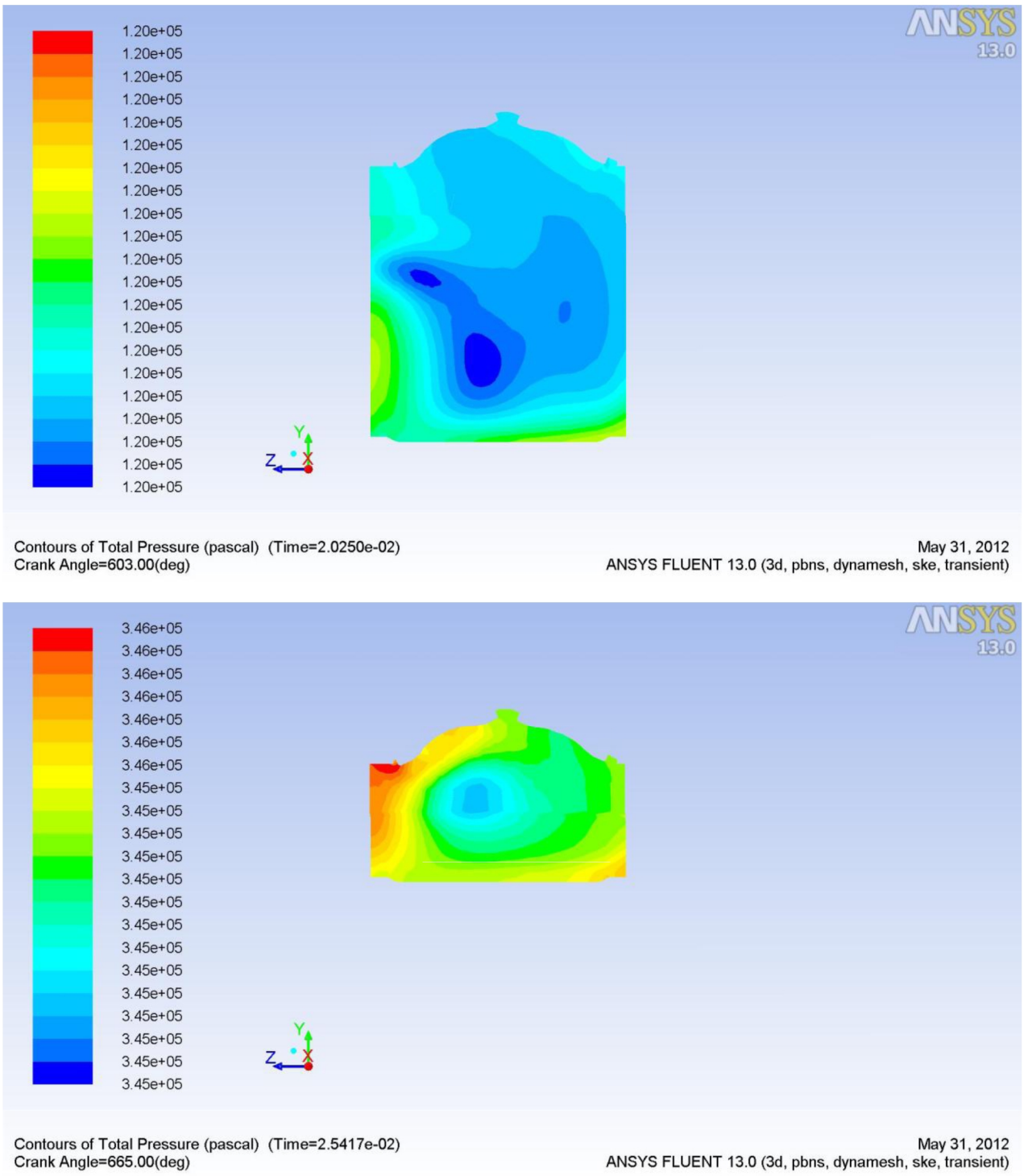
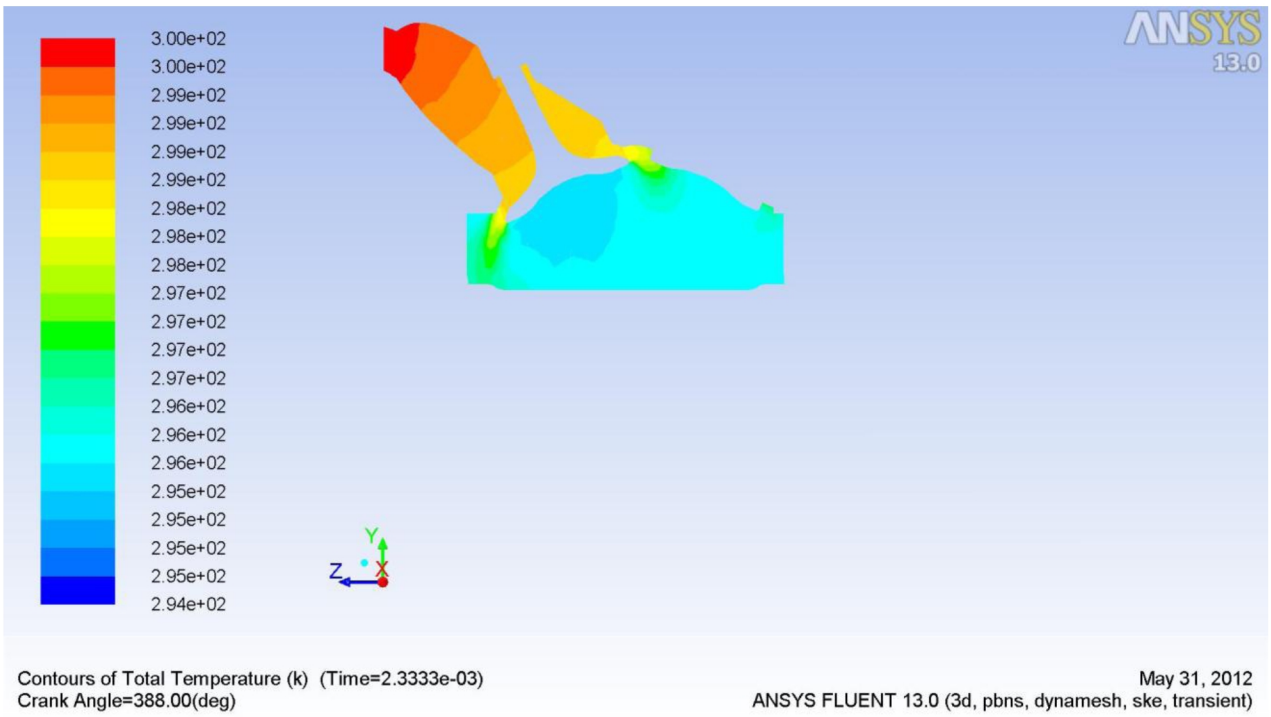


Рисунок 80 – Поля распределения полного давления в такте сжатия



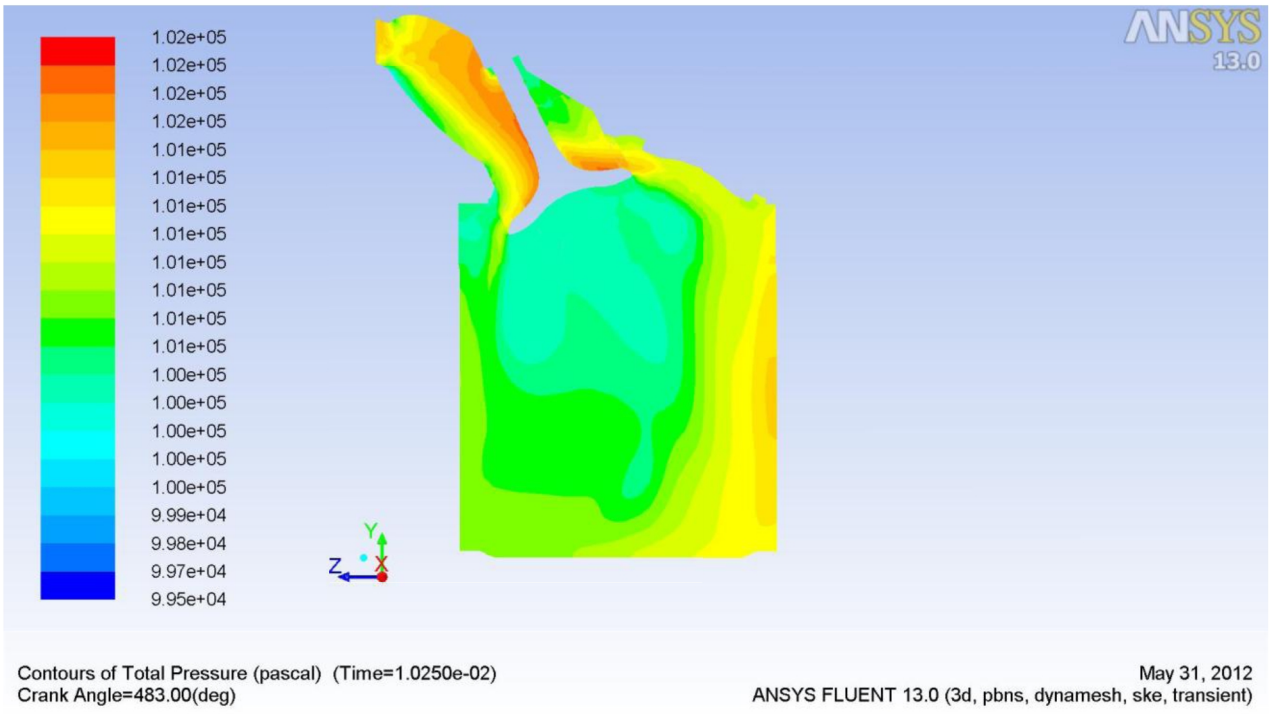


Рисунок 81 – Поля распределения температуры в такте впуска

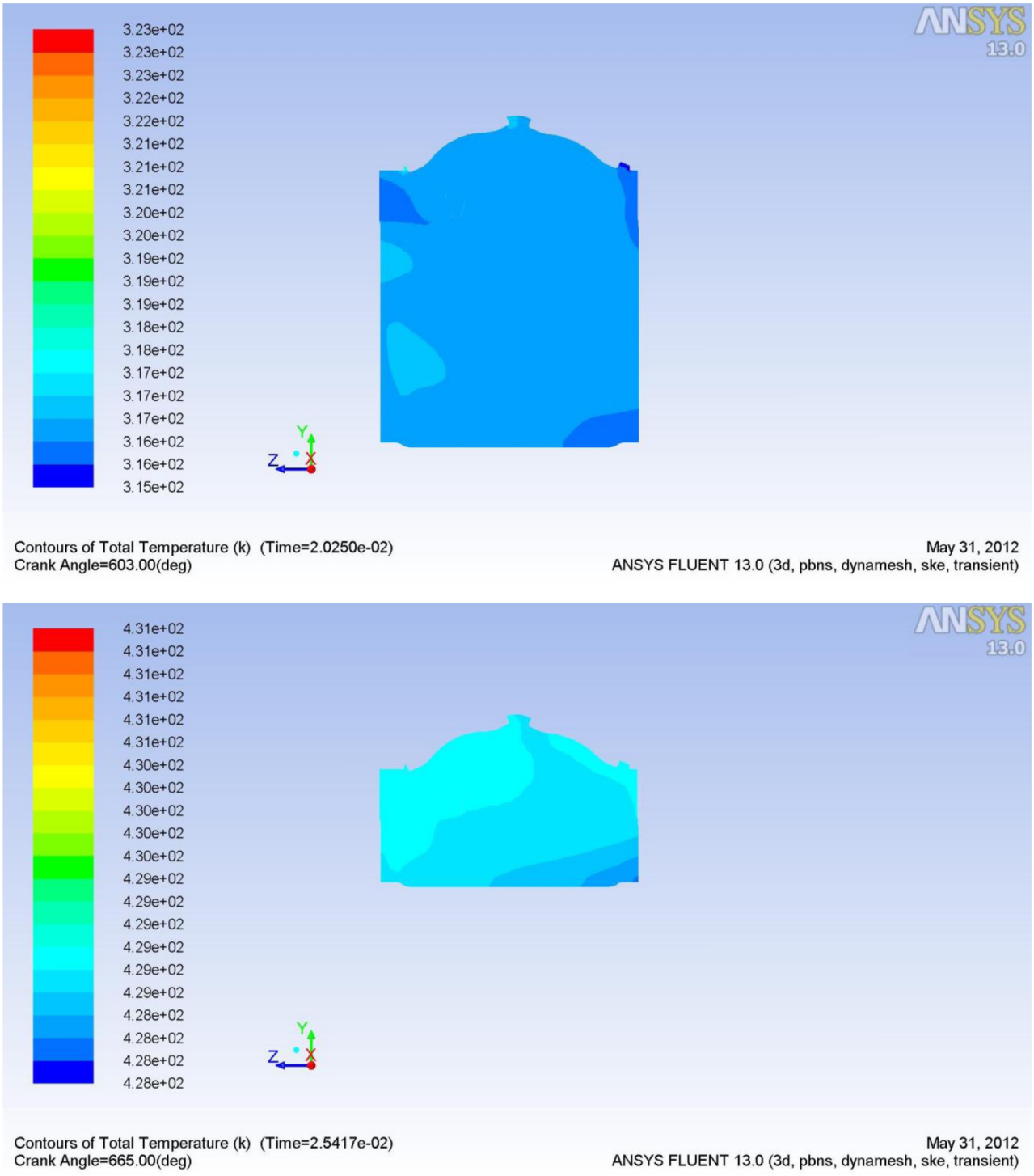
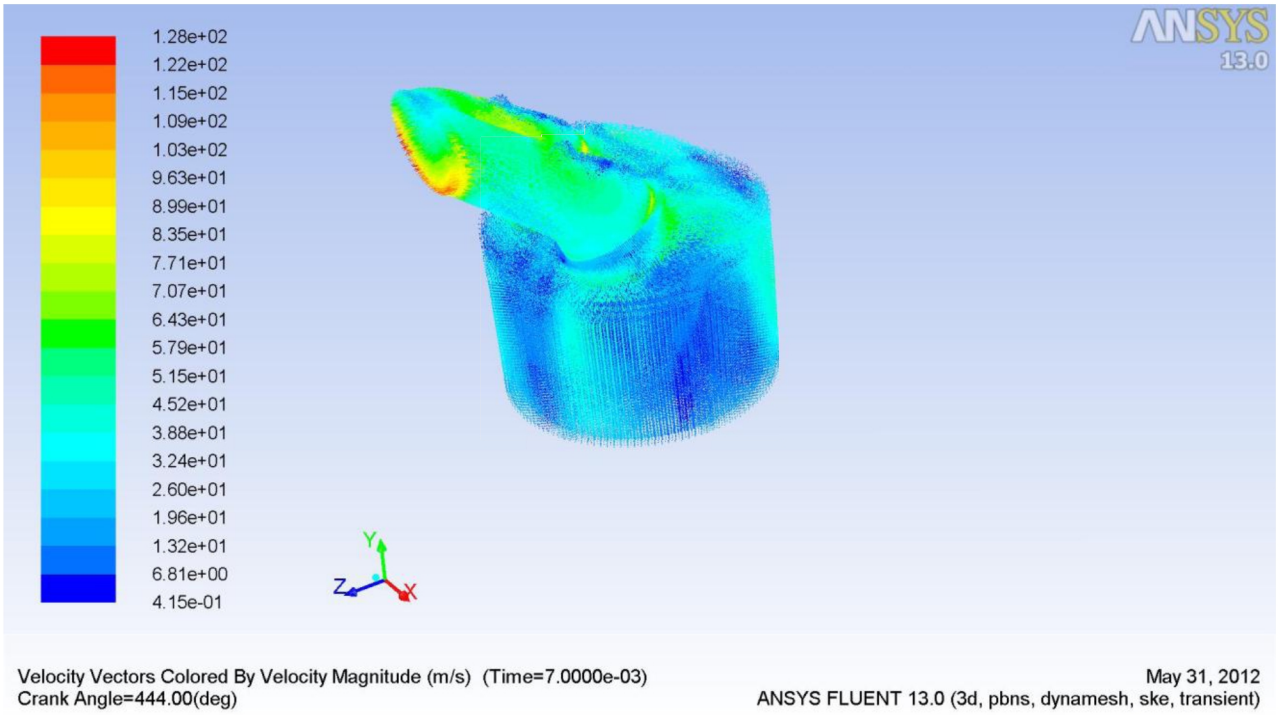


Рисунок 82 – Поля распределения температуры в такте сжатия



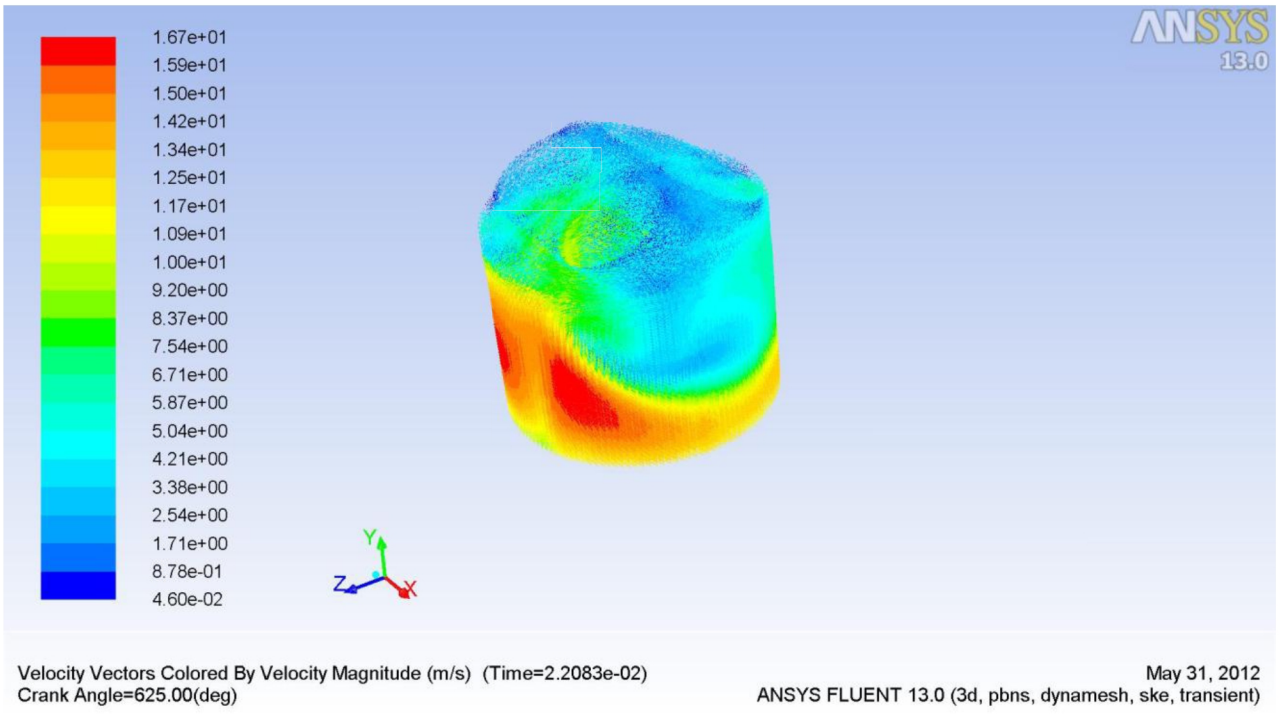


Рисунок 83 – Поля распределения векторов скоростей потока в тактах впуска и сжатия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Применение CAD/CAE – технологий для моделирования полей температур в цилиндре двигателя внутреннего сгорания позволяет снизить сроки проектирования ДВС за счет ускорения процесса расчета.
2. Высокая информативность результатов численного моделирования способствует более глубокому анализу рабочего процесса ДВС.
3. Моделирование газодинамической структуры потока при обоснованном выборе модели турбулентности позволяет с достаточной для практики точностью получить распределения основных термодинамических параметров внутри цилиндра двигателя.
4. Использование программы Fluent позволяет проводить моделирование процесса впрыска топлива с учетом не стационарности данного процесса и движения отдельных узлов цилиндропоршневой группы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Орлин А.С. Двигатели внутреннего сгорания. Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей. - М.: Машиностроение, 1990, с. 253

2. Колчин А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей./ Колчин А.И., Демидов В.П. - М.: Высшая школа, 2008. - 496 с.

3. Батурин О.В. Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса. Часть 2. Построение расчетных моделей в препроцессоре Gambite/ О.В. Батурин, И.И. Морозов, В.Н. Матвеев – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2008. - 125с.

4. 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.

Учебное издание

Бирюк Владимир Васильевич,
Горшкалев Алексей Александрович,
Каюков Сергей Сергеевич,
Угланов Дмитрий Александрович

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ВПРЫСКОМ

Учебное пособие

В авторской редакции

Подписано в печать 23.10.2012. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 5,5.
Тираж 25 экз. Заказ .

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.