

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

М. Ю. Орлов

**Системы автоматизированного проектирования
авиационных двигателей и энергетических установок**

Электронное учебное пособие

Самара 2011

УДК 621.43.056

Автор: **Орлов Михаил Юрьевич**

Рецензенты:

зав. кафедрой «Теоретические основы теплотехники и гидромеханики» СГТУ

Кудинов В.А.

научный руководитель НОЦ ГДИ СГАУ, д.т.н., профессор кафедры теории двигателей
СГАУ Матвеев В.Н.

Компьютерная верстка: Некрасова С.О.

Орлов, Михаил Юрьевич. Системы автоматизированного проектирования авиационных двигателей и энергетических установок. [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / М. Ю. Орлов; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. дан. (7,4 Мбайт). – Самара, 2011. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Приведена краткая концепция и методология построения виртуальной модели камеры сгорания и расчет течения газа средствами программного обеспечения ANSYS. Рассматриваются вопросы создания геометрической модели корпуса камеры сгорания, форсунки с завихрителем, жаровой трубы, сборки элементов камеры сгорания. Приводится расчет параметров течения газа в камере сгорания. Учебное пособие предназначено для подготовки специалистов по специальности 160301.65 «Авиационные двигатели и энергетические установки», специализирующихся по направлению «Менеджмент энергосберегающих технологий» (ГОС-2), изучающих дисциплину «Системы автоматизированного проектирования авиационных двигателей и энергетических установок» в 9 семестре, и для специалистов направления подготовки 160700.65 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», профиль «Менеджмент энергосберегающих технологий», изучающих дисциплину «Численные методы математического моделирования в энергетических установках» в 9 семестре, для магистров по направлению подготовки 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов», профиль «Менеджмент энергосберегающих технологий» (ФГОС-3), изучающих дисциплину «Численные методы математического моделирования» в 9 семестре.

Подготовлено на кафедре теплотехники и тепловых двигателей СГАУ.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2011.

Содержание

Общие сведения	4
1. Построение виртуальной модели камеры сгорания	5
Основные возможности ANSYS Workbench	5
Графический интерфейс ANSYS Workbench	6
Работа с проектом в ANSYS Workbench	8
Выполнение работы	10
1.1 Построение геометрической модели корпуса камеры сгорания	10
1.2 Построение геометрической модели форсунки с завихрителем	20
1.3 Создание геометрической модели жаровой трубы	29
1.4 Сборка элементов камеры сгорания	38
Содержание отчёта	46
Контрольные вопросы к зачёту по лабораторной работе	46
2. Расчет параметров течения газа в камере сгорания	47
Подготовка геометрических моделей камер сгорания ГТД к расчёту и его выполнение	47
Выполнение лабораторной работы	48
2.1 Создание конечно-элементной сетки расчётной области камеры сгорания	48
2.2 Задание граничных условий и настроек решателя	53
2.3 Выполнение расчёта	60
2.4 Представление результатов расчёта	61
Содержание отчёта	66
Контрольные вопросы к зачёту по лабораторной работе	67

Общие сведения

Данное учебное пособие представляет собой учебный комплекс, который позволяет студентам освоить основы современных методов создания сложных технических изделий.

В настоящем издании отражен опыт работ, полученный коллективом кафедры теплотехники и тепловых двигателей при разработке реальных камер сгорания ГТД

1. Построение виртуальной модели камеры сгорания

Лабораторная работа №1

Цель работы: изучение методики построения виртуальных моделей камер сгорания и приобретение навыков такой работы.

Задание:

- 1.Выполнить построение отдельных элементов камеры сгорания.
- 2.Создать единую модель камеры сгорания из элементов

Основные возможности ANSYS Workbench

Программная платформа **Workbench** предназначена для разработки и интеграции линейки программных продуктов ANSYS, позволяющих решать широкий спектр задач инженерного анализа. Под программной платформой Workbench работают следующие модули:

- DesignModeler - служит для работы с геометрическими моделями.
- DesignSimulation - расчетный модуль.
- DesignXplorer и DesignXplorer VT - модули параметрической оптимизации.
- FE Modeler - модуль для работы с КЭ моделями, полученными при импорте данных входного файла NASTRAN или данных КЭ расчетной модели модуля DesignSimulation.
- Advanced Meshing - функциональные возможности ICEM CFD и AI*Environment.
- CFX-Mesh - модуль, решающий задачу создания КЭ сетки для последующего гидрогазодинамического анализа в CFX.
- Advanced CFD- функциональные возможности CFX.

Центральным объектом при работе в ANSYS Workbench является *проект*, представляющий собой совокупность геометрических, физических и конечно-элементных моделей тел задачи, для которой находят результат численного решения. Проект может включать один или нескольких *блоков*, реализующих отдельные виды инженерного анализа и состоящих из *элементов* - структурных, отвечающих за определенный этап анализа. Существуют следующие этапы инженерного анализа:

- создание расчетной модели (препроцессинг). Здесь создается геометрическая модель, задаются материал и его свойства, генерируется конечно-элементная сетка, определяются физические условия моделирования. В результате этого этапа получают модель, подготовленную для численного решения;

- настройка решателя и решение. На этом этапе задаются настройки решателя, параметры, обеспечивающие сходимость итерационного процесса, и запускается решение задачи. Результатом этапа является численное решение;

- обработка результатов (постпроцессинг). В этом этапе на базе полученного численного решения задачи выполняется визуализация распределения искомых физических величин. Конечным результатом этапа являются графики, массивы значений и т.д.

Графический интерфейс ANSYS Workbench

Запуск ANSYS Workbench выполняется из основного меню *Пуск/Программы/ANSYS 12/Workbench*. После загрузки появляется основное окно программы, состоящее из нескольких окон, имена которых отображаются в заголовках (рис. 1).

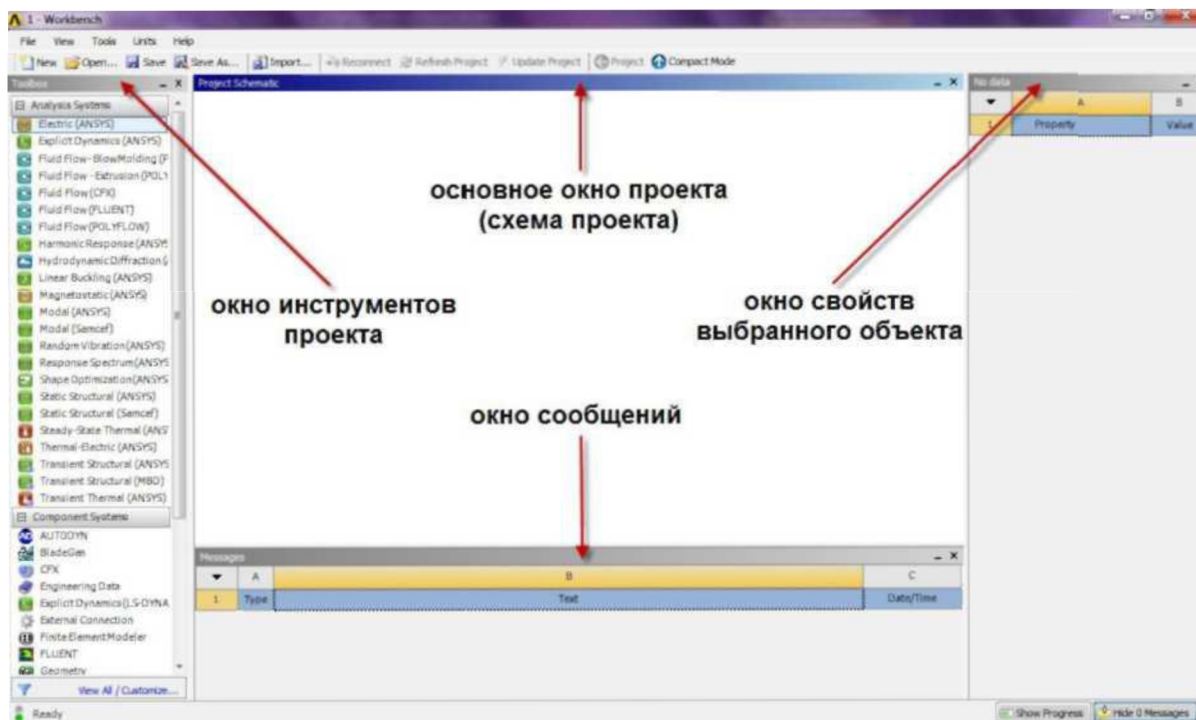


Рис. 1

Окно *Project Schematic* - главное окно проекта, расположенное в центре основного окна (рис. 2) и содержащее структурные компоненты проекта (блоки) и связи между ними.

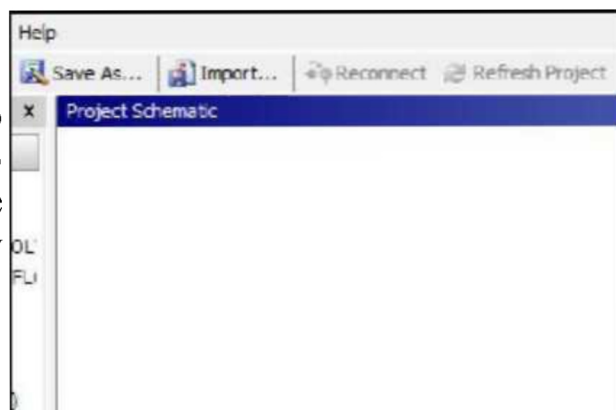


Рис. 2.

Окно *Toolbox* - окно инструментов проекта, находящееся слева от окна *Project Schematic*. Оно содержит разделы, в виде раскрывающихся списков (рис. 3). Первый из них: *Analysis Systems* - раздел, содержащий виды инженерных анализов, выполняемых в ANSYS.

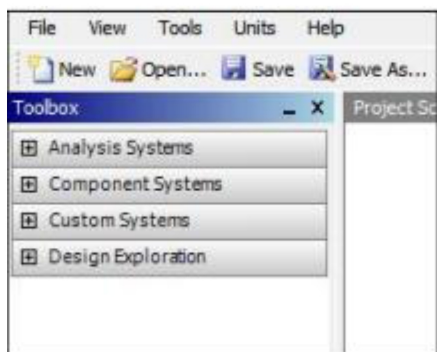


Рис. 3

Component Systems - раздел, содержащий отдельные компоненты инженерного анализа, такие как: геометрическая модель, конечно-элементная сетка и др.

Раздел *Custom Systems* содержит шаблоны связанных инженерных расчетов, когда результаты решения одной задачи служат исходными данными другой. Раздел *Design Exploration* включает инструменты оптимизации моделей по геометрическим или физическим параметрам и построения их корреляционных матриц.

Свойства выбранного в *Project Schematic* объекта отражаются в окне *Properties* в виде таблицы. В её первом столбце указан порядковый номер свойства или параметра, а во втором – его наименование, а в третьем – его значение или наличие активации.

В нижней части экрана расположено окно *Messages*, служащее для отображения служебных сообщений.

Места расположения окон внутри основного окна Workbench могут быть изменены за счет перетаскивания окна на новое место путём удержания нажатой левой клавиши мыши на заголовке окна. Восстановить принятые по умолчанию положения окон можно выбрав пункт *Reset Window Layout* в меню *View*.

В верхней части основного окна расположены кнопки стандартных операций с проектом (рис. 4): операций создания, открытия, сохранения и импортирования проекта из предыдущих версий Workbench или других CAD/CAE-систем.

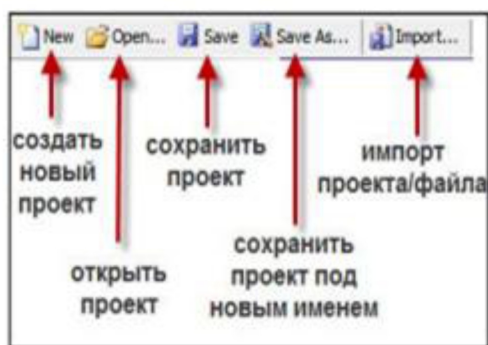


Рис.4

Кнопка *Refresh Project* позволяет обновлять входные данные проекта, а кнопка *Update Project* запускает на их основе его пересчет с целью получения новых результатов. Нажатием *Compact Mode* можно упростить вид основного окна Workbench до уровня, когда при наведении курсора на его заголовок отображается только содержимое проекта.

Основные настройки среды Workbench можно изменить в меню *Tools/Options*. Возврат к настройкам по умолчанию производится кнопкой *Restore Default*. В меню *Units* можно задать систему единиц измерения для расчетов в проекте (рис.5). Текущая система единиц отмечается галочкой

слева. Система измерений также может быть изменена непосредственно в геометрическом модуле.

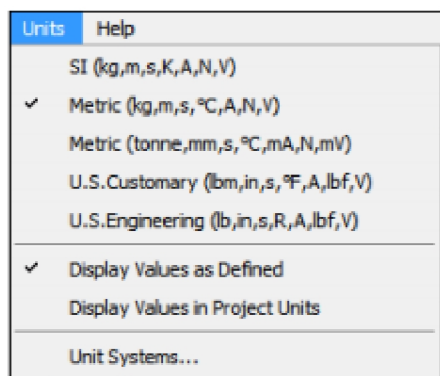


Рис.5

Обращение к справочной системе ANSYS Workbench можно выполнить через меню *Help*. Для получения контекстной справки необходимо нажать клавишу *F1*, а для детального поиска нужной информации нужно запустив справочную систему, перейти в окно поиска. Информация в справочной системе сгруппирована по разделам и представлена в виде иерархических списков.

Работа с проектом в ANSYS Workbench

ANSYS позволяет проводить инженерный анализ, указанных в окне инструментов *Toolbox* видов (рис.6), например таких, как:

- *Static Structural* - статический прочностной анализ;
- *Transient Structural* - нестационарный прочностной анализ;
- *Steady-State Thermal* - стационарный тепловой анализ;
- *Transient Thermal* - нестационарный тепловой анализ;
- *Modal* - модальный анализ;
- *Harmonic Response* - гармонический анализ;
- *Linear Buckling* - анализ устойчивости;
- *Explicit Dynamics* - твердотельный динамический анализ.

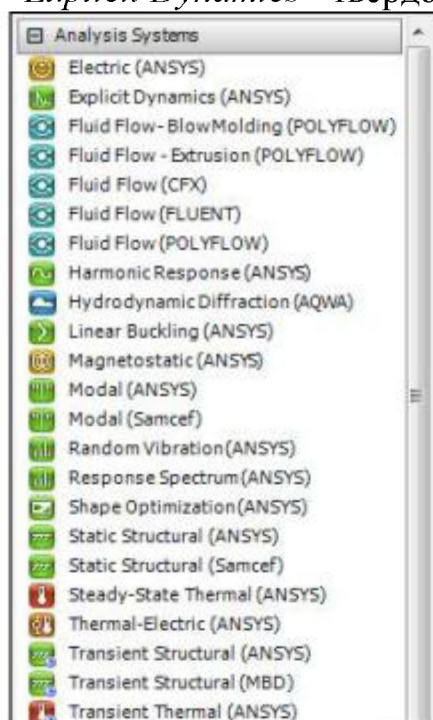


Рис.6

В Workbench пользователь выбирает вид инженерного анализа, после чего программа вставляет в схему проекта соответствующий блок, содержащий необходимые этапы. Проект также может содержать несколько блоков для разных типов инженерных расчетов, между которыми могут устанавливаться связи. Создать новый блок инженерного анализа можно двумя способами:

- 1) Кликнув и удерживая нажатой левую кнопку мыши перетащить его наименование из окна *Toolbox* в окно *Project Schematic*;
- 2) Двойным нажатием левой кнопки мыши на наименовании инженерного анализа в окне *Toolbox*.

Меню управления созданным блоком в

Project Schematic вызывается нажатием кнопки в левом верхнем углу блока, позволяя выполнить следующие действия: обновить (*Update*), сделать дубликат блока (*Duplicate*), изменить вид инженерного анализа в блоке (*Replace With*), удалить всю информацию блока (*Clear Generated Data*), удалить блок (*Delete*), переименовать блок (*Rename*), перейти к окну свойств блока (*Properties*).

Каждый элемент блока имеет аналогичное меню, которое вызывается нажатием правой кнопки мыши на элементе. В этих меню отражены операции, выполняемые с данным элементом (редактирование элемента (*Edit*), обновление (*Update*), передача данных из нового блока (*Transfer Data From New*) и другие).

Справа от наименования элемента блока инженерного анализа отображается его статус. Если блок только что вставлен, в нем задаются параметры по умолчанию и он помечается галочкой. По мере работы с проектом статус его элементов блока изменяется. Если для элемента блока не определены какие-либо свойства, то его статус обозначается знаком вопроса, а если для элемента требуется проведение расчетов, то знаком молнии. При необходимости обновления связи или свойства элемента, его статус отмечается знаком .

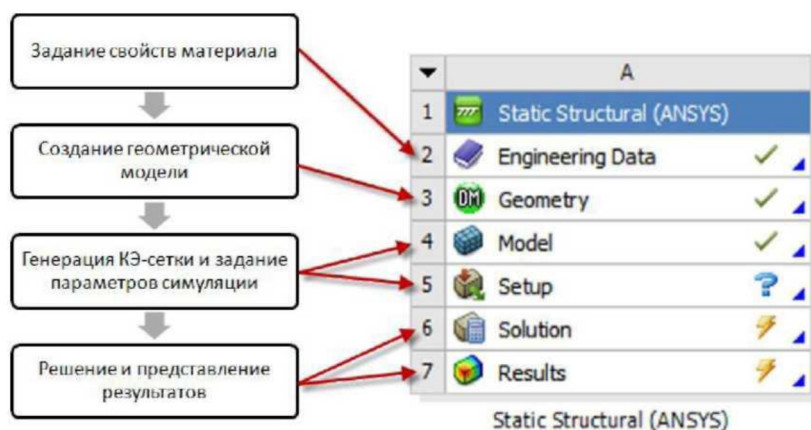


Рис.7

Основной файл в Workbench имеет расширение .wbpj и содержит ссылки на модельные файлы и связи между ними. Вместе с основным файлом на диске компьютера создается одноименная папка. Рабочие файлы проекта помещаются в папку dp0.

Модельные файлы проекта имеют следующие расширения:

- файлы геометрической модели (.agdb) и КЭ-сетки (.mechdb);
- файл КЭ-сетки (.mechdb);
- файл с решением задачи (file.rst);
- автоматически генерируемый Workbench командный файл ANSYS, (ds.dat);
- файл с сообщениями об ошибках (file.err);
- файл с выходной информацией решателя (solve.out).

Файлы с графиками и диаграммами, полученными по результатам численного решения, сохраняются в подкаталоге *user_files*.

Выполнение работы

Задание на лабораторную работу представляет выданный преподавателем упрощенный чертёж камеры сгорания (рис.8, табл.1). В учебной группе студентов производится деление этой камеры сгорания на основные функциональные элементы, такие как: корпус камеры сгорания, форсунка с завихрителем, жаровая труба, крепежные элементы. Создание их геометрических моделей поручается минигруппам студентов из двух-трёх человек. Эти минигруппы взаимодействуют друг с другом и координатором работ (роль которого может выполнять как преподаватель, так и староста группы). Такой подход позволяет обеспечить решение ряда дополнительных учебных задач: выработку взаимодействия обучающихся в целях решения поставленной проблемы, повышение уровня подготовки более слабых студентов за счёт их контакта с более подготовленными в рамках данной дисциплины и т.д. Каждый элемент строится отдельно, после чего все элементы объединяют в единую сборку. Студенты должны обладать умением построения всех элементов. В качестве учебного объекта построения геометрической модели удобно использовать трубчатую камеру сгорания, содержащую все характерные для камер сгорания элементы и при этом позволяющую вследствие простоты конструкции выполнять работу по их построению в течение лабораторных занятий. Совмещение элементов необходимо проводить по заранее приведенным размерам камеры сгорания.

При высоком уровне подготовки студентов и наличия у них опыта работы с сложными геометрическими моделями возможно построение трубчато-кольцевых и кольцевых камер сгорания. В этом случае данное пособие используется как базовая технология построения геометрической модели камеры сгорания на базе её основных элементов.

1.1 Построение геометрической модели корпуса камеры сгорания

Построение геометрической модели камеры сгорания целесообразно начинать с её корпуса, как правило, являющегося основой для сборки в единое целое остальных элементов.

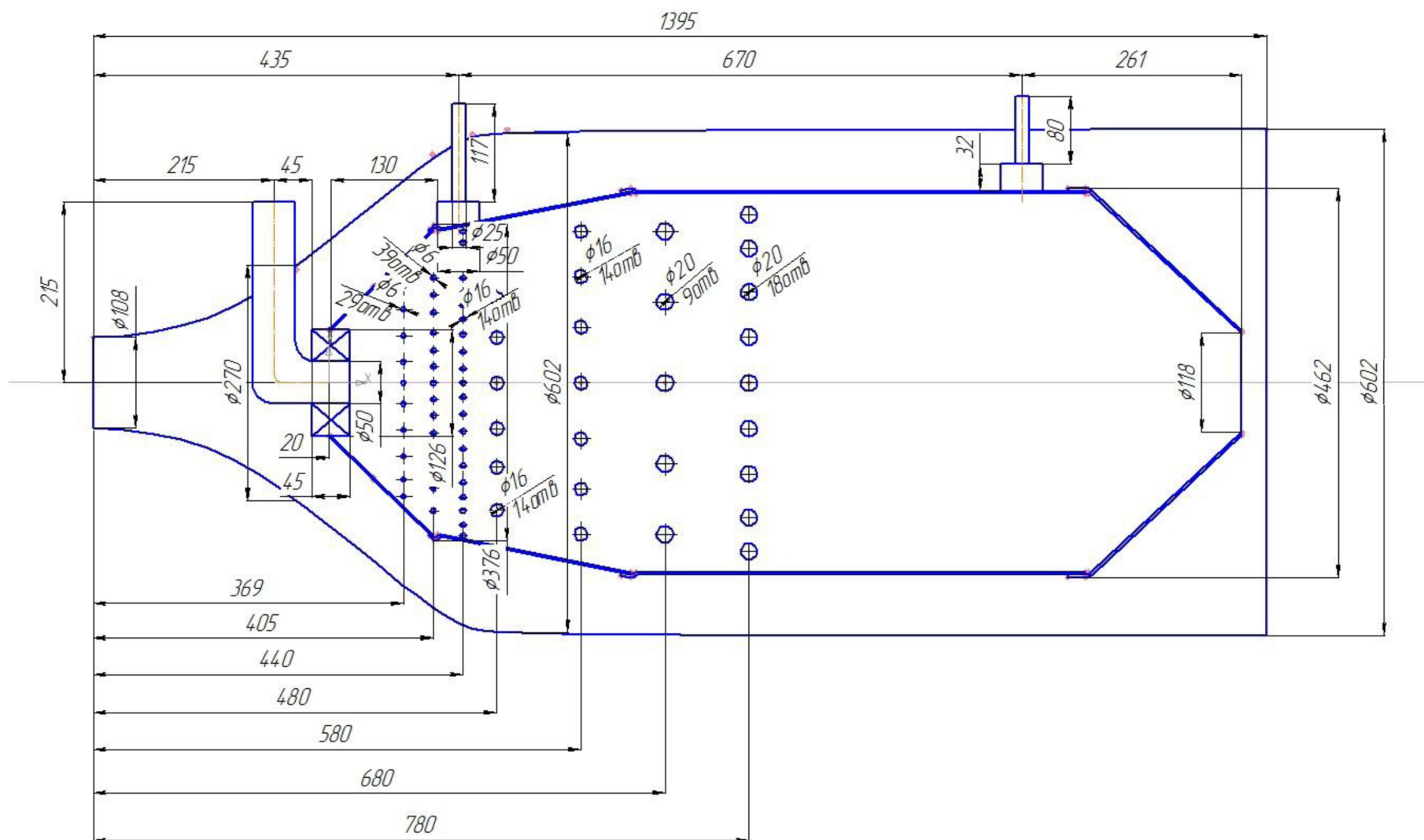
Для запуска программы Workbench заходим в меню Пуск
Пуск-> Ansys 12.1 - > Workbench

В меню выбираем:

Component system -> Geometry -> New Geometry

В данном модуле создаются 3-D модели, используемые для дальнейшего расчета.

Вначале задаемся единицами измерения, в нашем случае это миллиметры (мм)- рис.9.



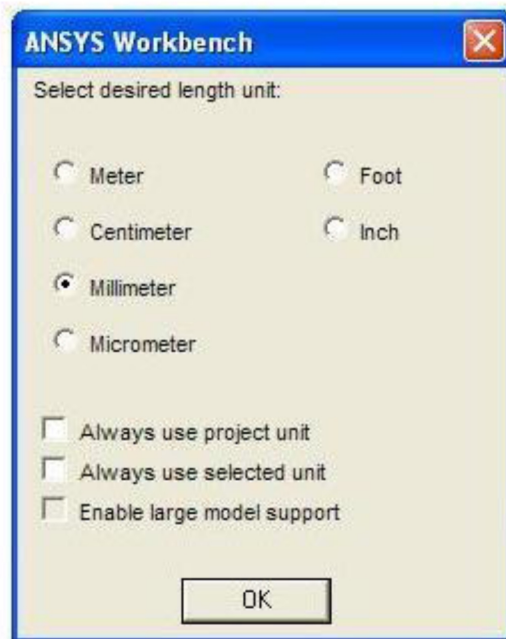


Рис.9

Заданную КС можно представить в виде фигуры вращения, поэтому при построении корпуса вначале необходимо построить профиль, который предстоит вращать. Построение профиля корпуса выполняем по характерным точкам, которые затем соединяем линиями.

Открываем меню Modeling и переходим к заданию координат точек (рис.10):

Sketching -> Draw ->Construction Point

Задаем координаты:

Dimensions - > Vertical -> Detail View

V1=54мм на оси Y

Аналогично создаётся вторая точка:

Sketching -> draw ->Construction Point

Dimensions - > Vertical -> Detail View

Y=57 мм

Dimensions -> Horizontal ->Detail View

X=126мм

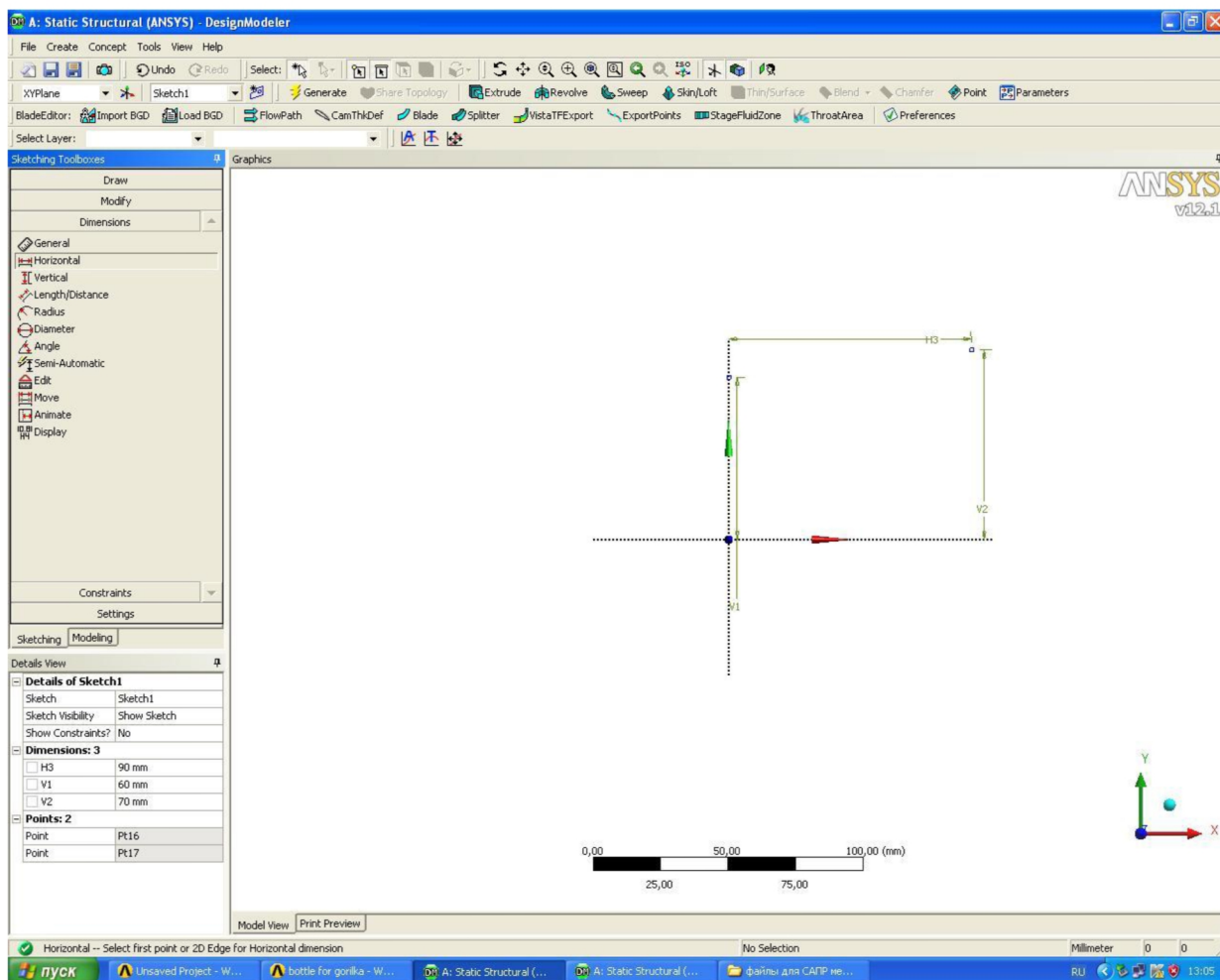


Рис.10

Аналогично строим остальные точки корпуса КС по следующим координатам табл.1:

Таблица 1

	1	2	3	4	5	6	7
X, мм	0	126	242	403	451	492	1395
Y, мм	54	57	135	271,5	295	301	301

Заканчиваем построение профиля корпуса камеры сгорания (рис.11). Соединяем точки 3, 4; 6 и 7 прямыми линиями, используем функцию создания прямой линии:

Sketching -> Draw -> Line

Соединяем точки 1,2,3,4,5 и 6 дугами, воспользовавшись функцией создания дуги по трем точкам:

Sketching -> Draw -> Arc by 3 Points

Создаем толщину корпуса 3 мм, копируя полученную ранее линию.

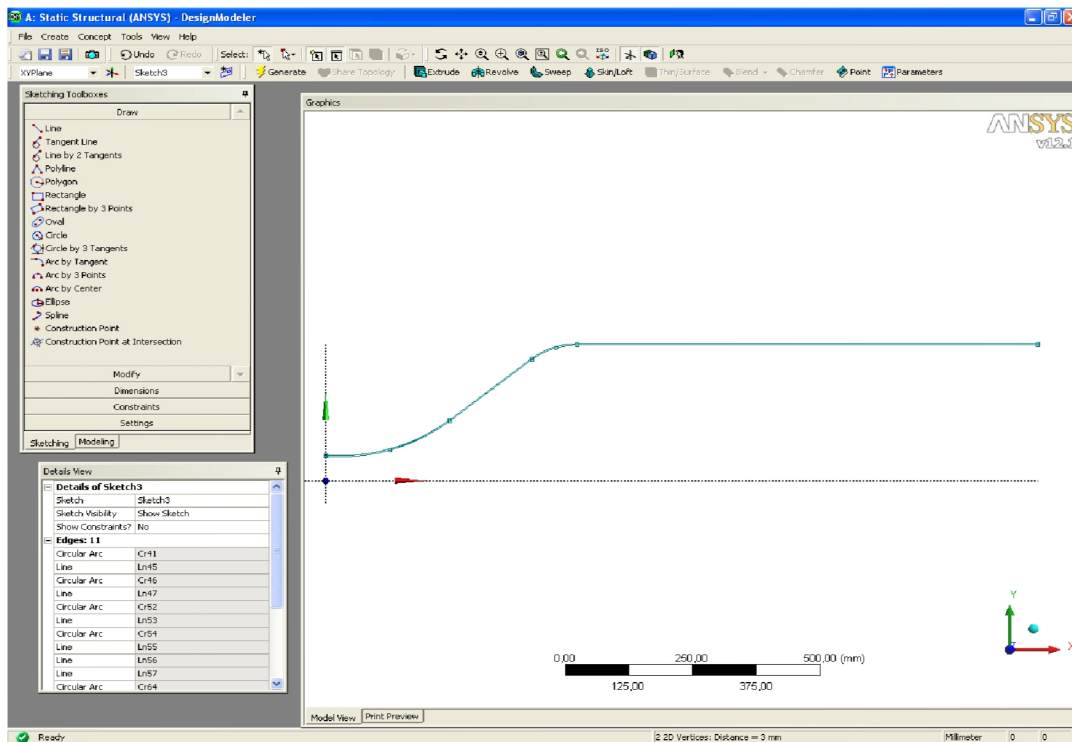


Рис.11

Создаем точку, относительно которой мы создаём копию, на оси Y на высоте $Y = 57$ мм, по алгоритму, приведенному выше:

Sketching -> Draw -> Construction Point
Dimensions -> Vertical -> Detail View

Копируем линию

Modify -> Copy

Выбираем линию корпуса

-> Paste и привязываем к последней точке ($Y=57$ мм):

Соединяем обе линии корпуса с осью, чтобы получился замкнутый контур.

Выделяем все линии вместе с осью.

Переходим к построению объемной модели корпуса КС. Вначале необходимо выполнить вращение созданного нами профиля корпуса камеры сгорания относительно оси X.

Revolve -> Generate (рис.12)

В качестве оси вращения выбираем ось X:

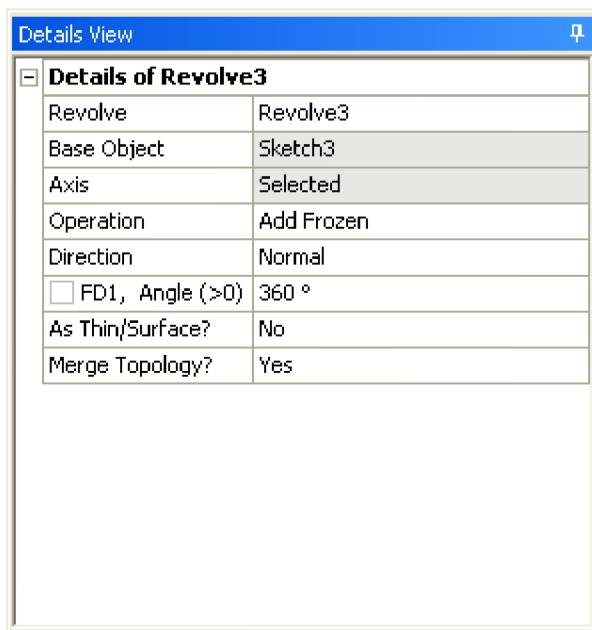


Рис.12

В результате вращения контура получаем модель корпуса КС-рис.13.

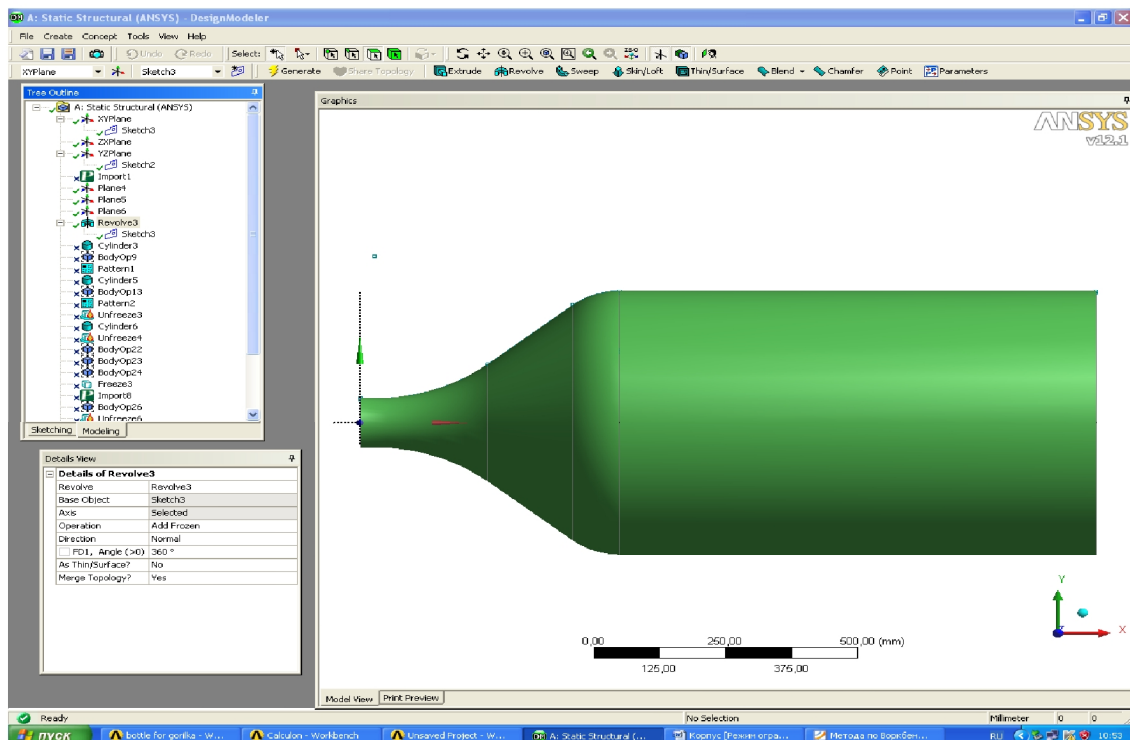


Рис.13

Далее необходимо создать посадочные места для других

функциональных элементов камеры сгорания. Вначале создадим отверстие для форсунки.

По чертежу камеры сгорания нам известна геометрия форсунки и её расположение, на основании которых мы выполняем необходимый для нее вырез.

Создаём цилиндр на расстоянии $X=215\text{мм}$ от входа в КС, перпендикулярный оси X , высотой 200мм и радиусом 25мм . Затем и вырезаем его, воспользовавшись дополнительной функцией при создании Operation: Cut Material:

Create->Primitives->Cylinder (рис.14).

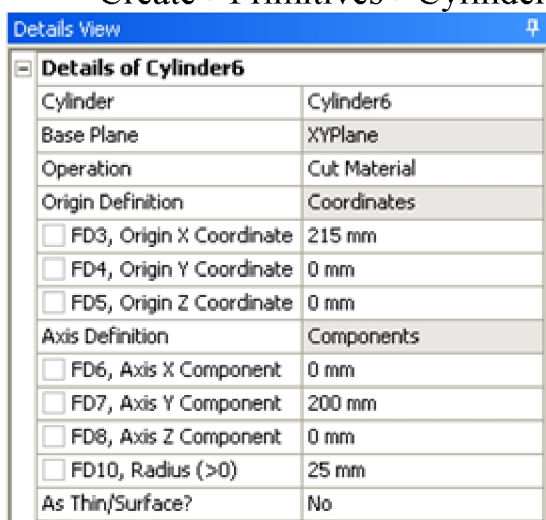


Рис.14

Корпус с отверстием для форсунки показан на рис.15.

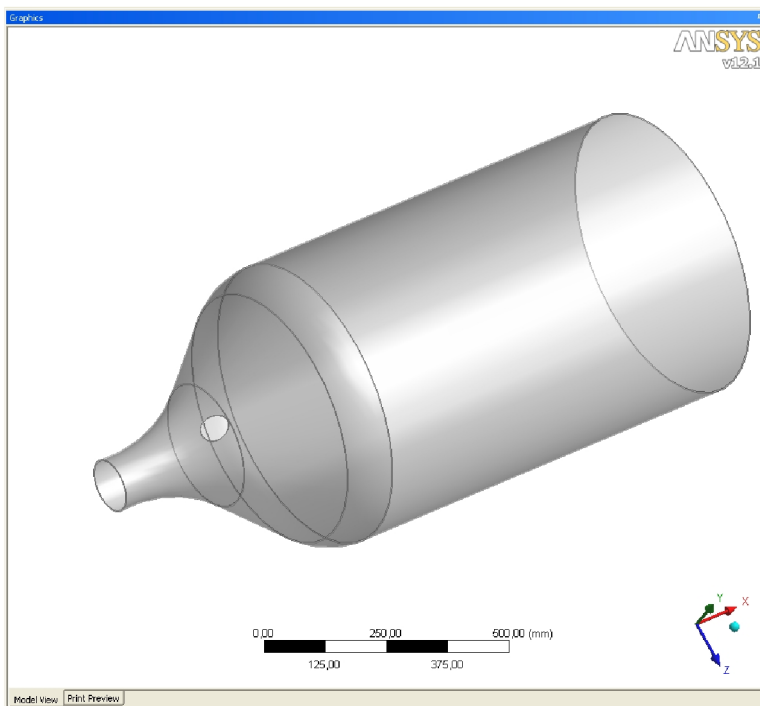


Рис.15

При расчёте структуры и параметров газовых потоков в КС важен учёт элементов, находящихся в зоне этих течений. Такими элементами в нашем случае являются крепления жаровой трубы к корпусу, упрощенно представленные в виде ступенчатых цилиндров

Выполняем построение двух цилиндров, составляющих крепление жаровой трубы к корпусу в плоскости, проходящей через продольную ось КС (рис.16):

- первого на расстоянии $X=435\text{ мм}$ от плоскости входа потока в камеру сгорания, на высоте $Y=197,5\text{ мм}$, высотой 150 мм и радиусом 8 мм ;
- второго на расстоянии $X=1105\text{ мм}$, $Y=245\text{ мм}$, аналогичной высоты и радиуса.

Полученные крепления представлены на рис.17. Чтобы элементы автоматически не объединялись в единое целое, воспользуемся дополнительной функцией при создании Operation: Add Frozen:

Details View		Details View	
Details of Cylinder3		Details of Cylinder5	
Cylinder	Cylinder3	Cylinder	Cylinder5
Base Plane	XYPlane	Base Plane	XYPlane
Operation	Add Frozen	Operation	Add Frozen
Origin Definition	Coordinates	Origin Definition	Coordinates
☐ FD3, Origin X Coordinate	435 mm	☐ FD3, Origin X Coordinate	1105 mm
☐ FD4, Origin Y Coordinate	197,5 mm	☐ FD4, Origin Y Coordinate	245 mm
☐ FD5, Origin Z Coordinate	0 mm	☐ FD5, Origin Z Coordinate	0 mm
Axis Definition	Components	Axis Definition	Components
☐ FD6, Axis X Component	0 mm	☐ FD6, Axis X Component	0 mm
☐ FD7, Axis Y Component	150 mm	☐ FD7, Axis Y Component	120 mm
☐ FD8, Axis Z Component	0 mm	☐ FD8, Axis Z Component	0 mm
☐ FD10, Radius (>0)	8 mm	☐ FD10, Radius (>0)	8 mm
As Thin/Surface?	No	As Thin/Surface?	No

Рис.16

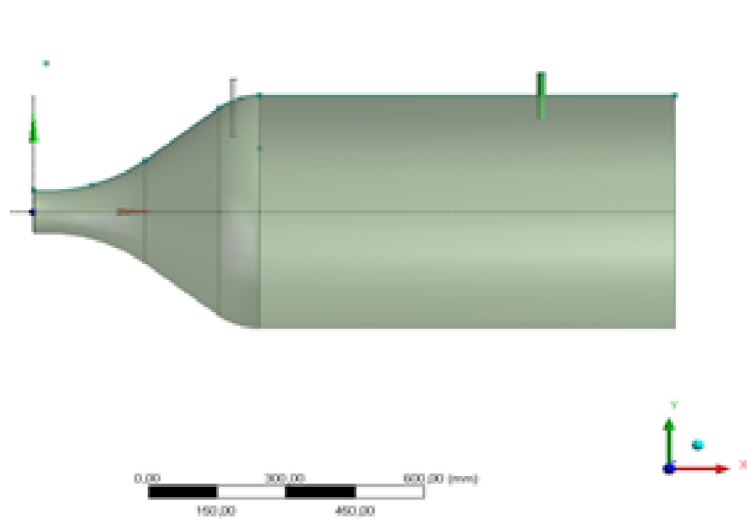


Рис.17

Так как жаровая труба имеет по три крепления в каждой из двух плоскостей, перпендикулярных продольной оси КС, то теперь необходимо построить оставшиеся крепления. Для этого используем круговое копирование каждого из двух креплений на угол 120° . При создании нужно создать по две копии каждого крепления, чтобы исключить лишнее количество объектов. Выполняем следующие действия:

Create->Pattern

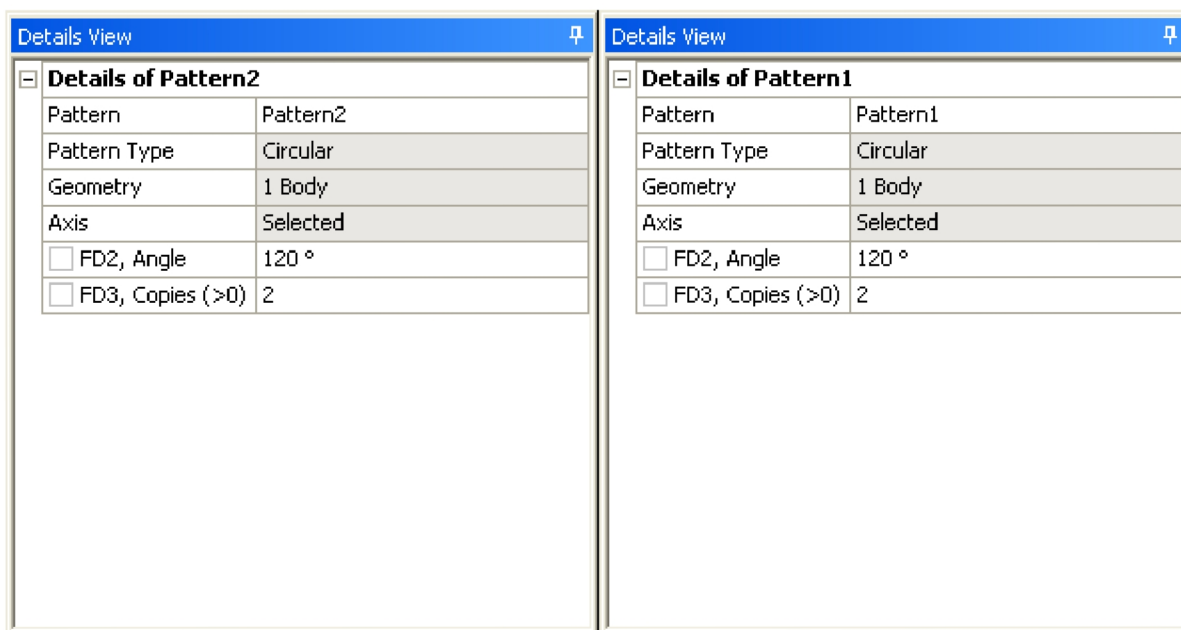


Рис. 18

Корпус с полученными креплениями-см.рис.19

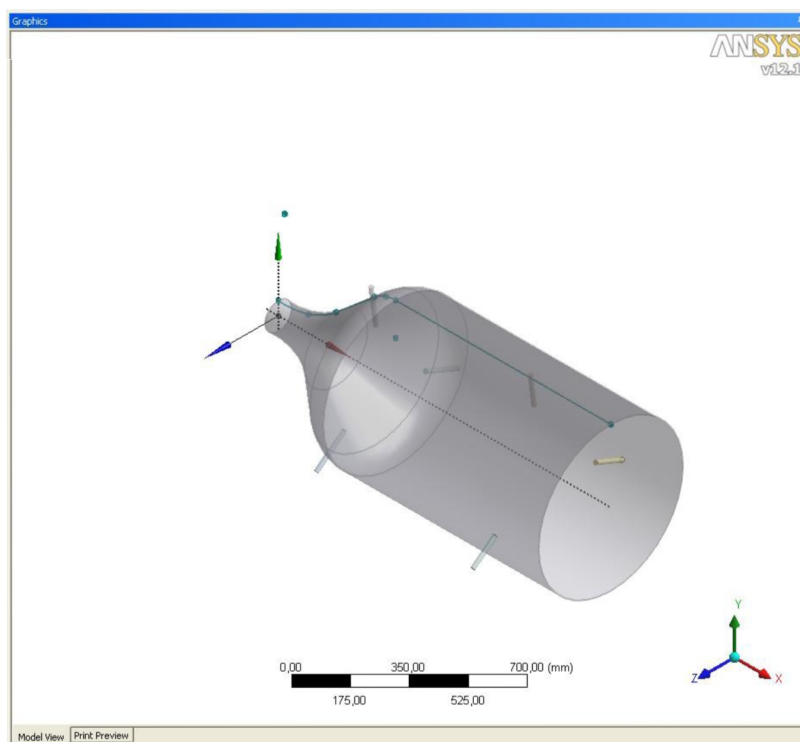


Рис. 19

1. 2 Построение геометрической модели форсунки с завихрителем

Запускаем Workbench

Пуск-> Ansys 12.1 - > Workbench;

Component system -> Geometry -> New Geometry

Выбираем единицу измерений размеров (мм) и начинаем построение геометрической модели форсунки и завихрителя. Наша форсунка представляет собой трубу, изогнутую под углом 90° , а завихритель – ряд лопаток, нижними концами закрепленных на форсунке, а верхними – вписанными в кольцо.

В панели инструментов вкладки Create в консольном меню Primitives выбираем функцию Cylinder. В окне Tree outline выбрав цилиндр вводим необходимые параметры (рис.20)

Details View	
Details of Cylinder1	
Cylinder	Cylinder1
Base Plane	XYPlane
Operation	Add Material
Origin Definition	Coordinates
☐ FD3, Origin X Coordinate	0 mm
☐ FD4, Origin Y Coordinate	0 mm
☐ FD5, Origin Z Coordinate	0 mm
Axis Definition	Components
☐ FD6, Axis X Component	0 mm
☐ FD7, Axis Y Component	0 mm
☐ FD8, Axis Z Component	200 mm
☐ FD10, Radius (>0)	30 mm
As Thin/Surface?	Yes
☐ FD1, Inner Thickness (>=0)	10 mm
☐ FD2, Outer Thickness (>=0)	0 mm

Рис.. 20

Используем функцию Generate, после чего получаем цилиндрическую поверхность, показанную на рис.21.

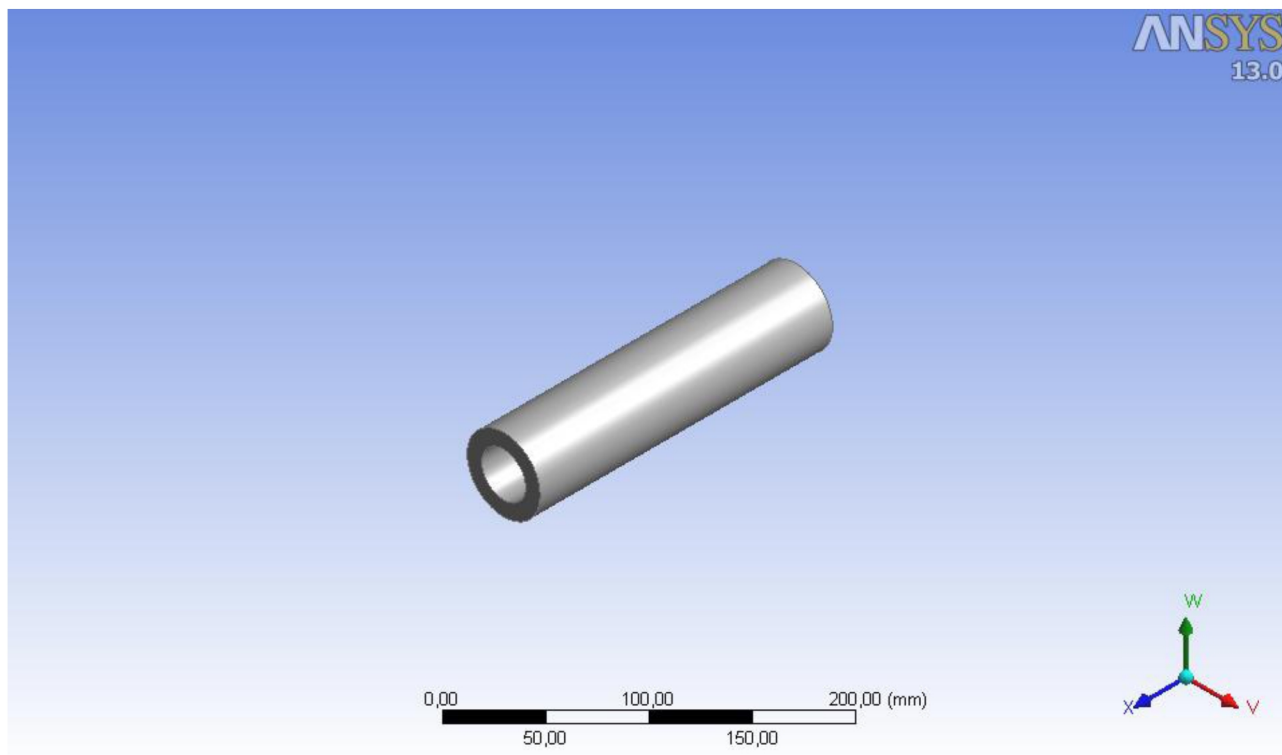


Рис.. 21

Далее создаём вторую цилиндрическую поверхность, со следующими параметрами в Details view (рис.22):

Details View	
[-] Details of Cylinder2	
Cylinder	Cylinder2
Base Plane	YZPlane
Operation	Add Material
Origin Definition	Coordinates
☐ FD3, Origin X Coordinate	0 mm
☐ FD4, Origin Y Coordinate	0 mm
☐ FD5, Origin Z Coordinate	0 mm
Axis Definition	Components
☐ FD6, Axis X Component	0 mm
☐ FD7, Axis Y Component	0 mm
☐ FD8, Axis Z Component	91 mm
☐ FD10, Radius (>0)	25 mm
As Thin/Surface?	Yes
☐ FD1, Inner Thickness (>=0)	10 mm
☐ FD2, Outer Thickness (>=0)	0 mm

Рис.22

После выполнения данной операции получаем два цилиндра с взаимным расположением, показанным на рис.23.

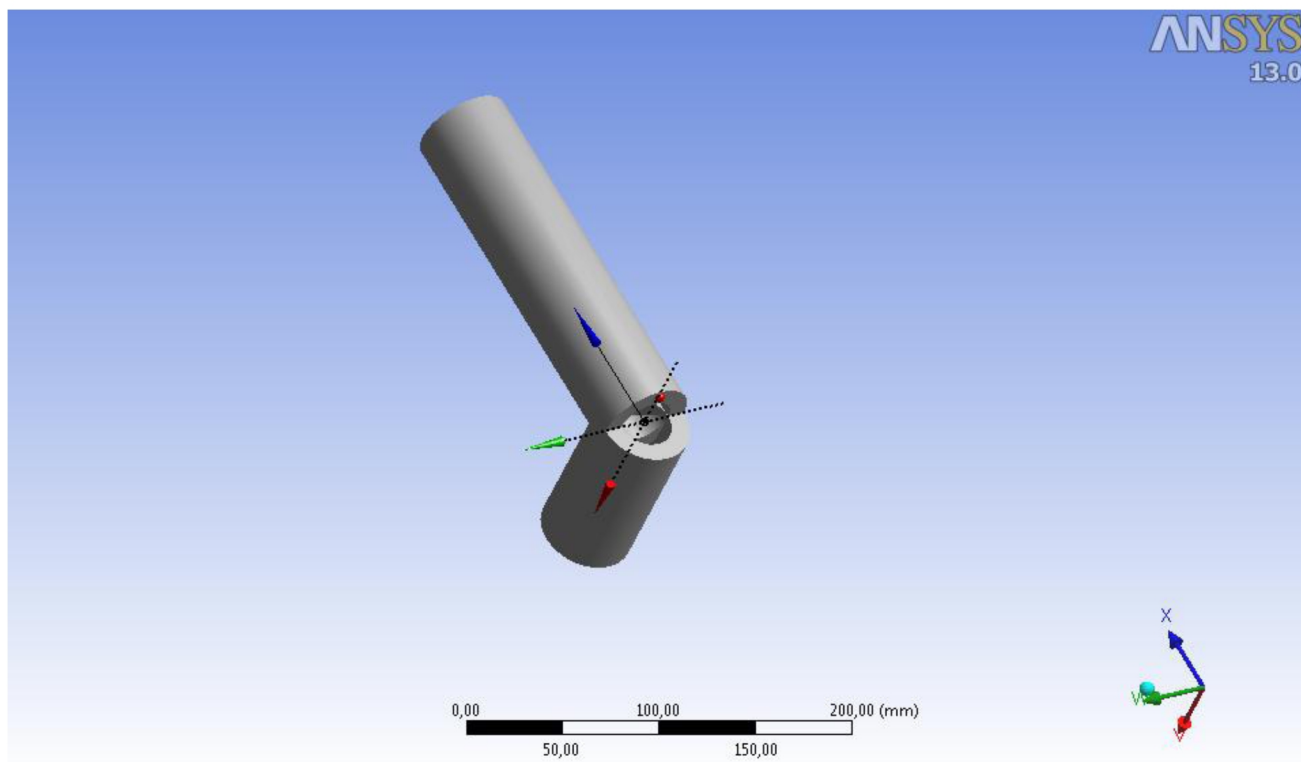


Рис.23

Выполняем объединение двух цилиндров сферической поверхностью (рис.24) с указанием необходимых геометрических параметров:

Create -> Primitives->Sphere

Details View	
Details of Sphere1	
Sphere	Sphere1
Base Plane	XYPlane
Operation	Add Material
Origin Definition	Coordinates
☐ FD3, Origin X Coordinate	0 mm
☐ FD4, Origin Y Coordinate	0 mm
☐ FD5, Origin Z Coordinate	0 mm
☐ FD6, Radius (>0)	25 mm
As Thin/Surface?	Yes
☐ FD1, Inner Thickness (>=0)	10 mm
☐ FD2, Outer Thickness (>=0)	0 mm

Рис.24

Используя функцию Generate , получаем (рис.25)

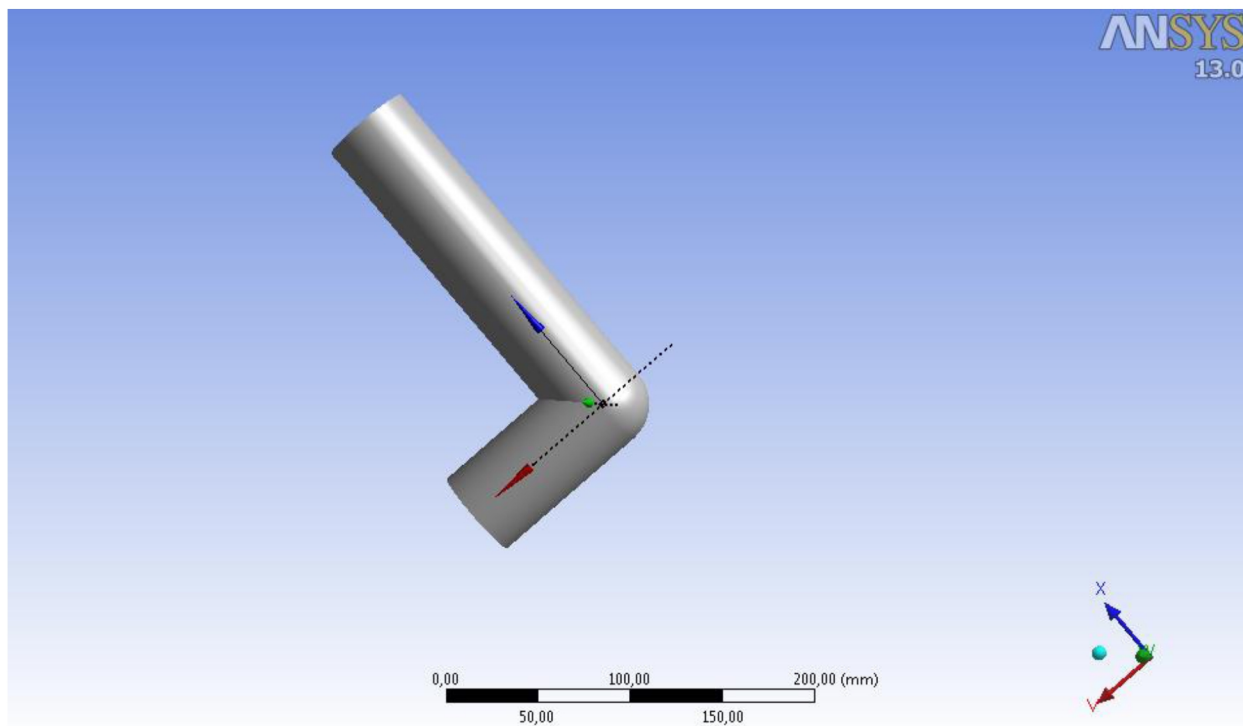


Рис.25

Теперь создадим внутренний канал форсунки (в некоторых видах расчётов не используется). Вырезаем из заготовки форсунки два цилиндра со следующими параметрами (рис.26):

Details View		Details View	
Details of Cylinder3		Details of Cylinder4	
Cylinder	Cylinder3	Cylinder	Cylinder4
Base Plane	XYPlane	Base Plane	YZPlane
Operation	Cut Material	Operation	Cut Material
Origin Definition	Coordinates	Origin Definition	Coordinates
☐ FD3, Origin X Coordinate	0 mm	☐ FD3, Origin X Coordinate	0 mm
☐ FD4, Origin Y Coordinate	0 mm	☐ FD4, Origin Y Coordinate	0 mm
☐ FD5, Origin Z Coordinate	0 mm	☐ FD5, Origin Z Coordinate	0 mm
Axis Definition	Components	Axis Definition	Components
☐ FD6, Axis X Component	0 mm	☐ FD6, Axis X Component	0 mm
☐ FD7, Axis Y Component	0 mm	☐ FD7, Axis Y Component	0 mm
☐ FD8, Axis Z Component	30 mm	☐ FD8, Axis Z Component	30 mm
☐ FD10, Radius (>0)	15 mm	☐ FD10, Radius (>0)	15 mm
As Thin/Surface?	No	As Thin/Surface?	No

Рис.26

В результате получаем модель форсунки (в разрезе показана на рис.27).

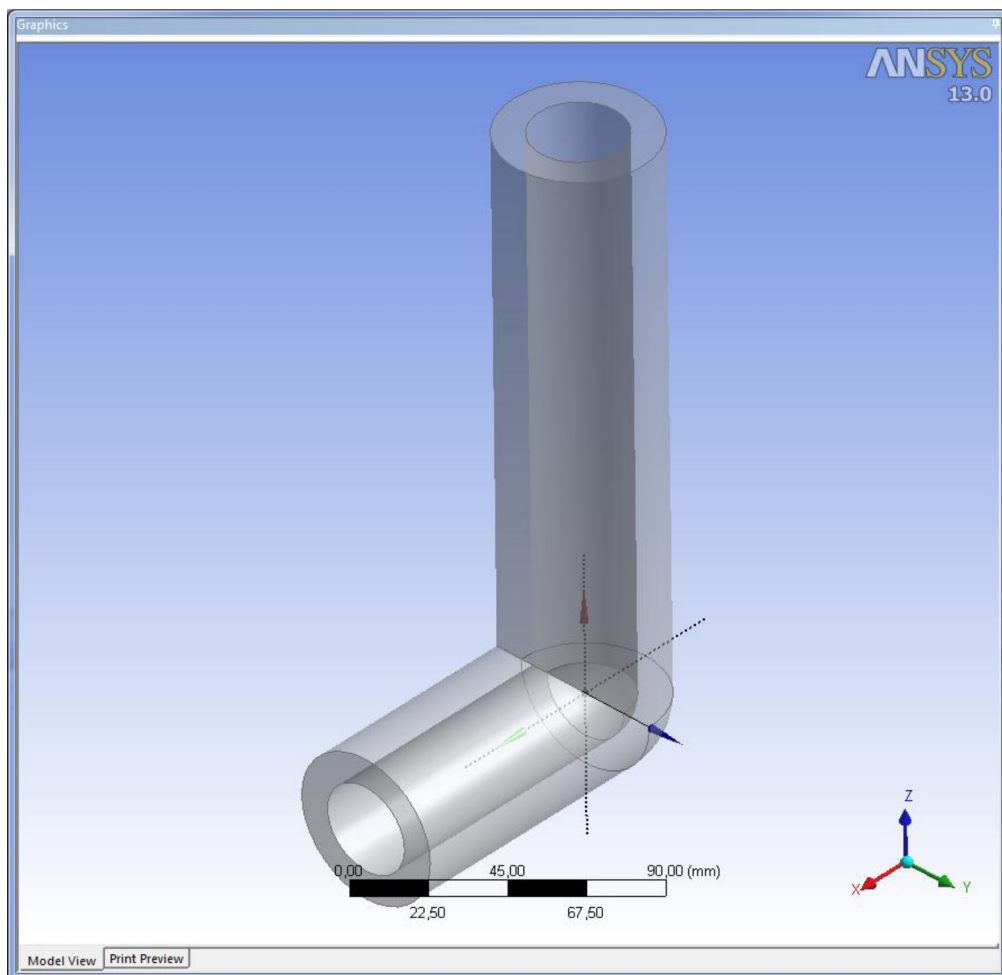


Рис.27

В панели инструментов вкладки Tools выбираем функцию Freeze / Переходим к построению завихрителя. Вначале создадим лопадки завихрителя:

Create->Primitives->Box

В Details view вводим геометрические параметры (рис.28):

Details View	
Details of Box2	
Box	Box2
Base Plane	XYPlane
Operation	Add Frozen
Box Type	From One Point and Diagonal
Point 1 Definition	Coordinates
☐ FD3, Point 1 X Coordinate	47 mm
☐ FD4, Point 1 Y Coordinate	-5 mm
☐ FD5, Point 1 Z Coordinate	20 mm
Diagonal Definition	Components
☐ FD6, Diagonal X Component	44 mm
☐ FD7, Diagonal Y Component	10 mm
☐ FD8, Diagonal Z Component	42 mm
As Thin/Surface?	No

Рис.28

В панели инструментов выбираем функцию Blend->Fixed radius и вводим в Details view - Radius 3mm, затем скругляем углы заготовки лопатки, выбирая их вручную левой кнопкой мыши при нажатой клавише Ctrl, Generate.
Получаем изображение, как на рис.29.

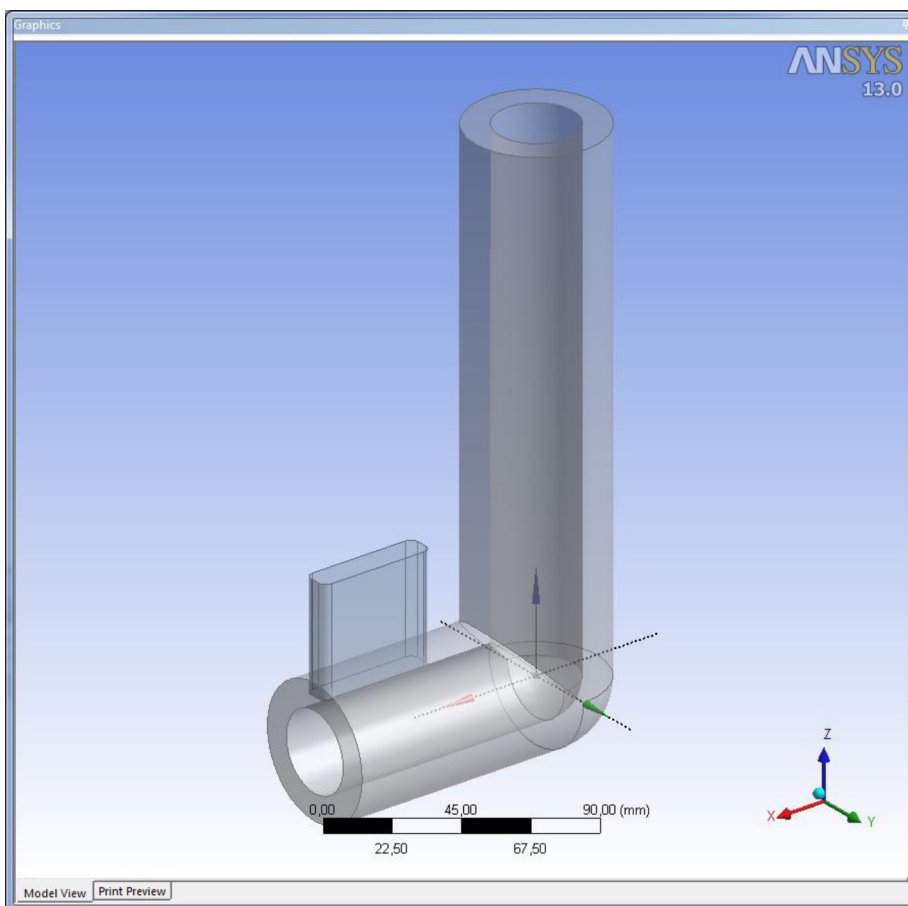


Рис.29

Далее необходимо выполнить поворот полученной лопатки. Создаем линию в плоскости ZX Plane на расстоянии 69мм от оси Z и выполняем её поворот.

Create-> Body Operation в Details View и ввод геометрических параметров (рис.30):

Details View	
Details of BodyOp2	
Body Operation	BodyOp2
Type	Rotate
Bodies	1
Preserve Bodies?	No
Axis Definition	Selection
Axis Selection	2D Edge
☐ FD9, Angle	15 °

Рис.30

Затем выделив в поле Bodies лопатку, нажимаем Apply, а в строке Axis Selection выбираем линию, созданную в предыдущем шаге.

Операцией Generate, получаем расположение лопатки, показанное на рис.31.

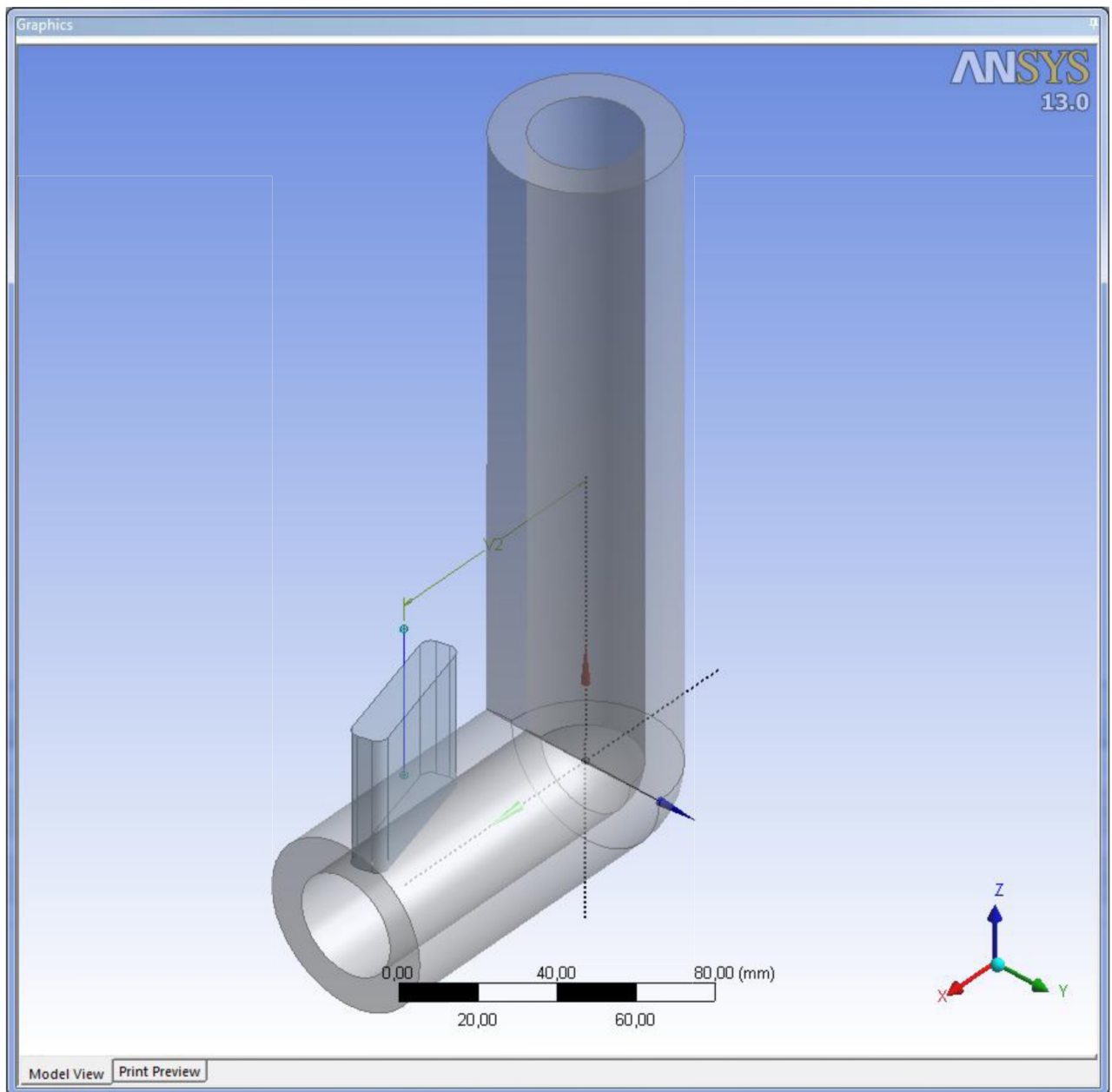


Рис.31

Выполняем Create->Pattern,
в Details View, вводим:
Pattern type-Circular, Geometry- лопатка, Axis- ось форсунки, Angle-45
(угол), Copies-7(количество лопаток). Используя функцию Generate , создаём
все лопатки, как показано на рис.32.

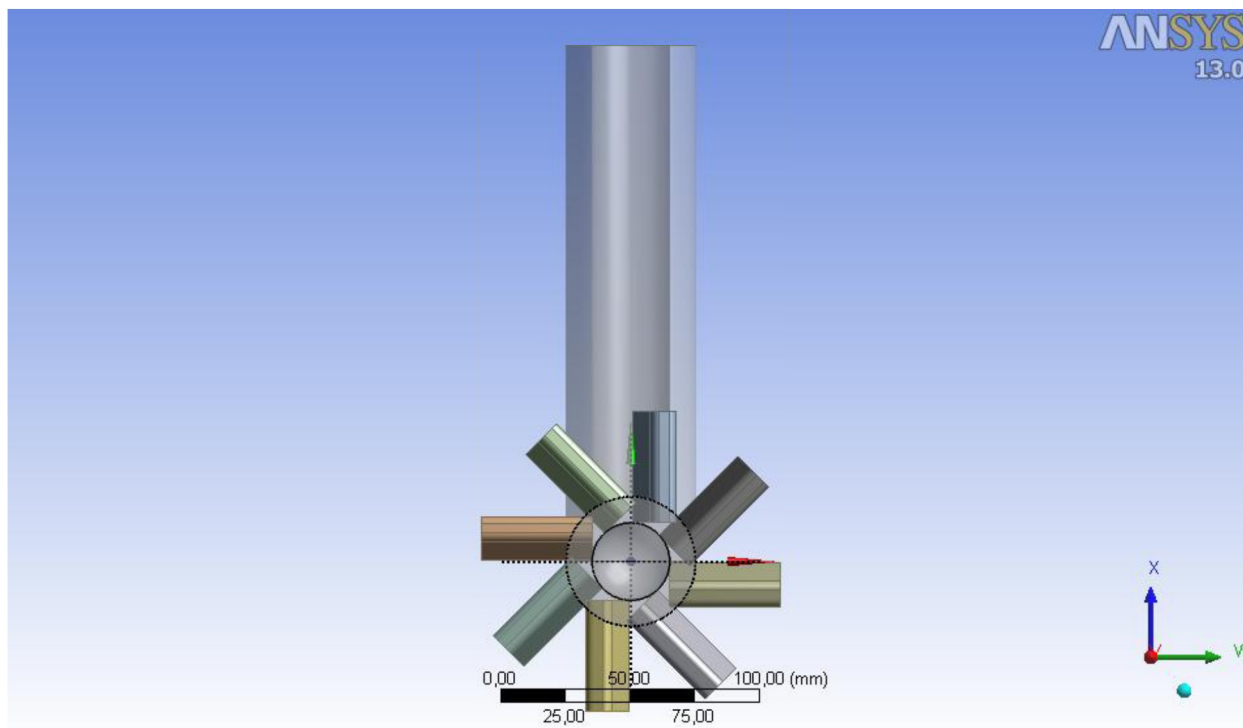


Рис.32

Переходим к построению кольца завихрителя. В Details View задаём: Type-From face, Subtype-Outline Plane, Base Plane- выбираем необходимую нам плоскость, перпендикулярную оси форсунки и используем функцию Generate.

Переходим в вид созданную плоскость, задав её в окне Tree Outline и выбрав функцию Look at face\Plane\Sketches. Используем функцию New Sketch, переходим в подменю Sketching и создаём две окружности с радиусами 120 и 110 мм. Для этого в меню Draw строим две окружности с центрами, совпадающими с осью форсунки. Переходим в меню Dimensions, выбираем диаметральный размер и привязываем его к обеим окружностям и вводим необходимые нам значения (рис.33).

Переходим в изометрическое изображение командой Set ISO. Выбираем Extrude и в Details view вводим следующие параметры:

Base object- созданную нами поверхность Sketch, Operation- Add material, Direction vector- None (Normal), Direction- Reversed, Extent type- fixed, Depth-45mm.

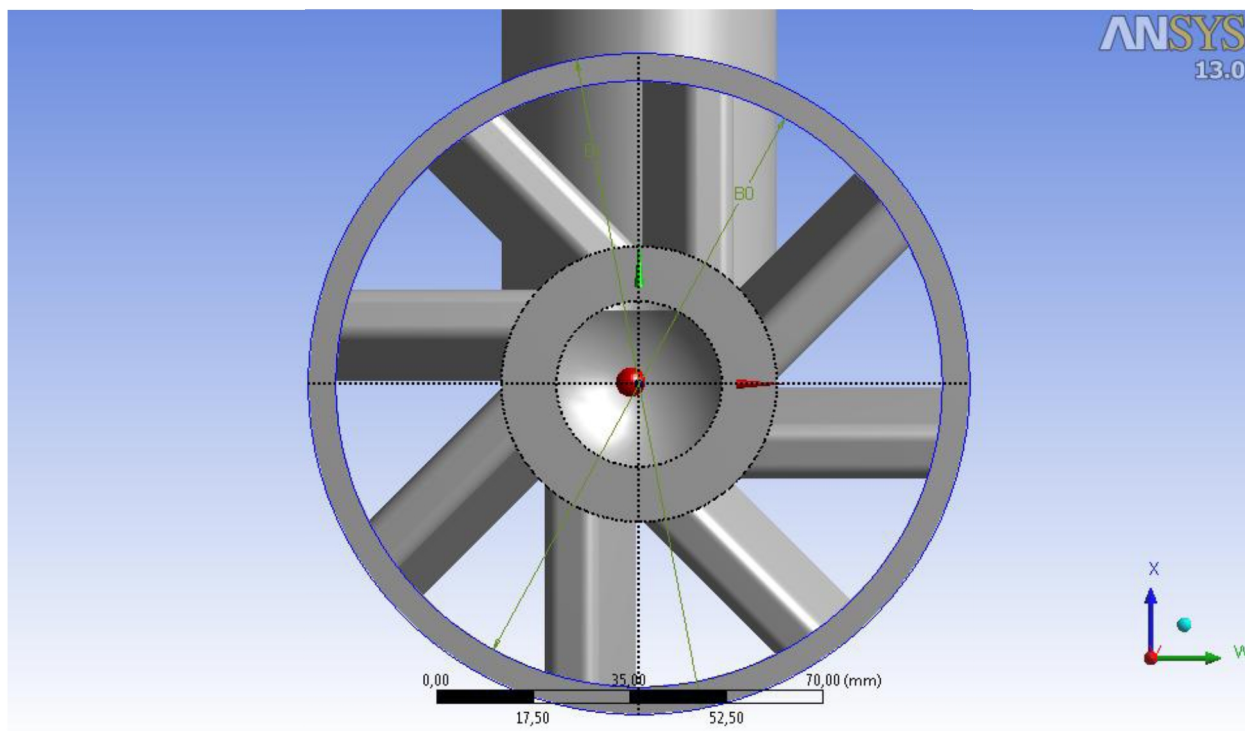


Рис.33

Операцию Generate завершаем создание кольца, как показано на рис.34.

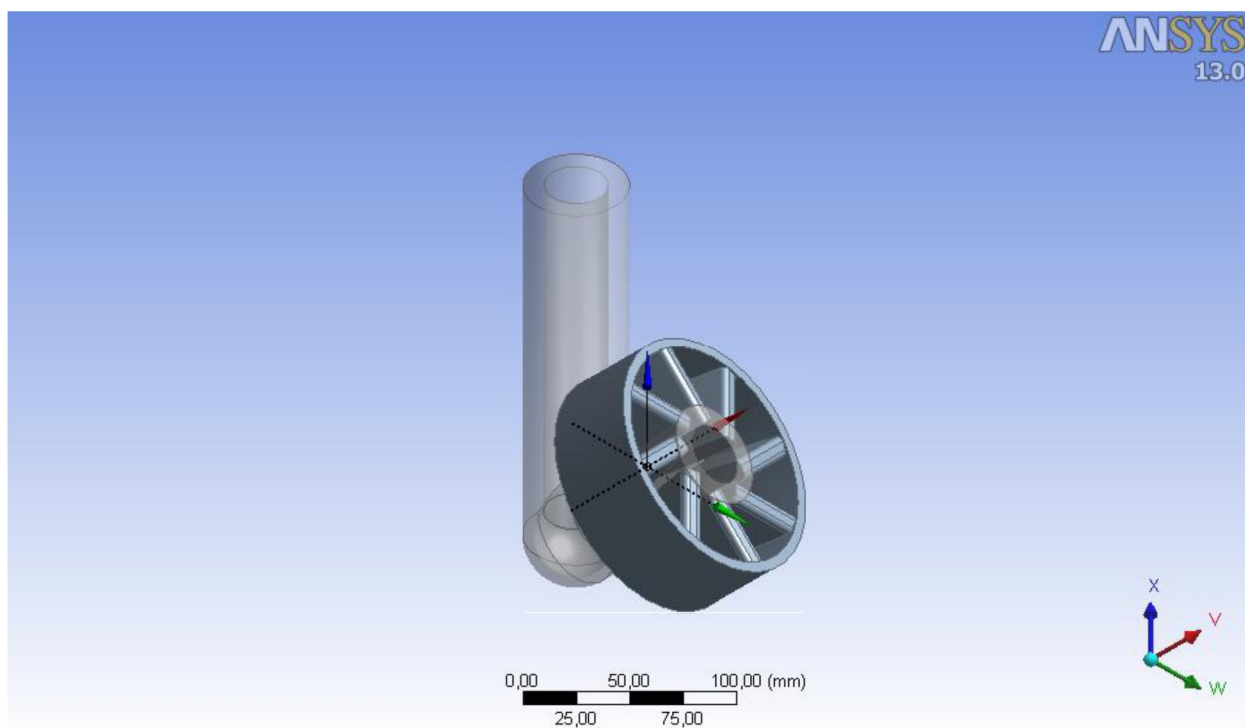


Рис.34

Выбрав в панели инструментов Tools->Unfreeze объединим все созданные нами объекты в единое целое.

После объединения сохраняем файл в расширении Parasolid Text для дальнейшего успешного импортирования (рис.35):
File->Export...

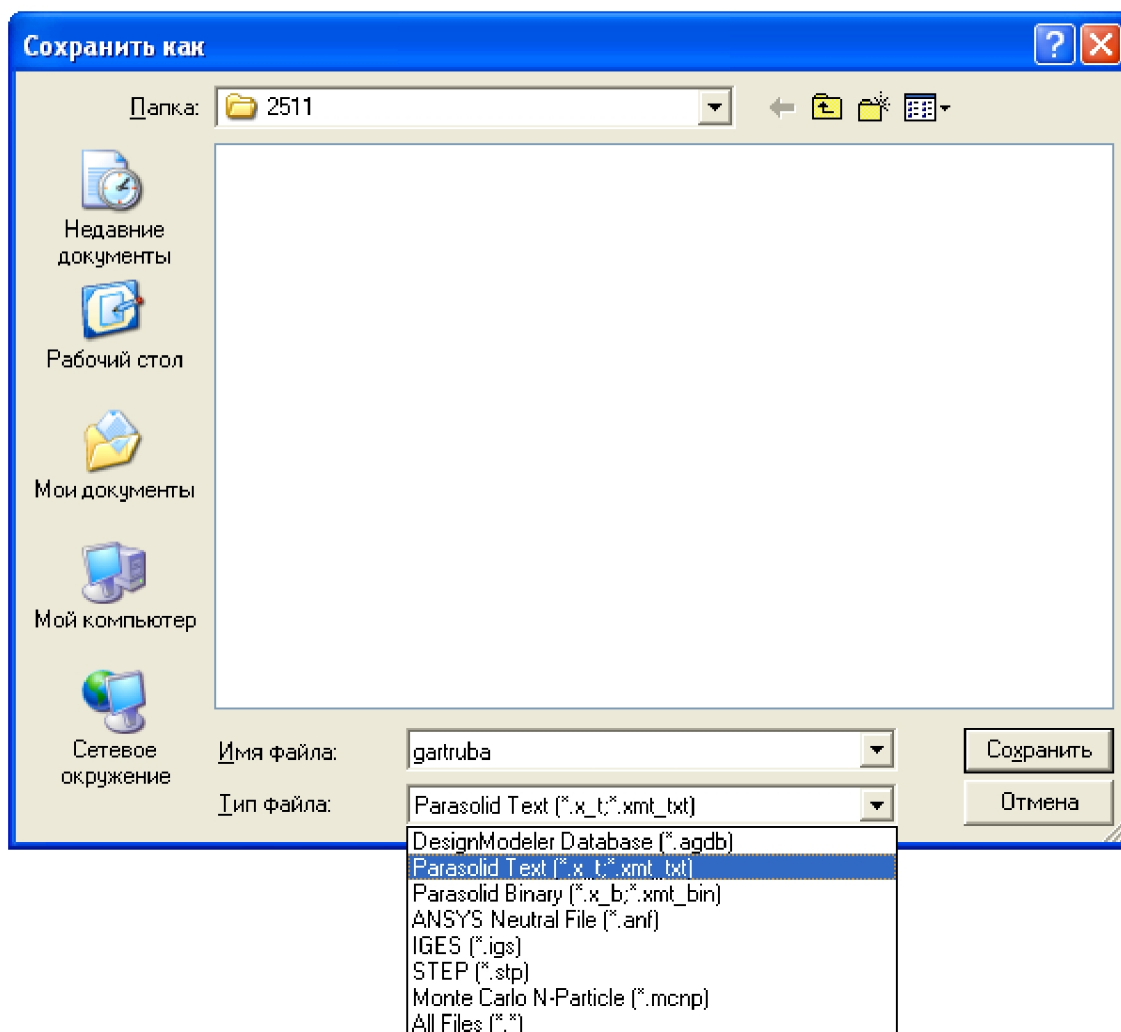


Рис.35

1. 3 Создание геометрической модели жаровой трубы

Запускаем Workbench

Пуск-> Ansys 12.1 -> Workbench

Component system -> Geometry -> New Geometry

Выбираем единицы измерения: мм

Жаровая труба представляет собой оболочку из четырёх соединенных между собой колец, некоторые из которых имеют отверстия подвода воздуха, расположенную внутри корпуса КС. Жаровая труба имеет кронштейны, к которым крепятся соединительные элементы, построенные ранее вместе с корпусом КС.

Построение корпуса жаровой трубы начинаем с контура первого кольца.

В верхней части окна нажимаем на  , для создания нового эскиза. Приступаем к построению точек. В левой части экрана выбираем подменю Sketching – Draw – Construction point. Ставим точку 1 на ось у, точки 2,3,4,5,6 в первом квадранте плоскости XY(рис.36). Далее в меню Dimension с помощью инструментов Horizontal(горизонтальный размер) и Vertical(вертикальный размер) устанавливаем координаты точек относительно осей x и y. Точка 1 (V=63, H=0); точка 2 (V=63, H=3); точка 3 (V=115, H=53); точка 4 (V=112, H=53); точка 5 (V=184, H=125); точка 6 (V=181, H=125). Далее выбираем Draw – Polyline и последовательно соединяем точки, создавая замкнутый контур.

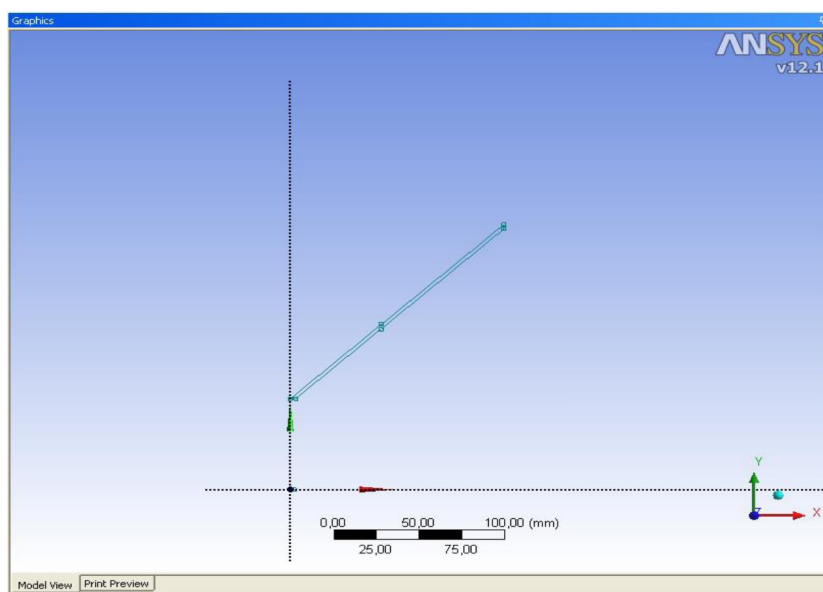


Рис.36.

Создаем новый эскиз для второго кольца корпуса жаровой трубы в последовательности, описанной выше. Создаем точки 7,8,9,10,11,12,13,14. Точка 7 ставится на линию, соединяющую точки 3 и 5 предыдущего эскиза. Для неё устанавливаем H=120. Координаты других точек: точка 8 (V=182, H=120) ; точка 9 (V=187, H=125); точка 10 (V=185, H=130); точка 11 (V=228, H=359); точка 12 (V=225, H=359); точка 13 (V=182, H=130); точка 14 (V=184, H=125)-рис.37. Точки 9,10 и 13,14 соединяем Spline.

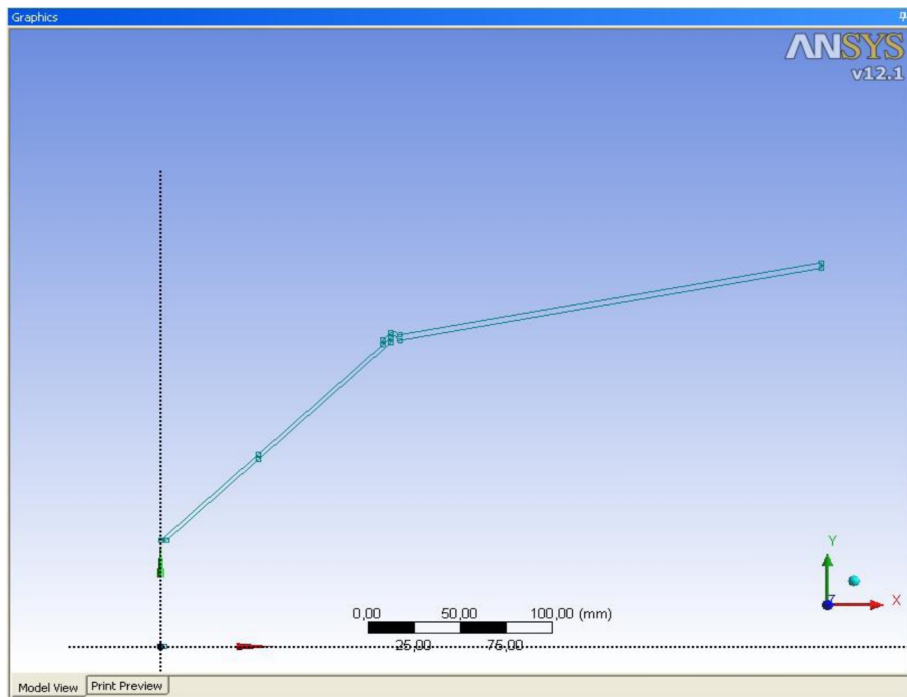


Рис.37

Выполняем новый эскиз для третьего кольца корпуса жаровой трубы.
Создаем точки 15,16,17,18,19,20,21,22.

Точка 15 ставится на линию, соединяющую точки 10 и 11 предыдущего эскиза и регулируется размером $H=348$. Координаты остальных точек: точка 16 ($V=229, H=348$); точка 17 ($V=231, H=359$); точка 18 ($V=228, H=365$); точка 19 ($V=228, H=900$); точка 20 ($V=225, H=900$); точка 21 ($V=225, H=365$); точка 22 ($V=228, H=359$). Точки 17,18 и 21,22 соединяем Spline (рис.38).

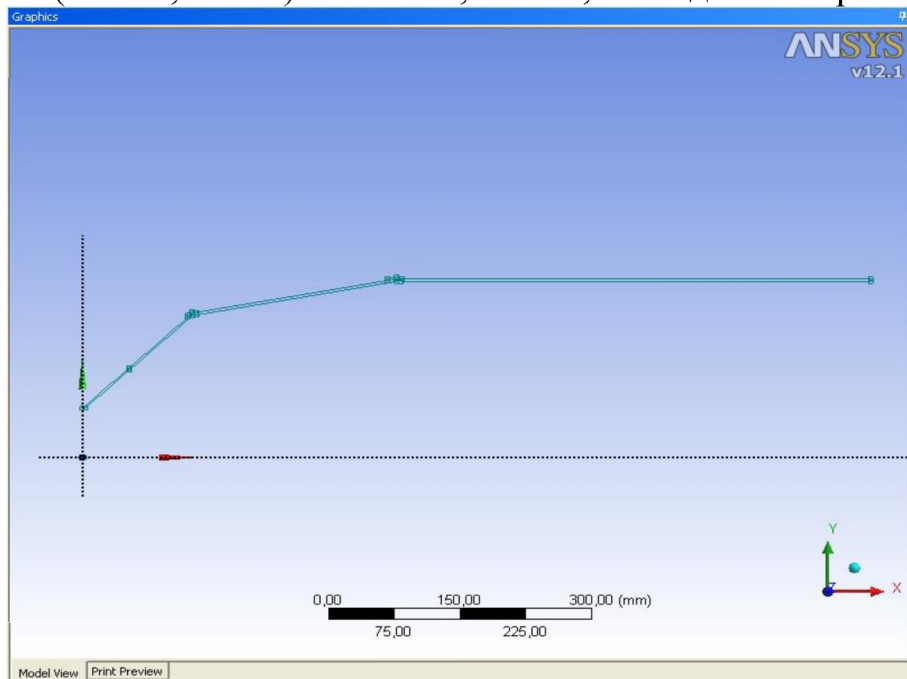


Рис.38

Создаем новый эскиз для последнего, четвертого кольца жаровой трубы.

Создаем точки 23,24,25,26,27,28,29,30.

Точка 23 ставится на линию, соединяющую точки 18 и 19 предыдущего эскиза, ее положение регулируем размером $H=879$; точка 24 ($V=231, H=879$); точка 25 ($V=231, H=900$); точка 26 ($V=225, H=904$); точка 27 ($V=62, H=1086$); точка 28 ($V=59, H=1086$); точка 29 ($V=225, H=365$); точка 30 ($V=228, H=900$). Точки 25,26 и 29,30 соединяем Spline-рис.39.

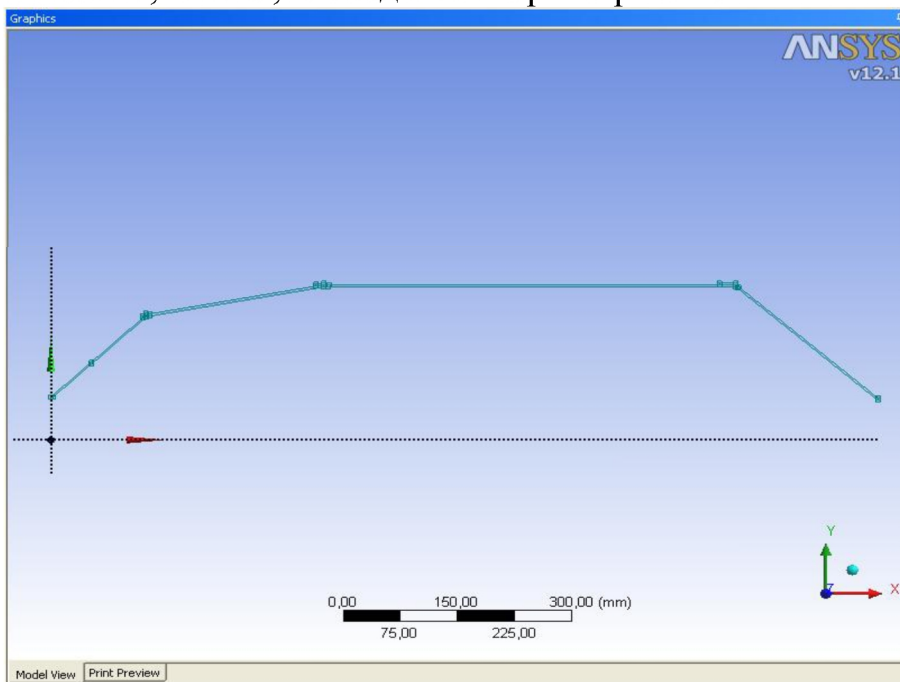


Рис.39

Переходим к созданию объемной модели. Используем для этого инструмент  Revolve -рис.40.

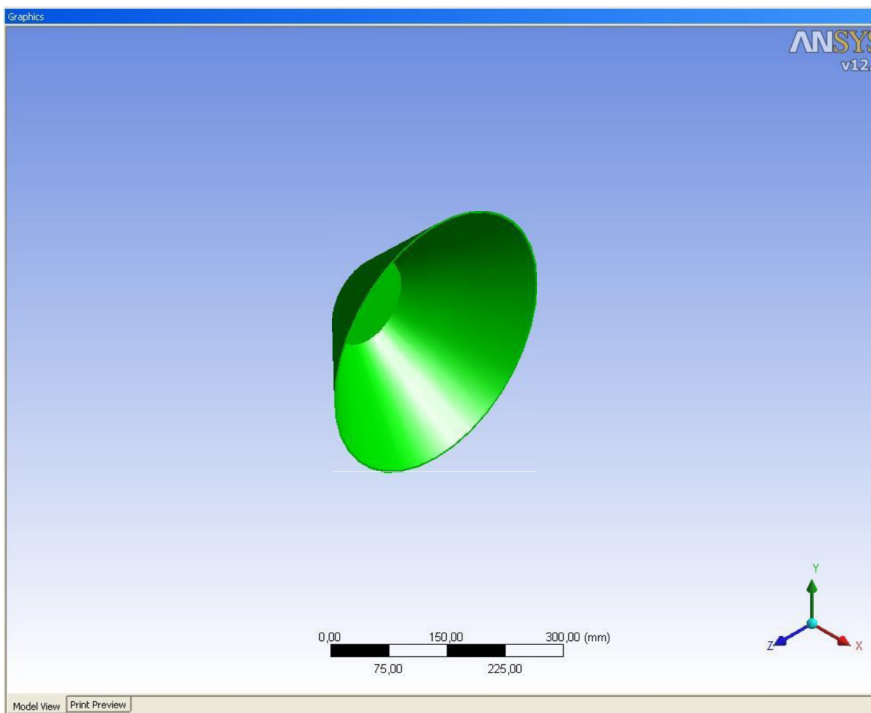


Рис.40

Последовательно создаем все остальные кольца-рис.41.

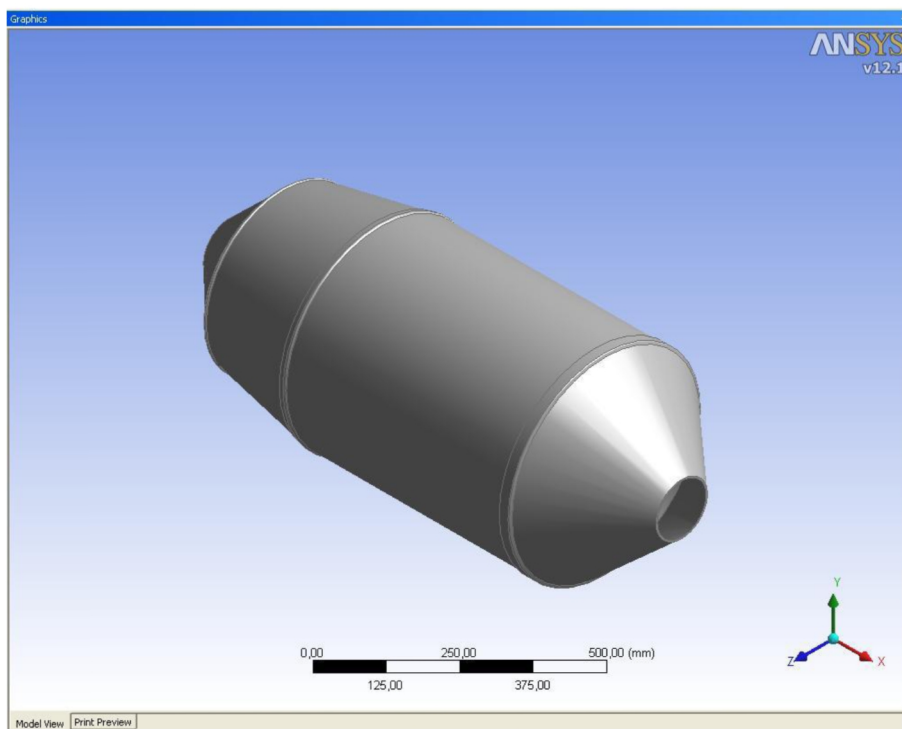


Рис.41

Переходим к построению отверстий. Для этого создаем цилиндр со следующими параметрами-рис.42.

Details View	
Details of Cylinder26	
Cylinder	Cylinder26
Base Plane	XYPlane
Operation	Add Frozen
Origin Definition	Coordinates
☐ FD3, Origin X Coordinate	0 mm
☐ FD4, Origin Y Coordinate	0 mm
☐ FD5, Origin Z Coordinate	90 mm
Axis Definition	Components
☐ FD6, Axis X Component	100 mm
☐ FD7, Axis Y Component	0 mm
☐ FD8, Axis Z Component	0 mm
☐ FD10, Radius (>0)	3 mm
As Thin/Surface?	No

Рис.42

Затем выполняем следующие операции: Create – Pattern. В меню Pattern Type выбираем Circular, в меню Geometry выбираем нашу модель жаровой трубы, задаемся углом копирования 15 градусов и числом копий 23, нажимаем Generate (рис.43).

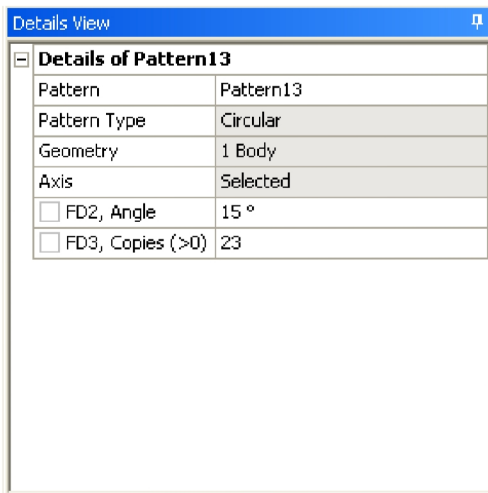


Рис.43

Получаем картину как не рис.44

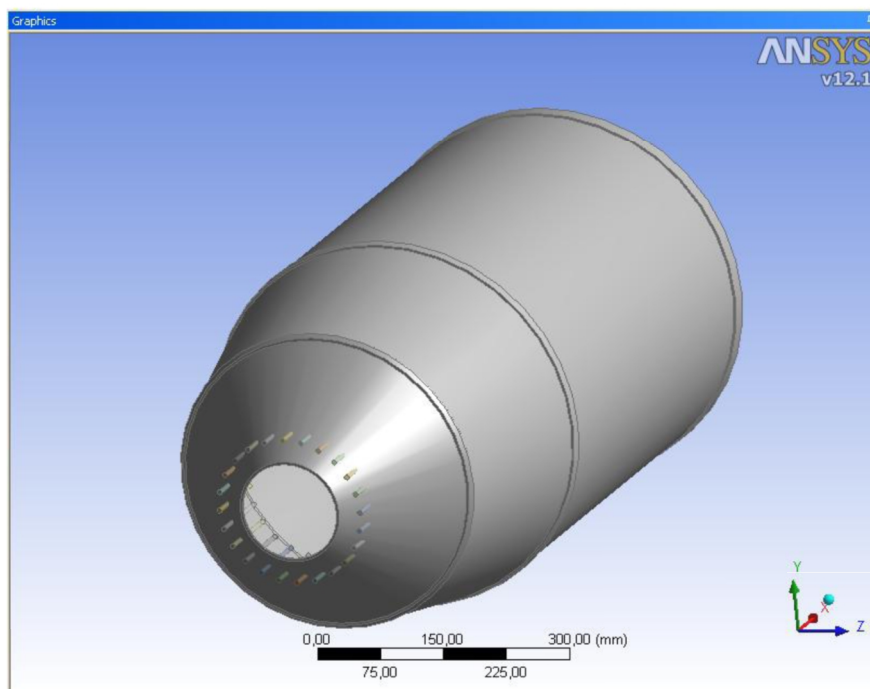


Рис.44

Далее Create – Body Operation. В меню Type выбираем Cut Material, в меню Bodies задаём все кольца- Generate.

Далее таким же способом создаем остальные отверстия, задавая параметры, вырезаемых цилиндров-рис.45.

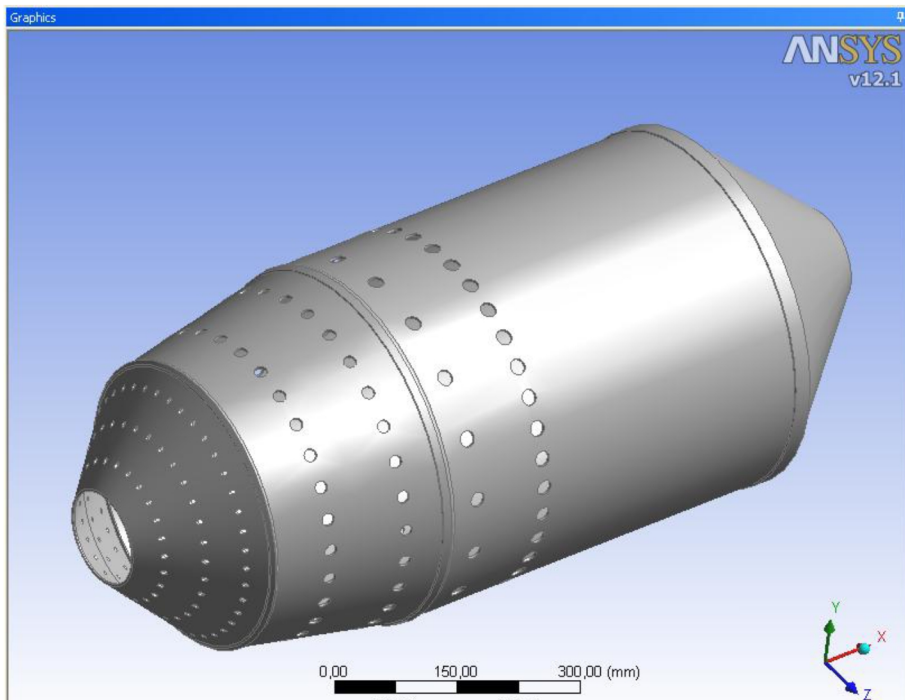


Рис.45

Теперь необходимо перейти к построению крепёжных кронштейнов. Для этого создаем эскиз крепления в плоскости XY (рис.46).

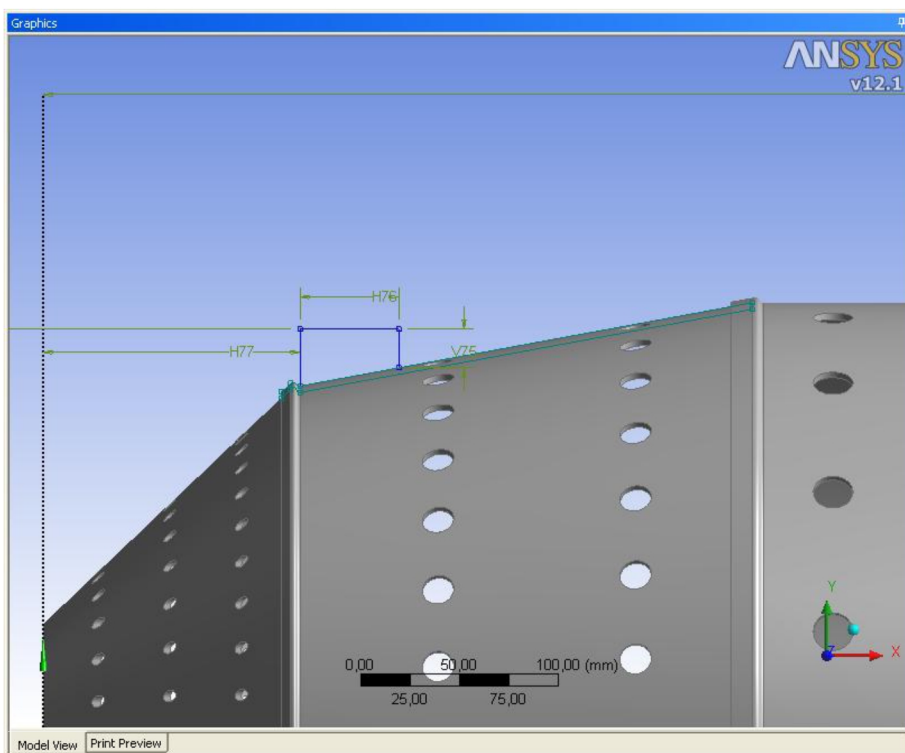


Рис.46

Создаем 4 линии: две вертикальных, исходящих из поверхности жаровой трубы, одну горизонтальную между ними, и одну линию, соединяющую нижние точки вертикальных линий, проходящую по поверхности жаровой трубы.

Задаем размеры: от оси Y до левой вертикальной линии- 130 мм, длину

кронштейна по горизонтали- 50 мм, и правую вертикальную линию- 20 мм.

Затем переходим в меню Modeling и инструментом Revolve создаем кронштейн-рис.47.

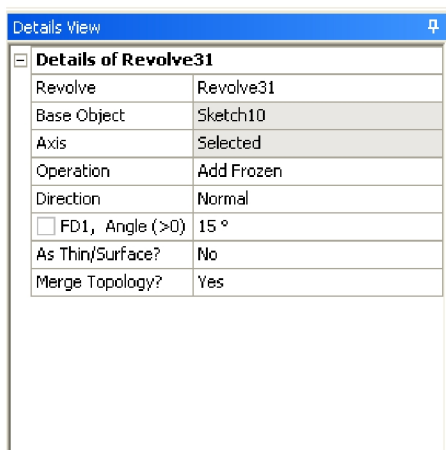


Рис.47

Так как для крепления ЖТ к корпусу, в плоскости, перпендикулярной оси КС, располагается три кронштейна, используем инструмент Pattern для копирования (рис.48):

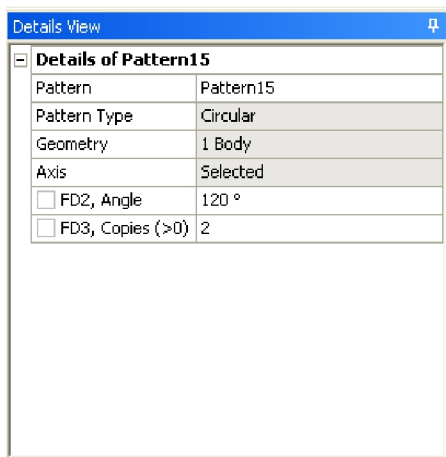


Рис.48

Аналогично создаем кронштейны в концевой части жаровой трубы. Окончательный вид жаровой трубы представлен на рис.49.

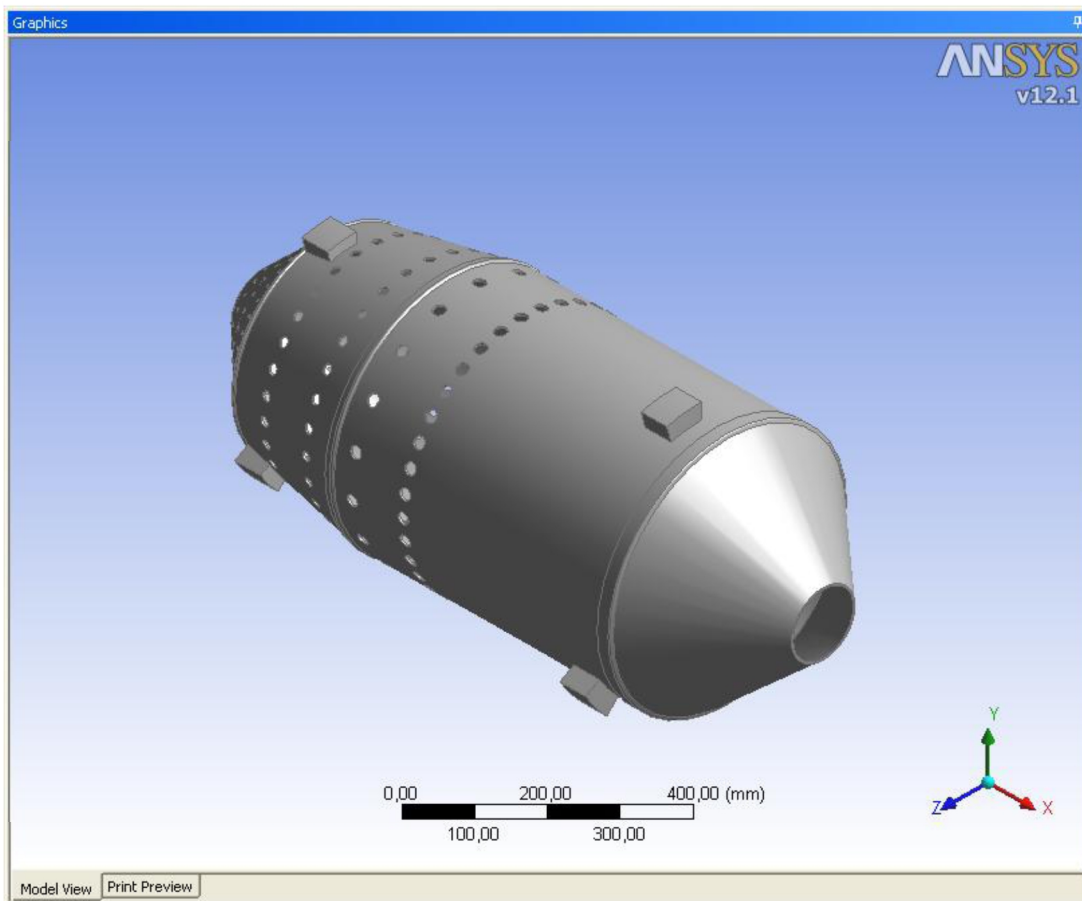


Рис.49

После объединения следует сохранить файл в расширении Parasolid Text для дальнейшего успешного импортирования (рис.50):
File->Export...

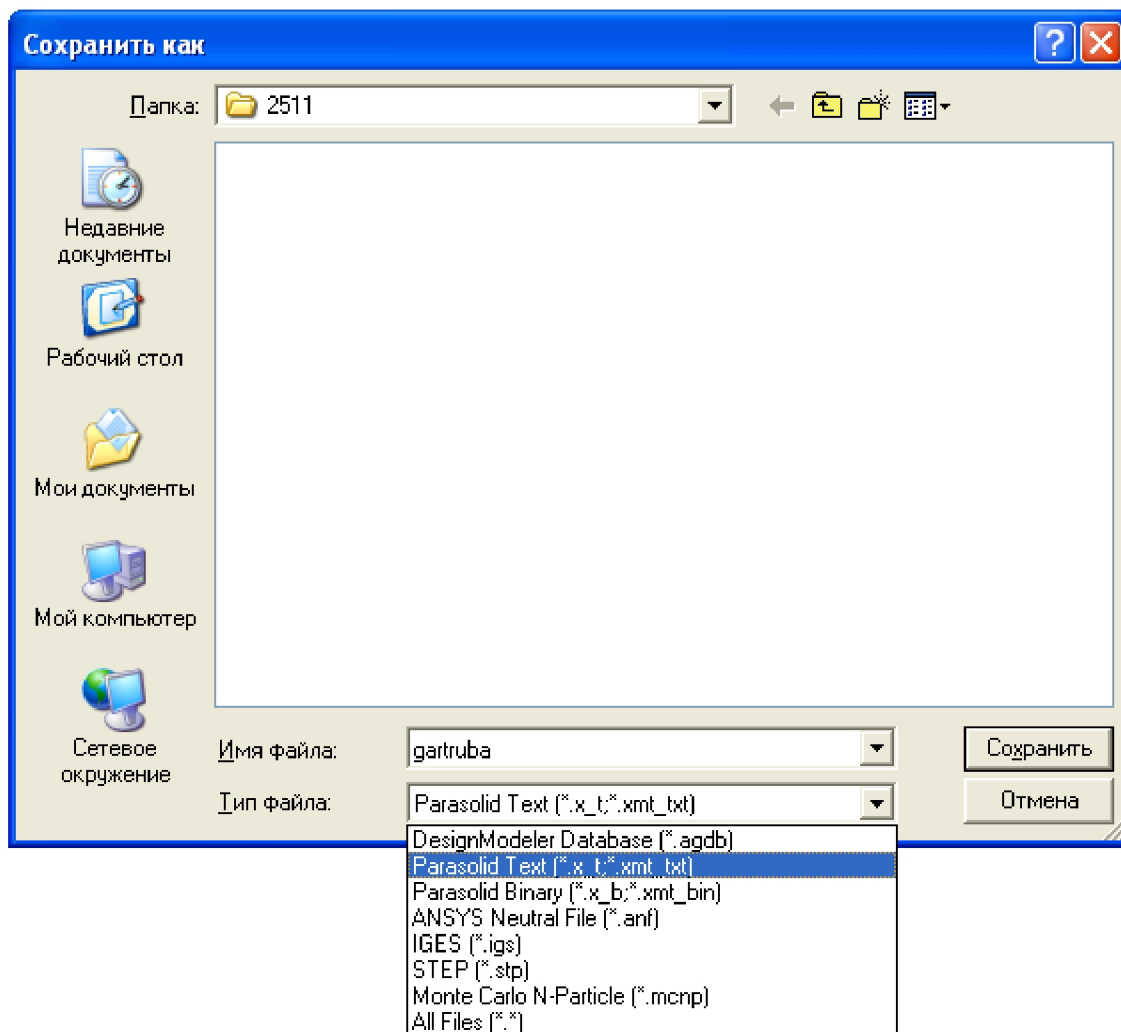


Рис.50

1. 4 Сборка элементов камеры сгорания

1. Открываем файл с корпусом КС.
2. Импортируем в него геометрическую модель завихрителя с форсункой (рис.51):

File->Import External Geometry File...

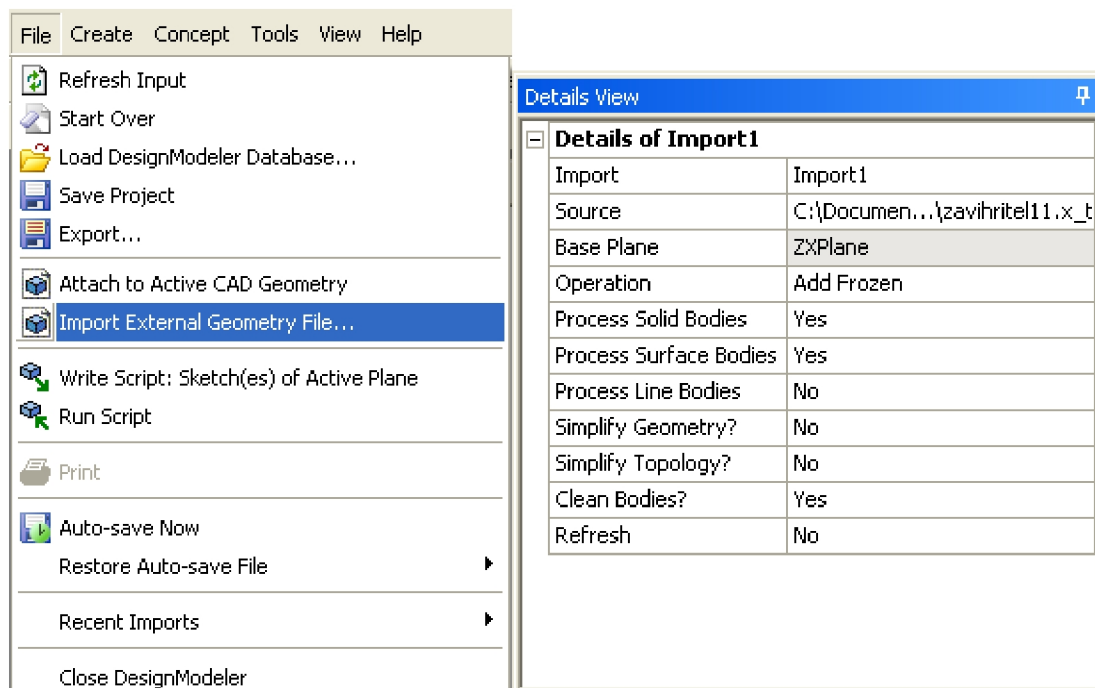


Рис.51

Получается следующая промежуточная картина (рис.52):

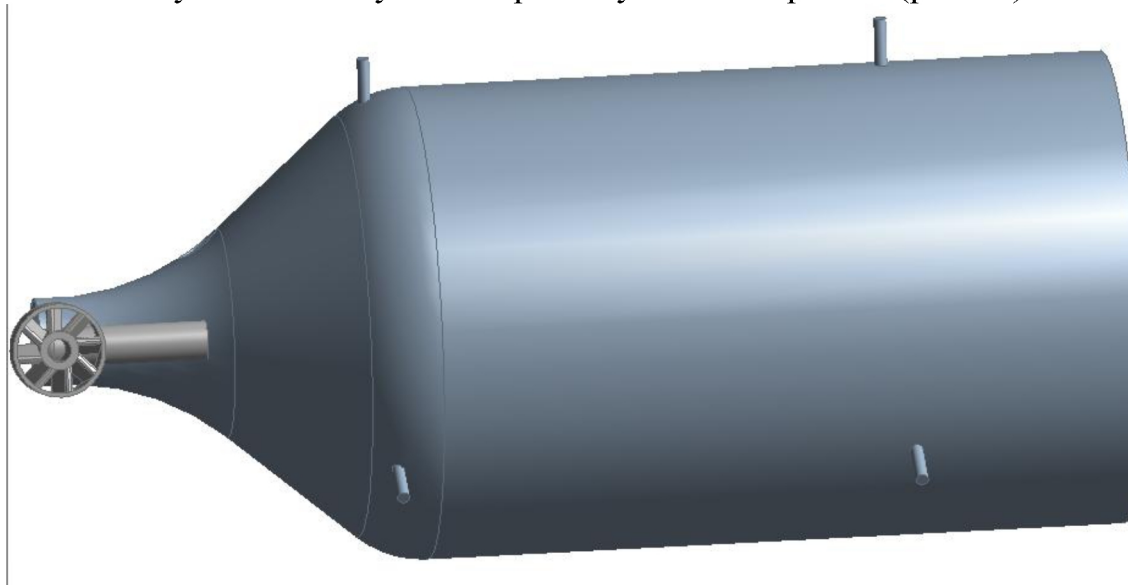


Рис.52

Теперь необходимо расположить форсунку в нужном направлении. Для этого вначале вращаем её на 90° относительно оси z (рис.53):

Create->Body Operation

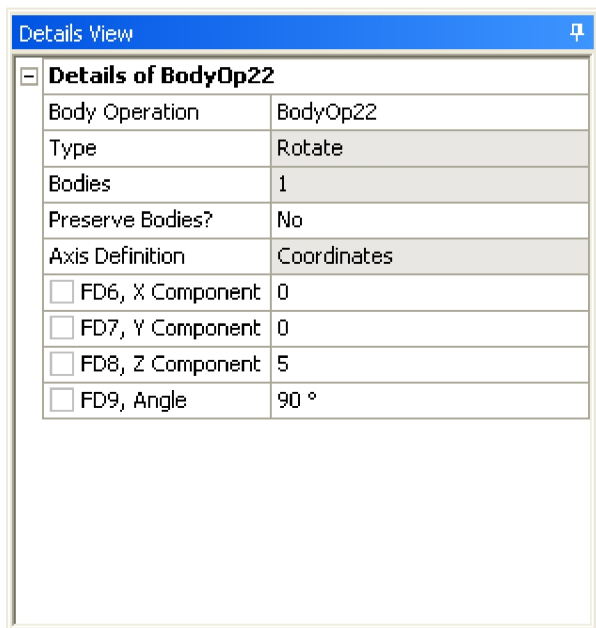
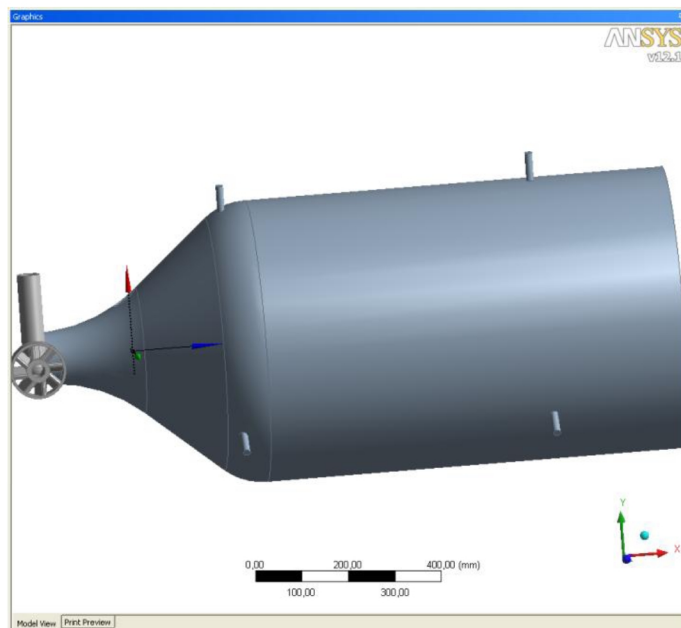


Рис.53



Затем аналогично выполняем вращение относительно оси Y (рис.54).

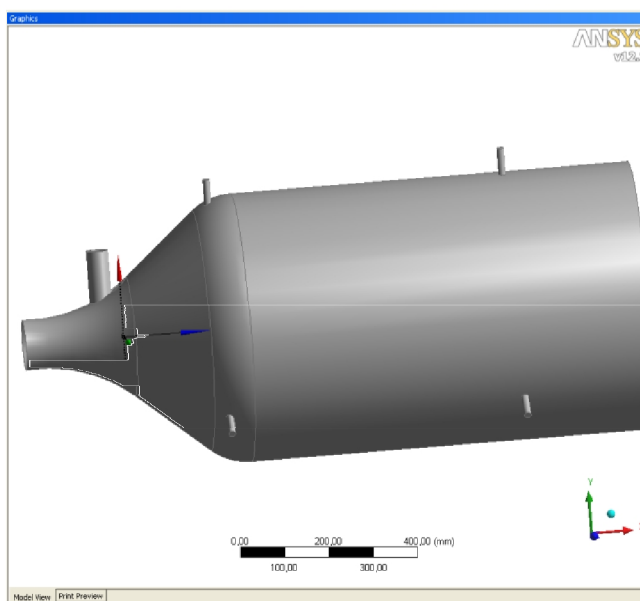


Рис.54

Теперь форсунка сориентирована в нужном направлении, и до нужного расположения необходимо только передвинуть её по оси X. Для этого создадим две новые плоскости (рис.55):

Create->New plane

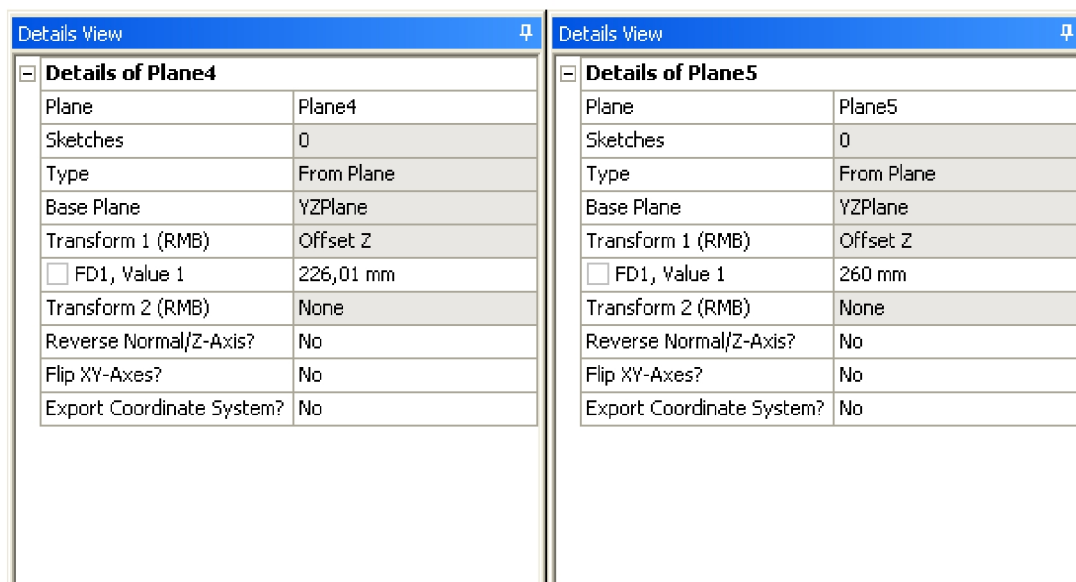


Рис.55

Двигаем форсунку от плоскости plane 4 до плоскости plane 5
(рис.56):
Create->Body operation

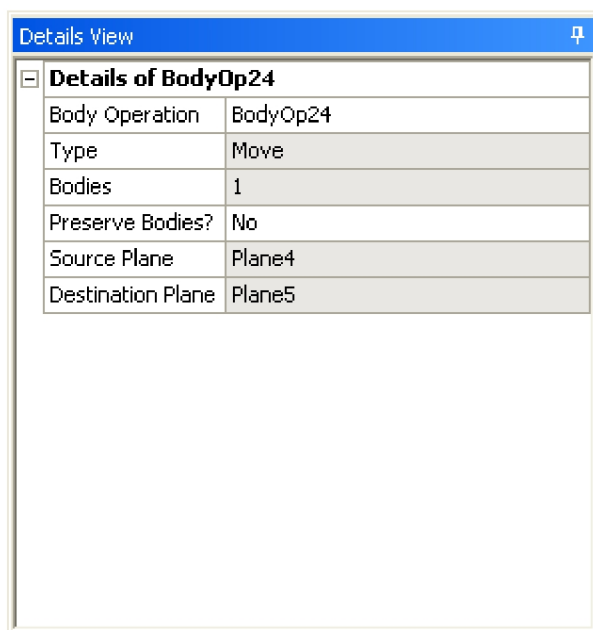


Рис.56

В результате получаем картину, представленную на рис.57:

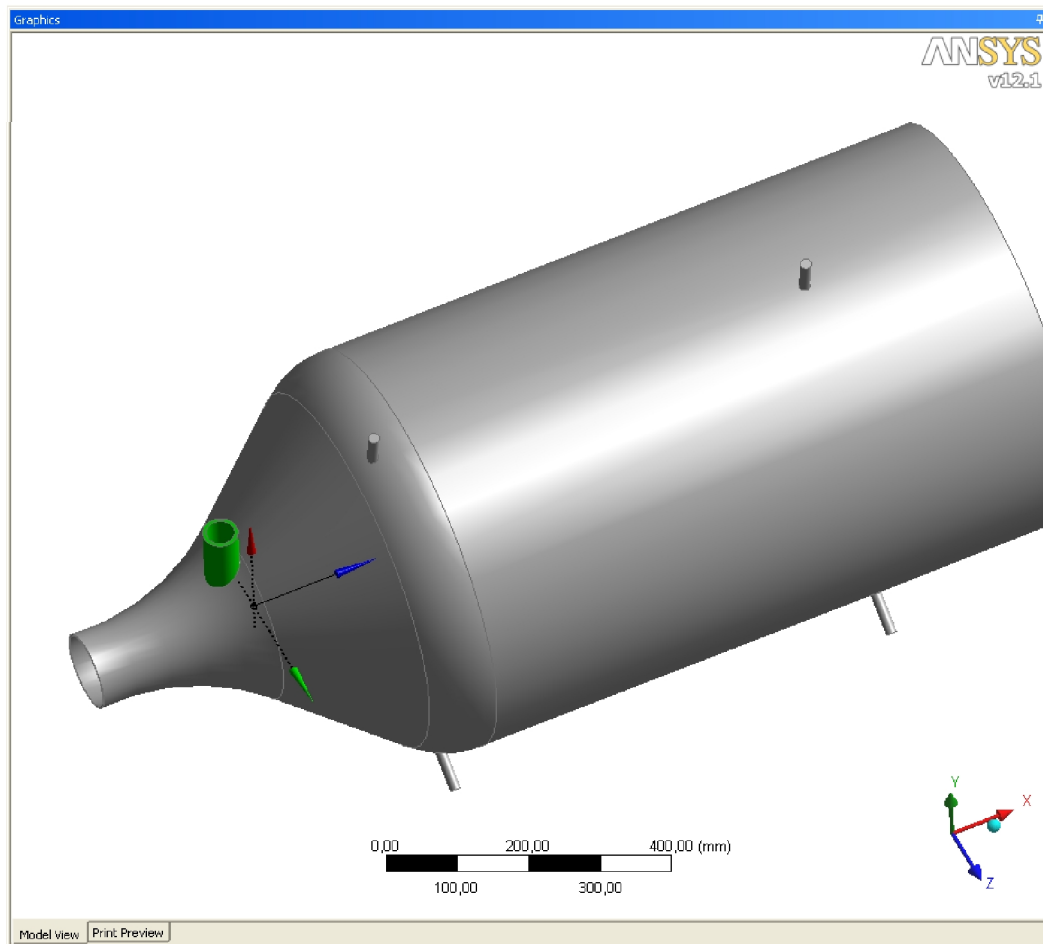


Рис.57

Перед импортом жаровой трубы необходимо закрепить корпус КС:
 Tools->Freeze
 Далее выделяем корпус и нажимаем Generate

Теперь нужно импортировать геометрическую модель жаровой трубы:
 File->Import External Geometry File...-рис.58.

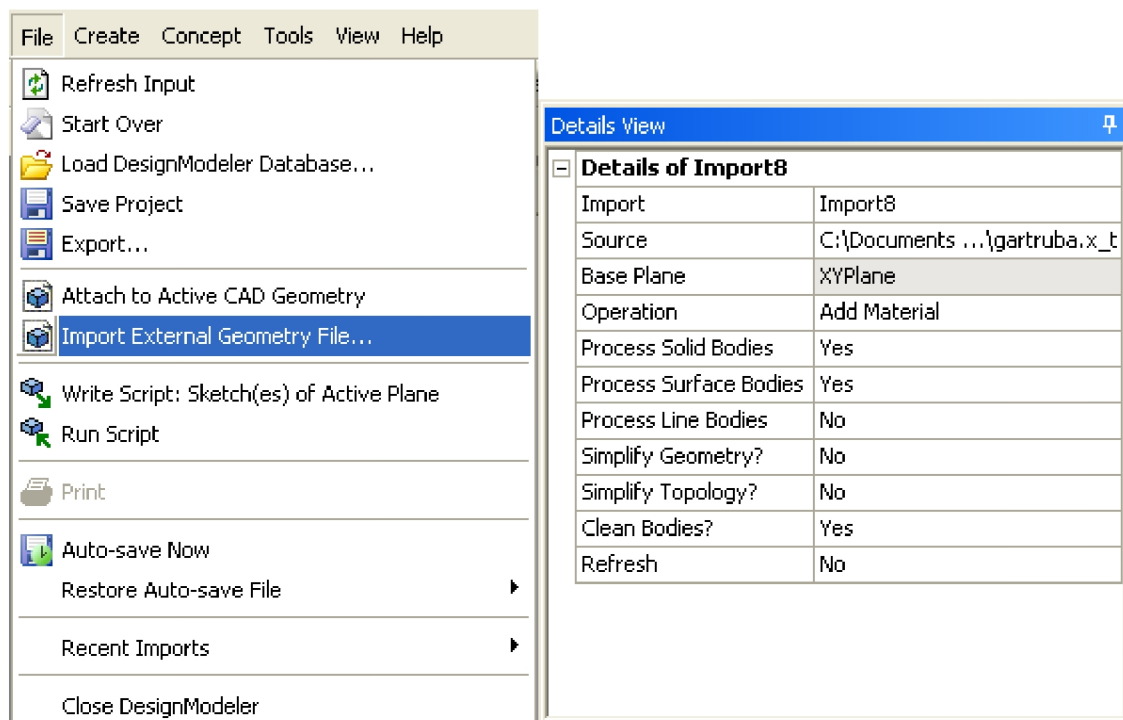


Рис.58

На дисплее получаем следующую картину (рис.59):

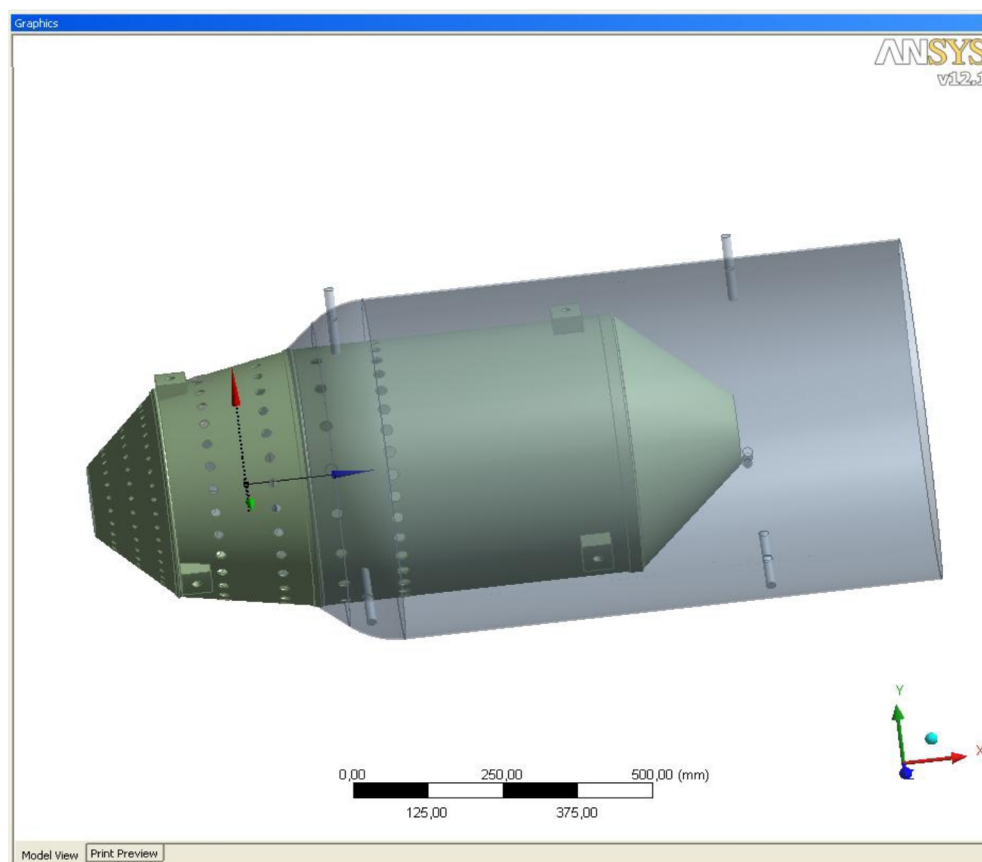


Рис.59

Из неё видно, что расположение жаровой трубы относительно корпуса КС, отличается от необходимого. Чтобы передвинуть её, создаём плоскость plane 6 (рис.60):
Create->New plane

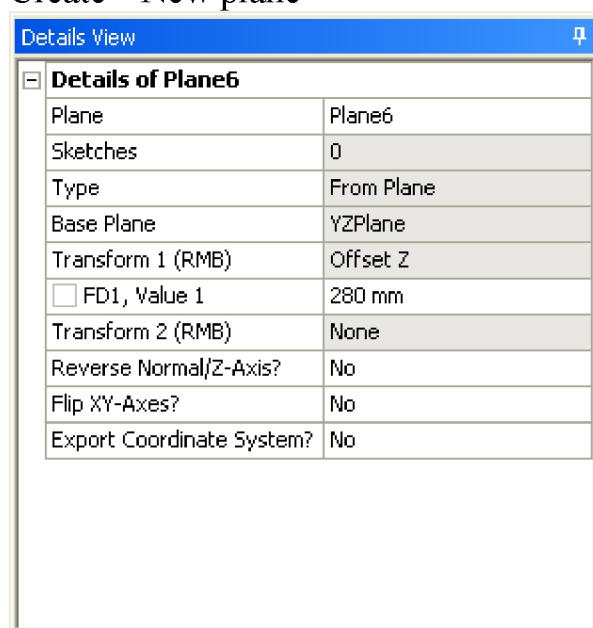


Рис.60

Двигаем модель жаровой трубы от плоскости ZY до плоскости plane 6 (рис.61):

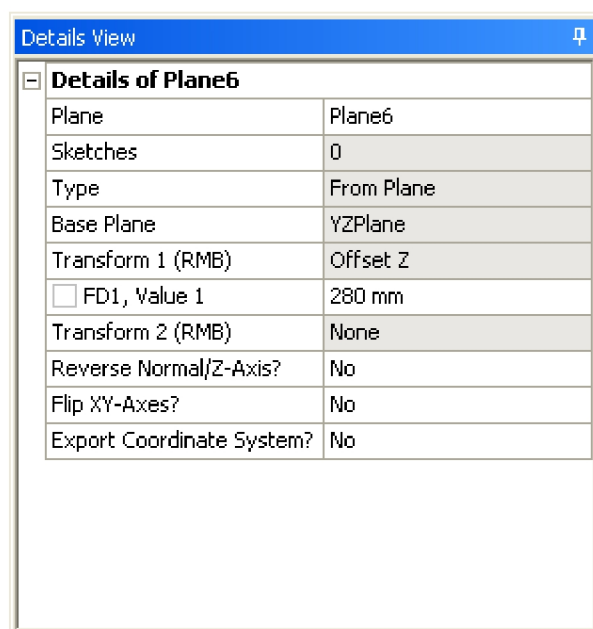


Рис.61

Получаем следующую картину (рис.62):

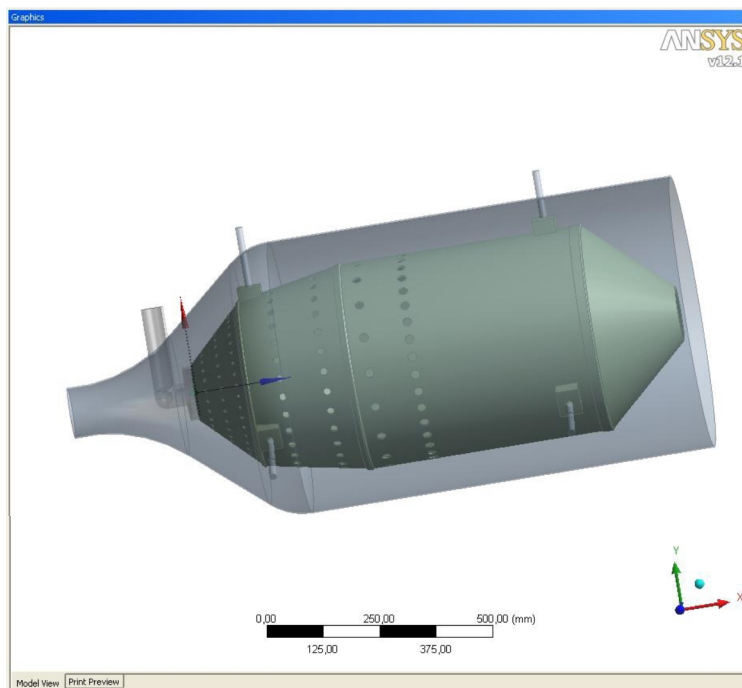


Рис.62

Модель КС практически готова. Объединяем все детали в одну модель (рис.63):

Tools->Unfreeze

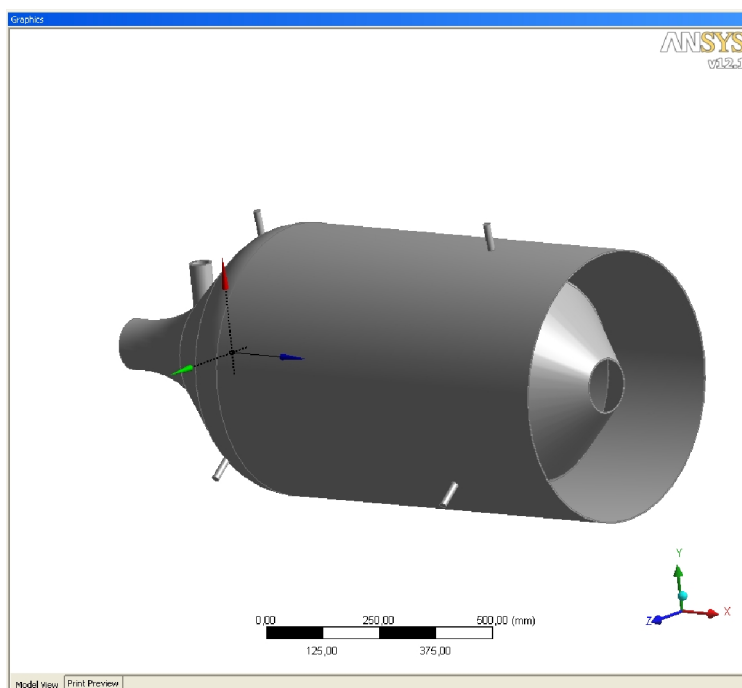


Рис.63

Построение геометрической модели камеры сгорания завершено.

Содержание отчёта

1. Схема камеры сгорания
2. Файлы с 3D-моделями элементов КС
3. 3D-модель камеры сгорания в сборе

Таблица 2 Варианты геометрии для построения модели камеры сгорания

Наименование размера	Номер варианта			
	1	2	3	4
Общая длина камеры сгорания, мм	1395	1395	1395	1395
Наибольший диаметр корпуса камеры, мм	602	602	602	602
Наибольший диаметр жаровой трубы, мм	462	462	462	462
Диаметр корпуса форсунки, мм	50	45	60	35
Большой диаметр крепления жаровой трубы к корпусу, мм	50	25	40	50
Меньший диаметр крепления жаровой трубы к корпусу, мм	25	25	30	30
Диаметр входа камеры, мм	108	115	130	145

Примечание: Размеры камеры сгорания, указанные на рис.8 соответствуют базовому варианту камеры сгорания (вариант №1), построение которого описано в данном пособии. Неуказанные в таблице размеры для других вариантов, по умолчанию следует принимать равными базовым. Изменяющиеся при введении новых размеров поверхности и линии следует выполнять, используя плавные переходы между сопряжениями.

Контрольные вопросы к зачёту по лабораторной работе

1. Для чего необходимо построение геометрических моделей камер сгорания ГТД?
2. Как можно выполнить построение корпуса КС?
3. Как выполняется построение геометрической модели форсунки?
4. Как построить геометрическую модель завихрителя?
5. Назовите порядок построения модели жаровой трубы.
6. Какие возможные варианты построения моделей корпуса, форсунки с завихрителем и жаровой трубы вы можете предложить?
7. Как выполняется сборка для элементов КС?

2. Расчет параметров течения газа в камере сгорания

Лабораторная работа №2

Цель работы: изучение методики и приобретение навыков расчёта параметров течения газа в камерах сгорания ГТД.

Задание:

- 1.Подготовить расчётную математическую модель для численного моделирования течения газа в КС ГТД.
- 2.Выполнить расчёт течения газа в КС ГТД.

Подготовка геометрических моделей камер сгорания ГТД к расчёту и его выполнение

Полный цикл расчёта КС ГТД и других технических объектов в САЕ-системах включает в себя: создание (или импорт) геометрии, генерацию сетки, настройку решателя, процесс решения и анализ результатов.

Построение геометрии КС может выполняться как средствами САЕ-системы, так и в какой-либо другой программе, при наличии возможности импорта полученной модели в САЕ-систему. Поскольку КС является сложным геометрическим объектом, как правило, с целью обеспечения последующей генерации сетки и экономии машинного времени при расчёте, при создании геометрической модели необходимо использовать упрощения исходного объекта. При этом основной задачей является использование рациональных подходов, когда при изменении геометрии имеет место минимальное отклонение расчётных процессов от реальных. Так, например, если какой-либо элемент находится в зоне течения, то при условии исследования данного течения, при упрощении данного элемента изменение структуры и параметров потока должно быть минимальным.

После построения (импорта) 3D модели камеры сгорания необходимо выполнить генерацию расчётной конечно-элементной сеточной модели, без которой невозможно численное моделирование. Перед генерацией сетки на модели КС необходимо выделить расчётную область, которая представляет собой область, через которую непосредственно происходит течение газа. Применительно к КС эта область обычно представляет собой полость, заключенную внутри корпуса камеры сгорания за вычетом находящихся в ней конструктивных элементов: форсунки с завихрителем, жаровой трубы и т.д. После получения модели расчётной области именно на ней осуществляется генерация конечно-элементной сетки, которая иногда требует особой квалификации и больших затрат времени. Проблемы и ошибки в генерации сетки обычно обусловлены сложностью геометрии

исходного объекта и связаны с наличием узких, игольчатых и малых поверхностей, микроэлементов, и т.д. Решение этих проблем осуществляется за счёт оптимизации геометрической модели, использования различных типов расчётных сеток (структурированных, неструктурированных, блочных) и методов их построения.

После этого выполняют задание граничных условий и настройку решателя. По своей сути, граничные и начальные условия, это дополнение к основному дифференциальному уравнению, заложенному в основу данного расчёта САЕ-системы, задающее его поведение на границе рассматриваемой области и в начальный момент времени.

После запуска расчёта его время определяется сложностью поставленной задачи и количеством конечных элементов в расчётной сетке.

Решение задачи завершается его визуализацией и представлением результатов, которые способствуют его анализу и формулированию выводов.

В отличие от традиционного, одномерного расчёта камер сгорания, численное моделирование позволяет получать не только интегрированные картины распределения параметров в сечениях КС, но и распределение параметров непосредственно в рассматриваемых сечениях, что даёт более полную характеристику протекающих там процессов.

При больших преимуществах, которые получает инженер, моделируя процессы в технических устройствах с помощью САЕ-систем, необходимо отметить, что качественное использование этого инструмента возможно лишь при знании особенностей его применения. Решению этой задачи в плане приобретения первоначальных навыков расчёта КС и способствует данная лабораторная работа.

Выполнение лабораторной работы

В начале лабораторной работы преподаватель выдаёт минигруппам из двух –трёх студентов файл с геометрической моделью КС. В качестве варианта возможно использование выполненной ими в лабораторной работе №1 модели. На базе полученной (имеющейся) геометрической модели выполняется расчёт течения газового потока в КС в последовательности, описанной в данной лабораторной работе. Результаты расчёта обратываются в виде графиков и демонстрируются преподавателю.

2.1 Создание конечно-элементной сетки расчётной области камеры сгорания

В главном меню выбираем пункт Fluid Flow (FLUENT).

Далее в появившемся меню Geometry->Import Geometry->Browse-> выбираем файл прототипа КС - рис. 64.

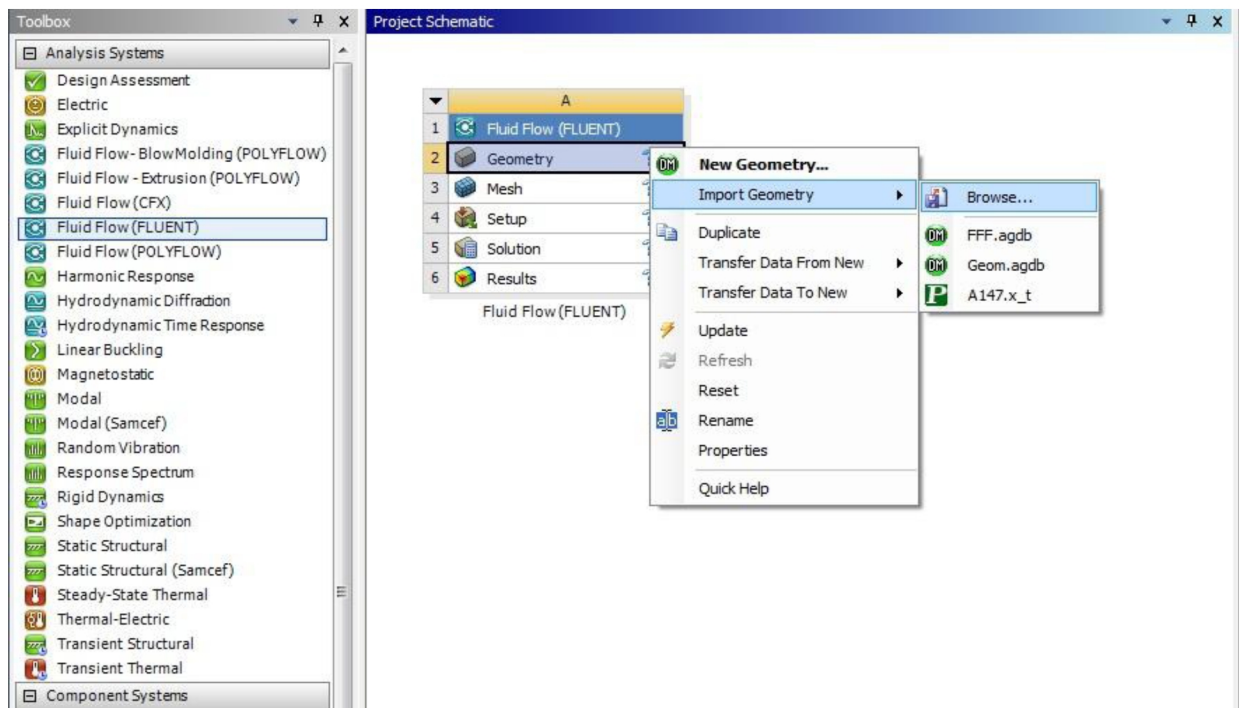


Рис. 64

В открывшемся окне, в панели инструментов выбираем вкладку Mesh-
рис. 65.

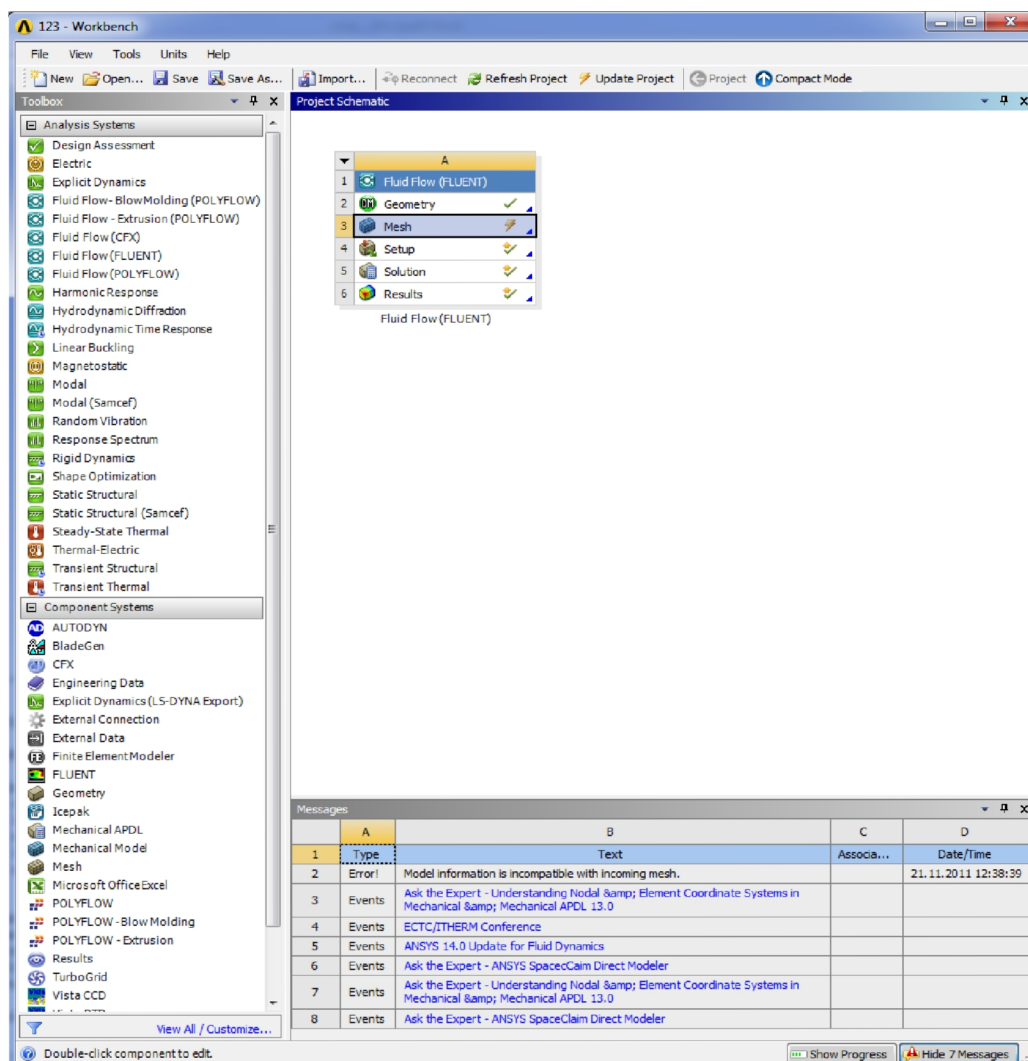


Рис. 65

Затем для задания вида расчёта последовательно выполняем следующие операции: Mesh => Insert => Method.

Щёлкаем мышкой на модель –см.рис. 66 и рис. 67.

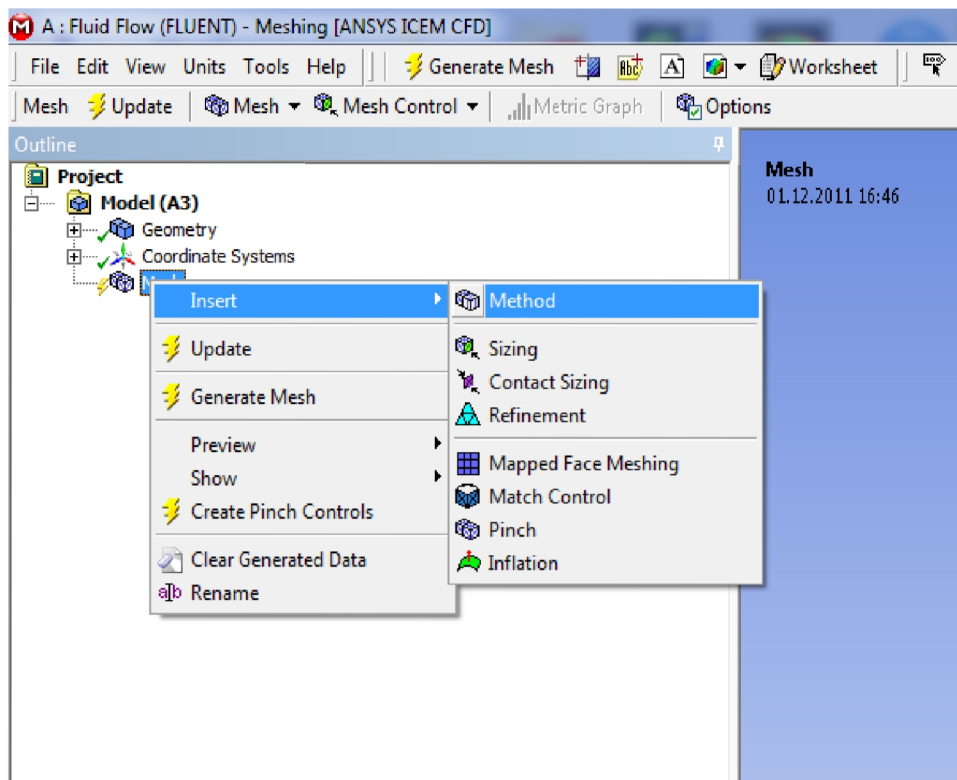


Рис. 66

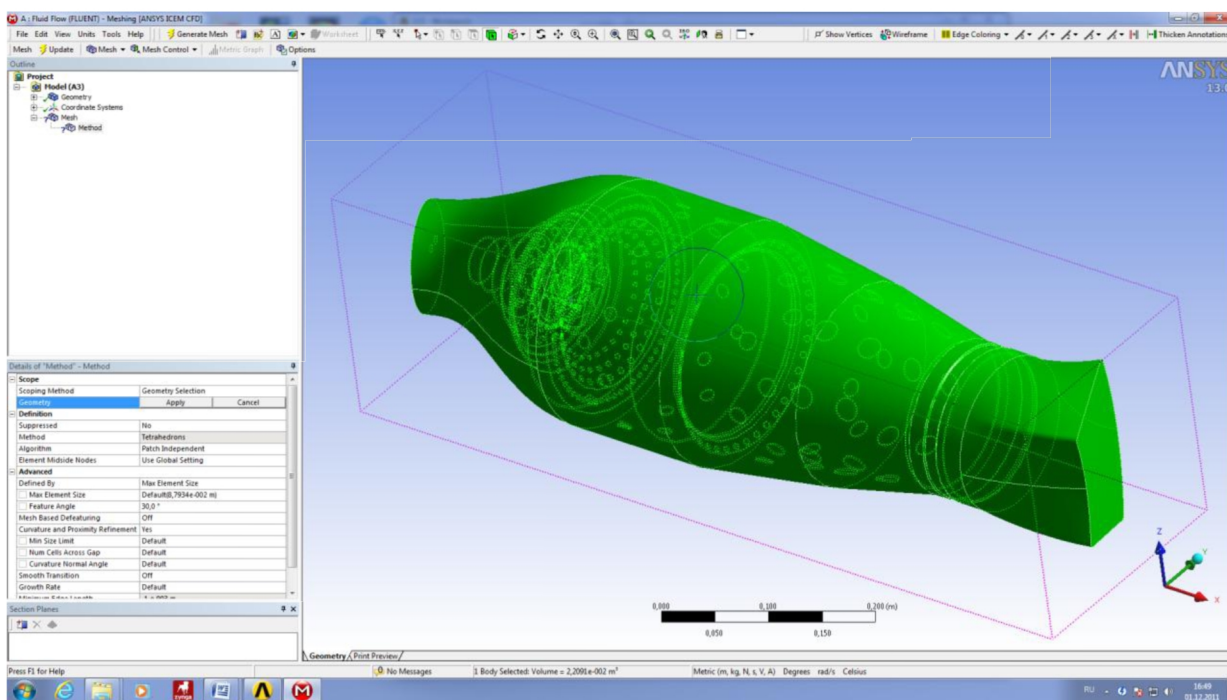


Рис. 67

В нижнем левом углу, в появившемся окне нажимаем Apply.

Для задания способа разбиения сетки в появившемся в нижнем левом углу окне выбираем :

Defaults => Physics Preference => CFD Sizing => Use Advanced Size Function => On: Curvature (рис.5).

Остальные пункты оставляем по умолчанию.

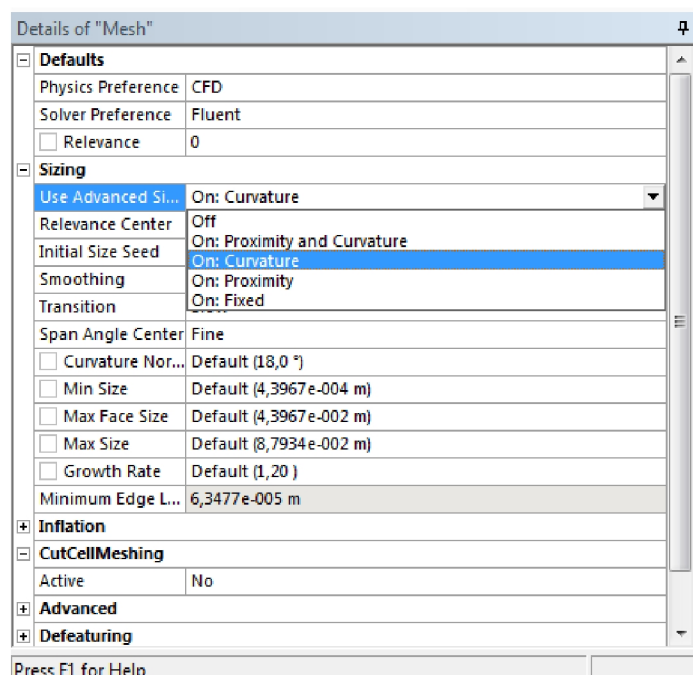


Рис. 68

Нажимаем кнопку Update, после чего происходит наложение сетки - рис. 69.

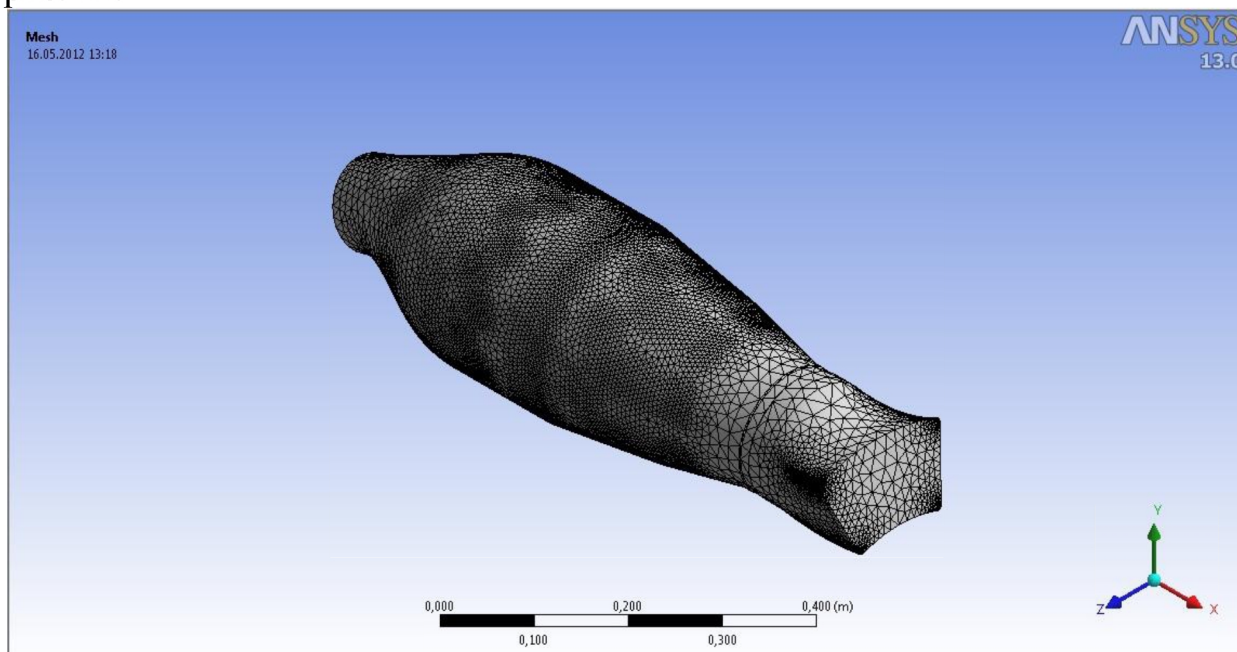


Рис. 69

Внимание! От качества сетки напрямую зависят точность, сходимость и скорость решения. Качество сгенерированной сеточной модели и её пригодность для выполнения расчётов окончательно можно оценить только после её тестирования в расчётах и валидации их данных на базе реального эксперимента. В некоторых случаях возникает необходимость в доработке сеточной модели. До проведения расчётов обычно используют определенные рекомендации по построению сетки. Так, для получения решения дифференциального уравнения с требуемой точностью при минимальных затратах ресурсов ЭВМ, ячейки расчетной сетки должны обладать малой скошенностью, то есть по возможности она должна быть ортогонализированной. Для точного моделирования процессов, например в пристеночных областях и отверстиях,

необходимо размещать в них конечные элементы в количестве, не менее рекомендованного для этих целей.

2.2 Задание граничных условий и настроек решателя

Левой кнопкой мыши выбираем плоскость, соответствующую входу в КС, а нажав правую кнопку, выбираем пункт Create Named Selection-рис. 70.

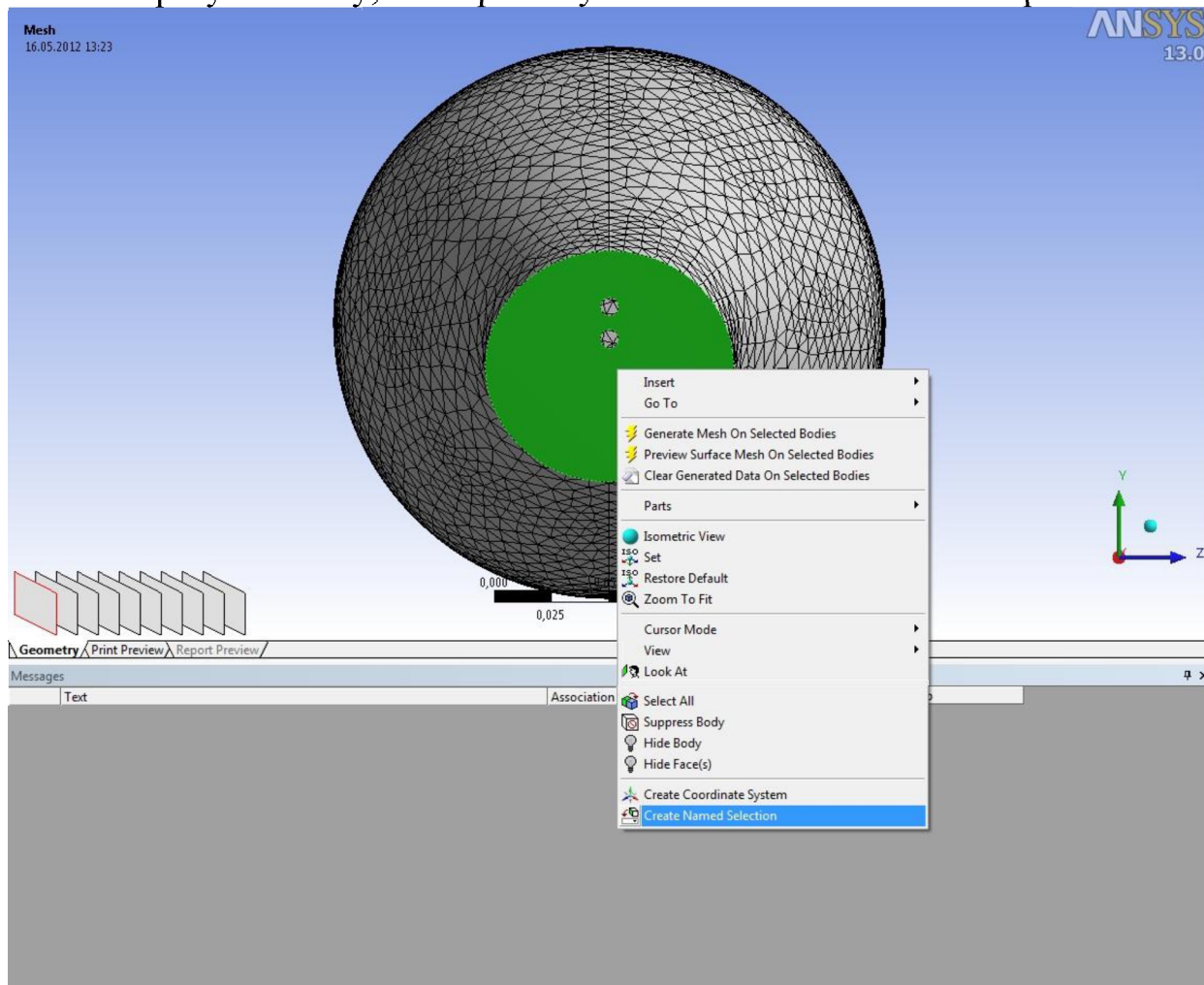


Рис.70

Вводим название (inlet) и нажимаем ОК –см.рис. 71.

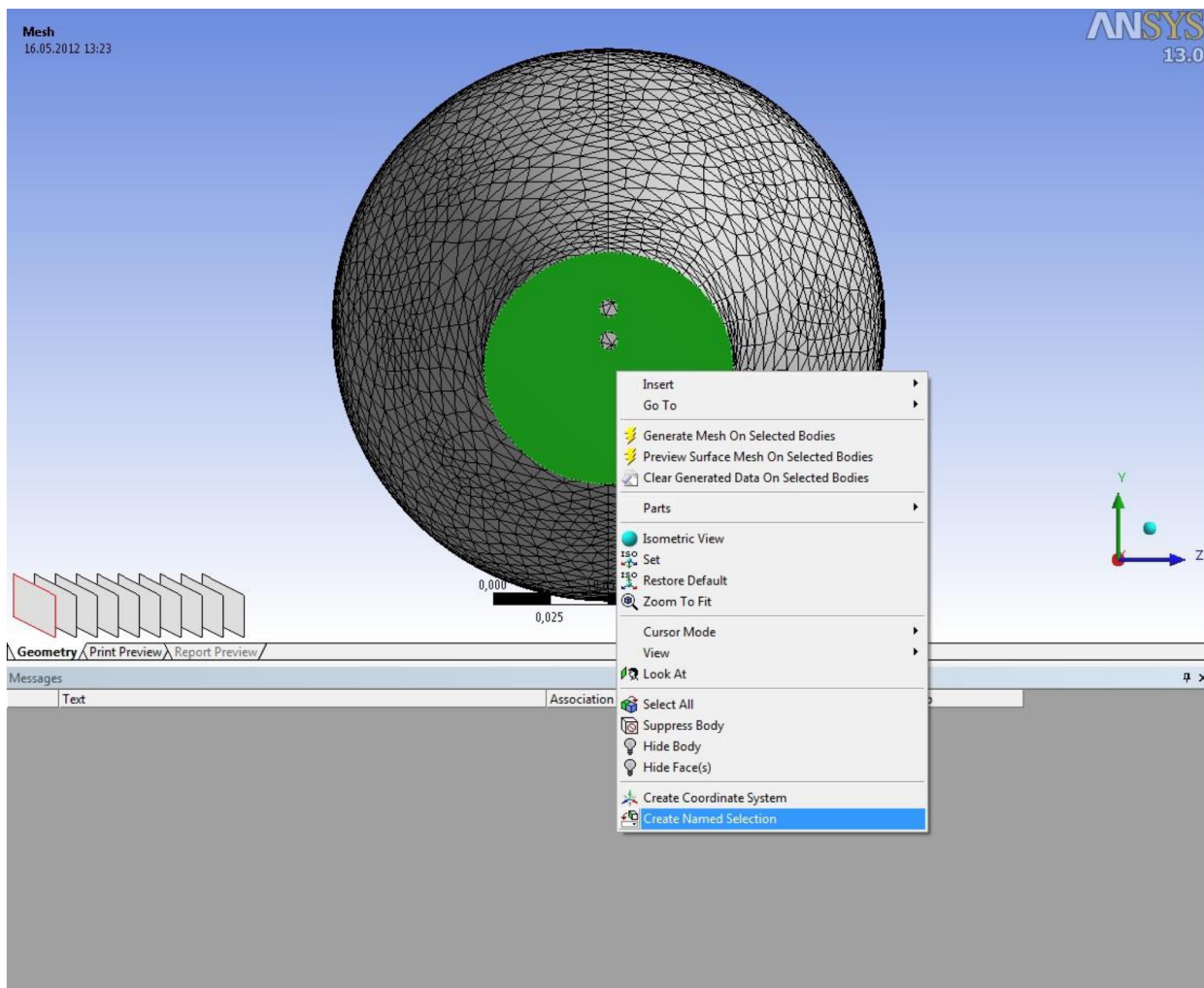


Рис. 71

Выполняем аналогичные действия для плоскости, соответствующей выходу из КС (outlet)-рис. 72.

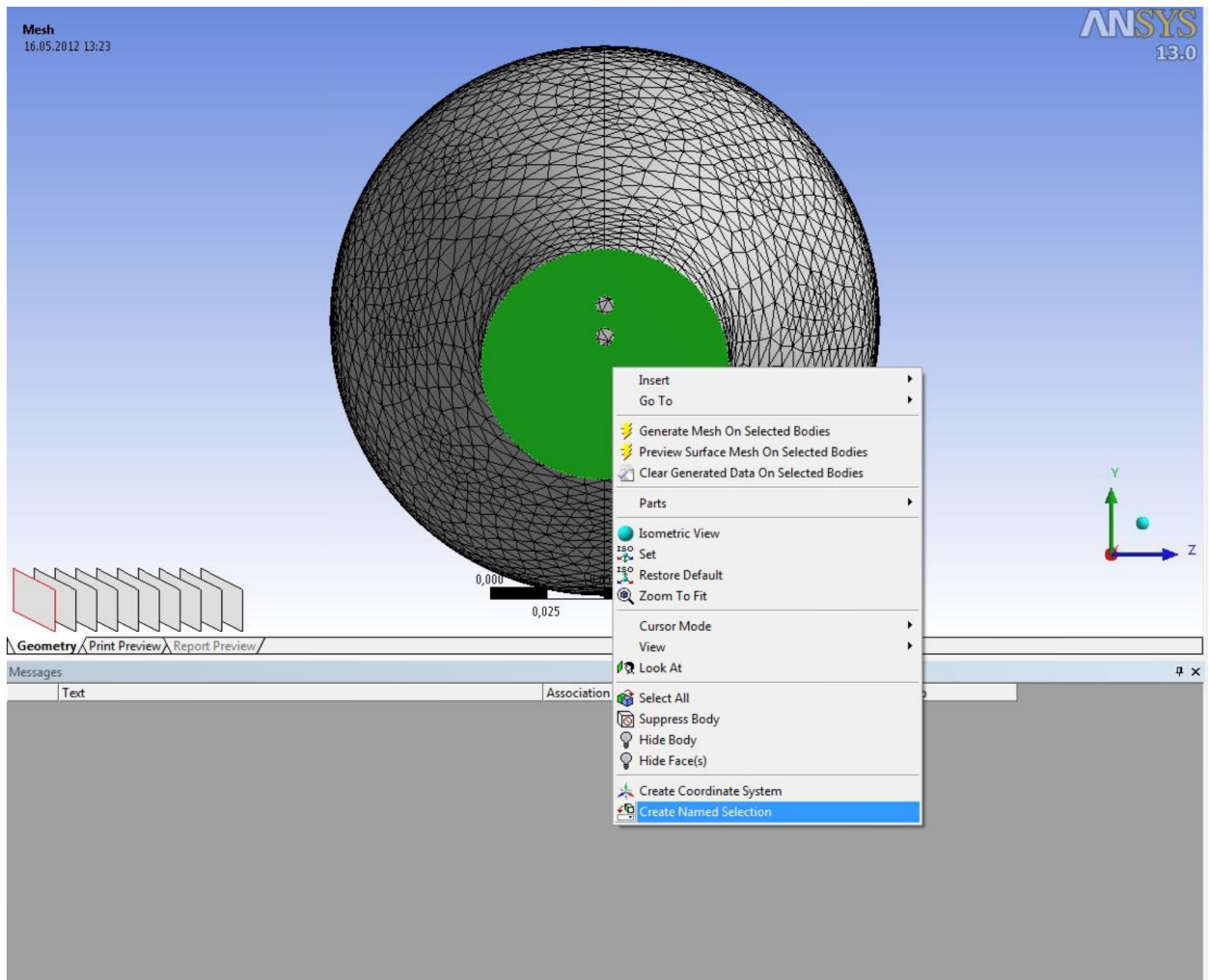


Рис. 72

Далее закрываем Mesh и переходим в Setup (рис.73).

Project Schematic

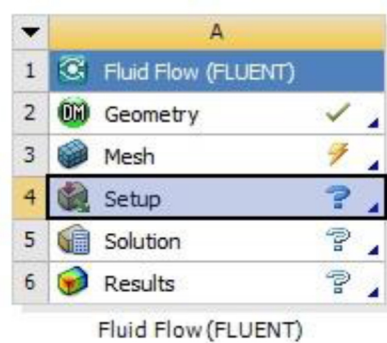


Рис. 73

Нажимаем ОК (рис. 74).

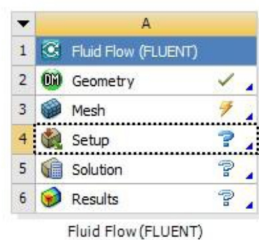


Рис. 74

Получаем картину, показанную на рис. 75

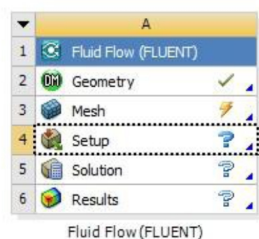


Рис. 75

Чтобы в расчете использовалось уравнение энергии, в пункте Models включаем Energy-On =>Ок (рис. 76).

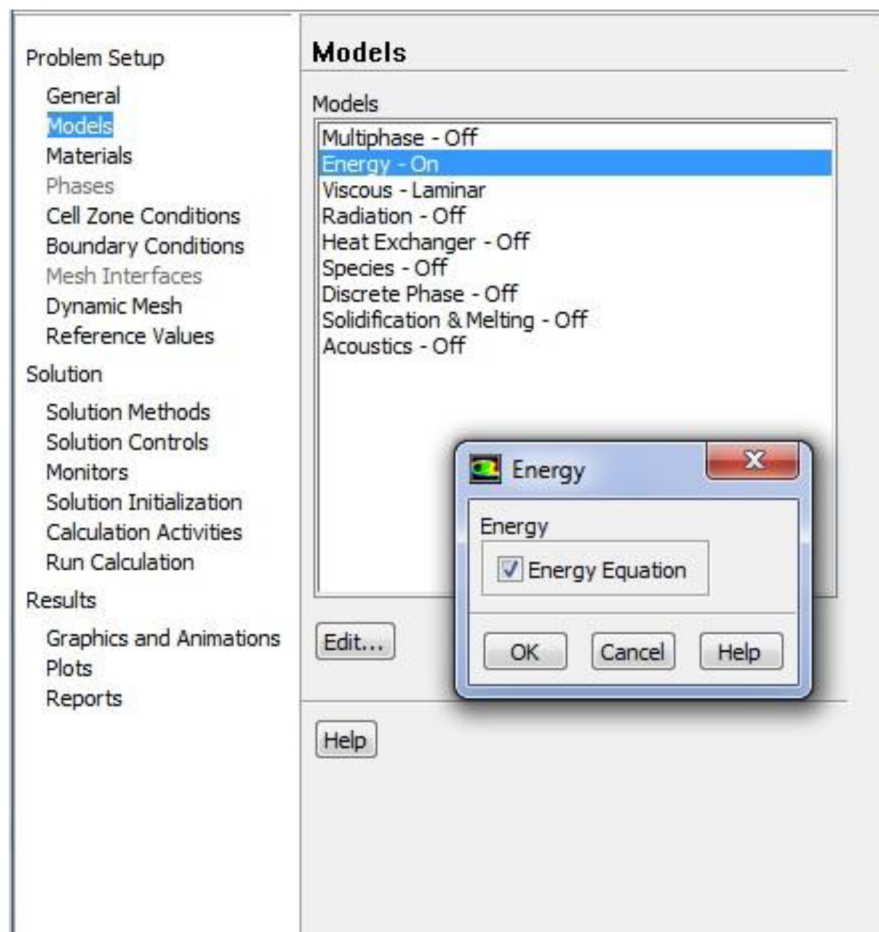


Рис. 76

Для учёта вязкости газа в том же пункте выбираем Viscous, затем задаём параметры, как показано на рисунке 77.

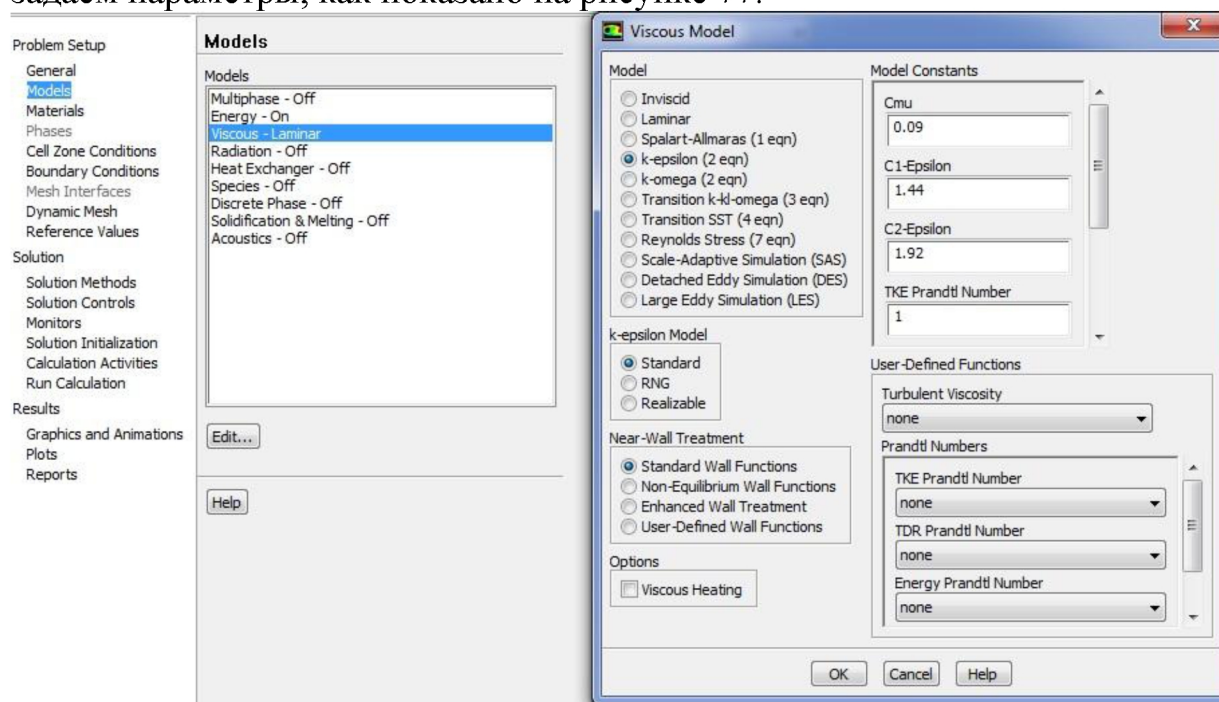


Рис. 77

Далее задаём свойства рабочего тела: Materials=>air=>constant=>ideal-gas=>Change/Create (рис. 78).

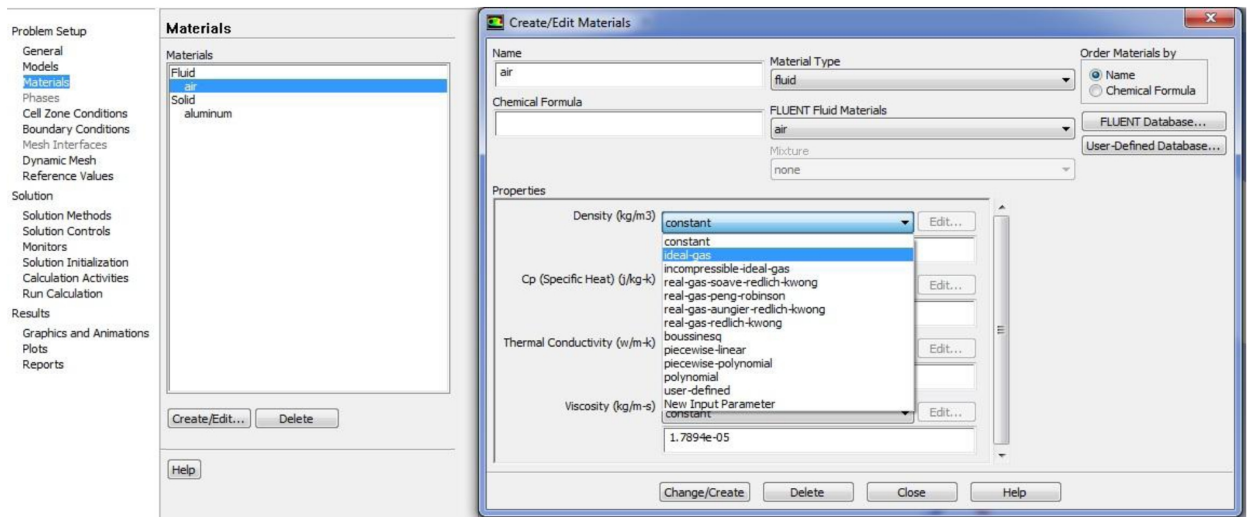


Рис. 78

Выбираем Boudari Condition=>inlet=>Edit=>Gauge Total Pressure (3500000), Supersonic/Initial Gauge Pressure (0.9 Gauge Total Pressure) =>Ok, далее выбираем вкладку Thermal=>Total Temperature (300) =>Ok (рис.79, 80, 81). Входные параметры заданы.

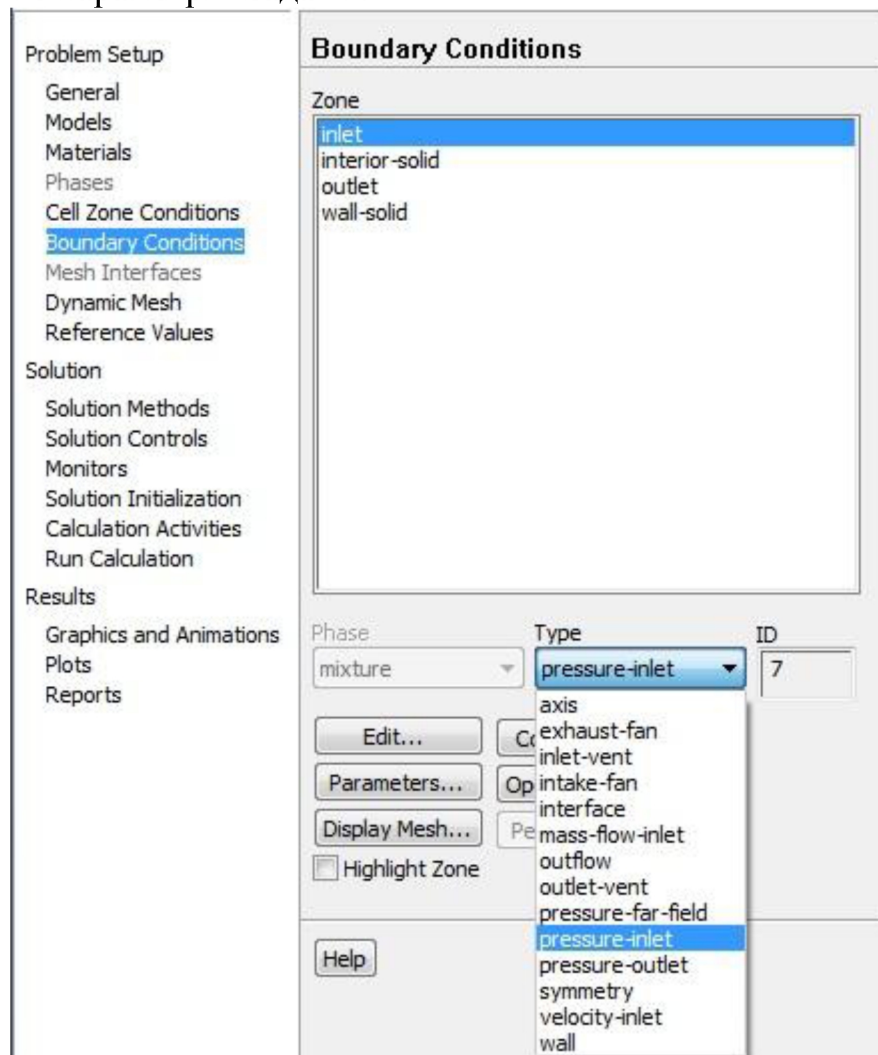


Рис.79

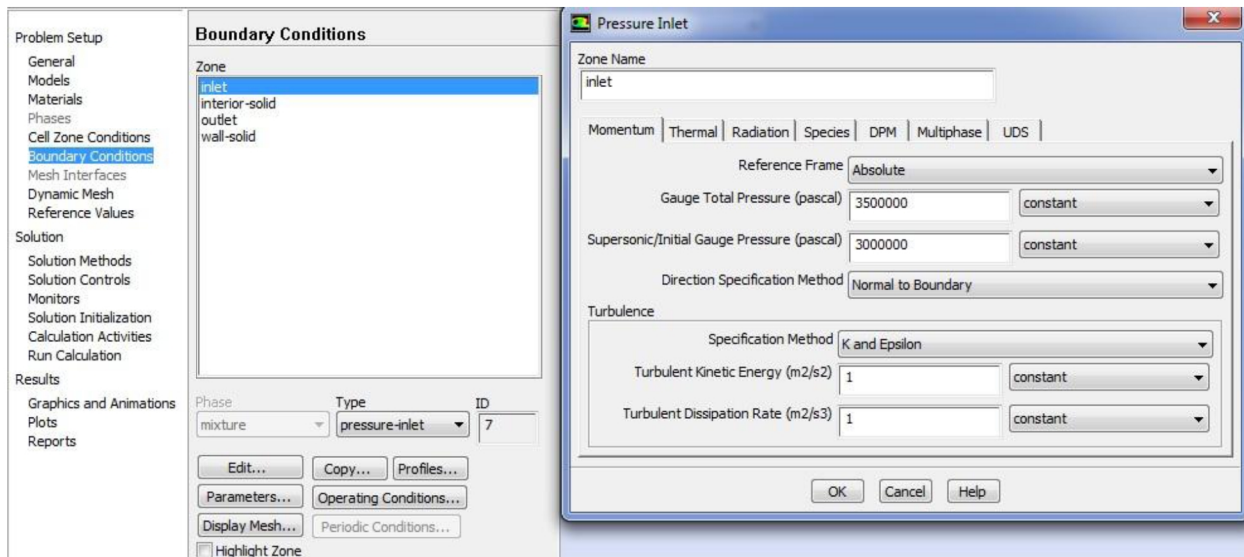


Рис.80

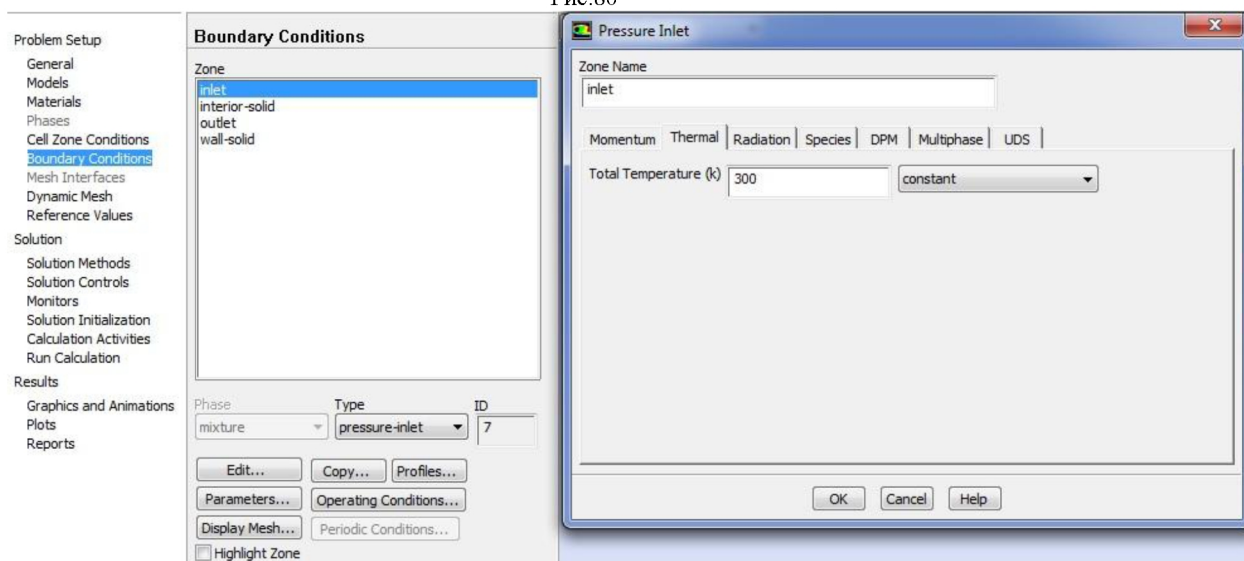


Рис.81

Аналогично задаём выходные параметры-рис.82

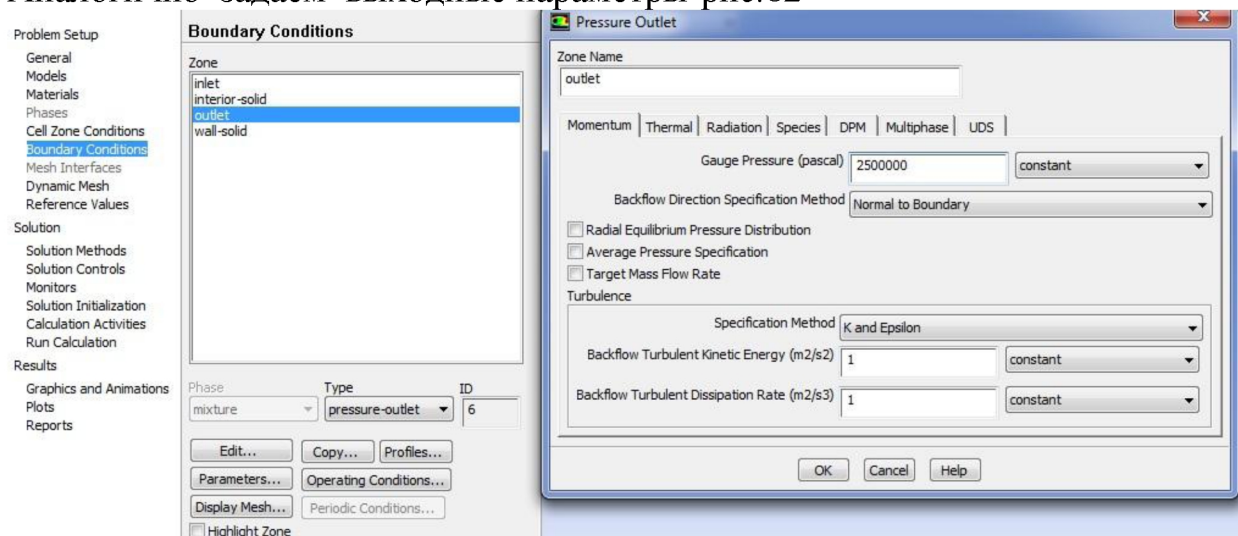


Рис.82

2.3 Выполнение расчёта

В пункте Run Calculation устанавливаем количество итераций 1000, задавая количество приближений и нажимаем кнопку Calculate-рис.83.

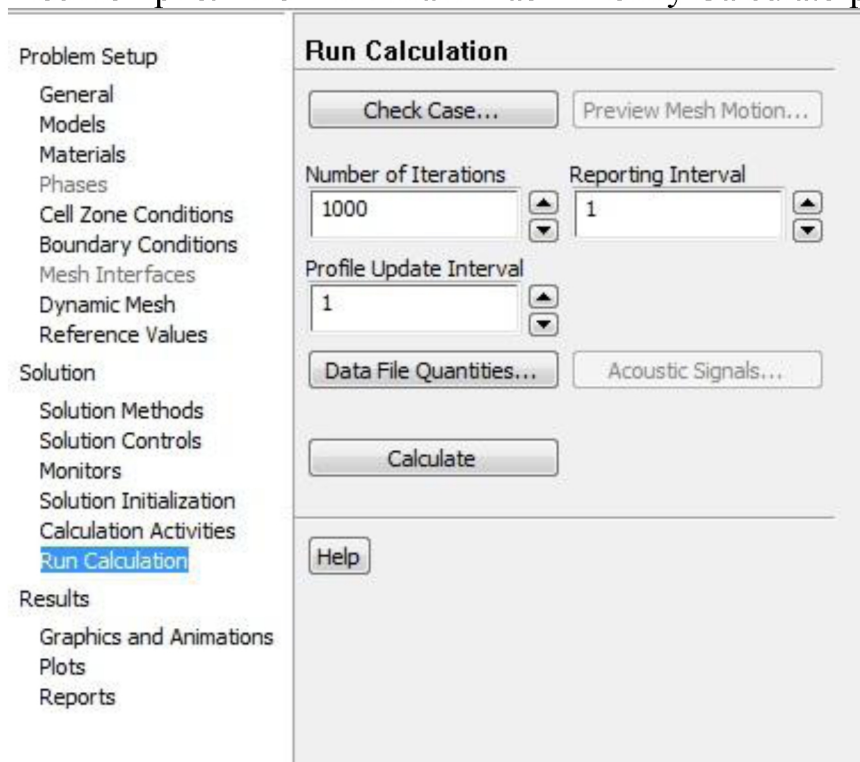


Рис.83

Запускается процесс расчёта, ожидаем его окончания (рис.84).



Рис.84

2.4 Представление результатов расчёта

По завершении расчёта выходим из Solution и заходим в Results-рис.85.

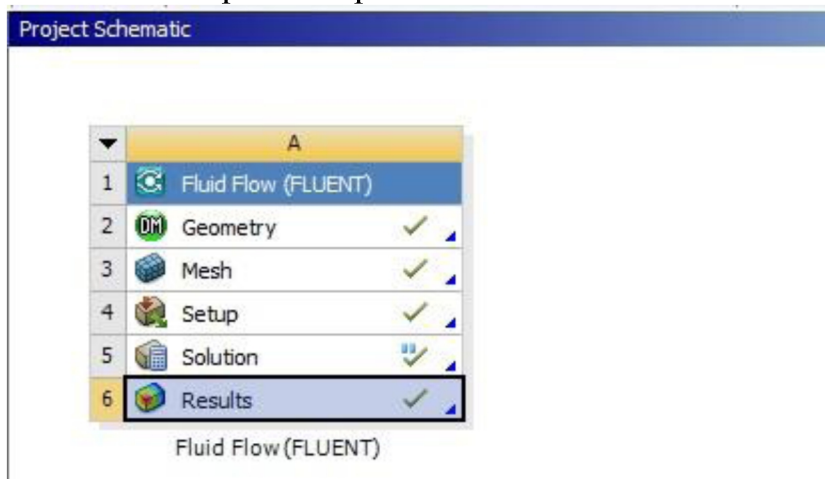


Рис.85

С помощью вкладки Location создаём плоскости, объёмы, линии и т.д. на которых будут отражены результаты расчётов-рис.86, 87.

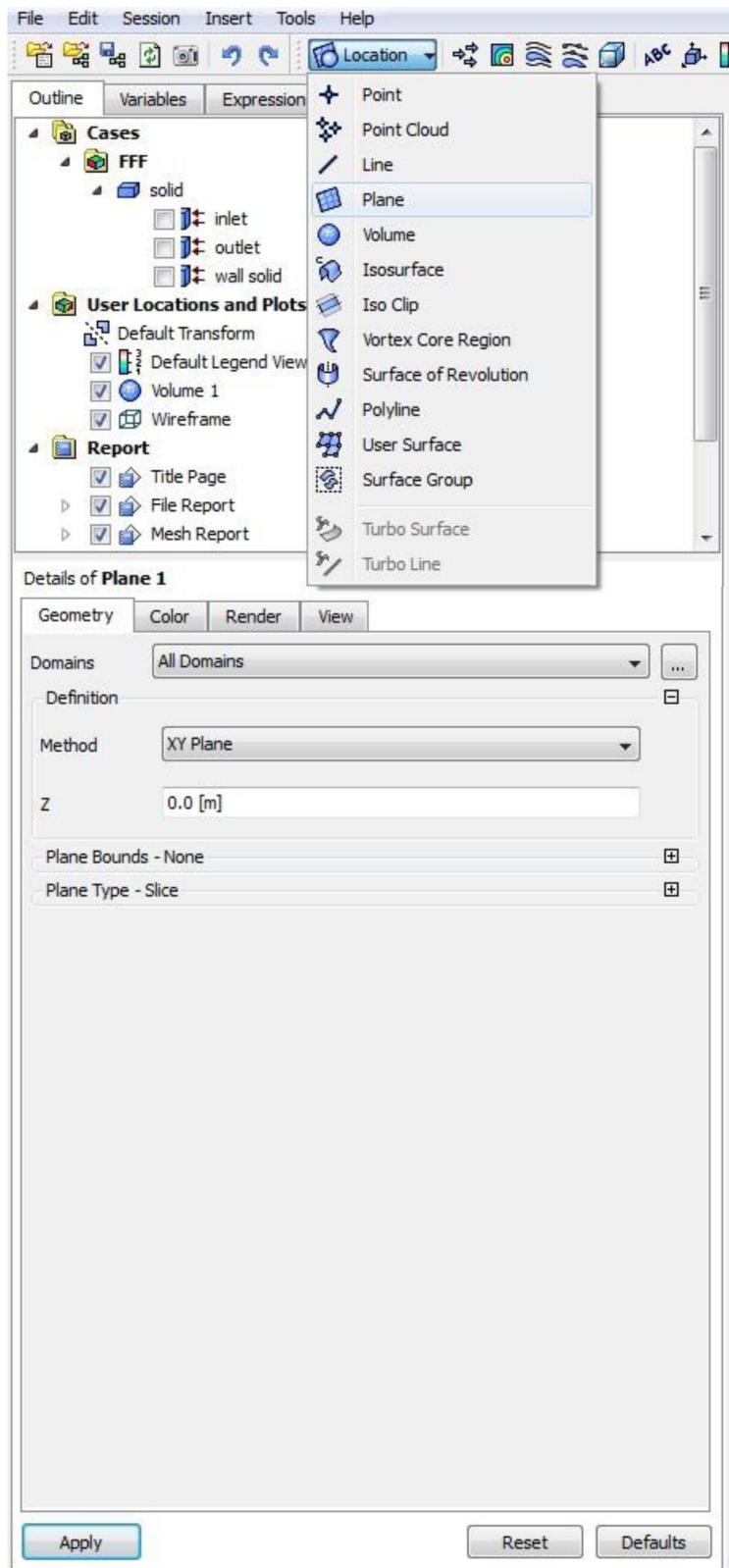


Рис.86

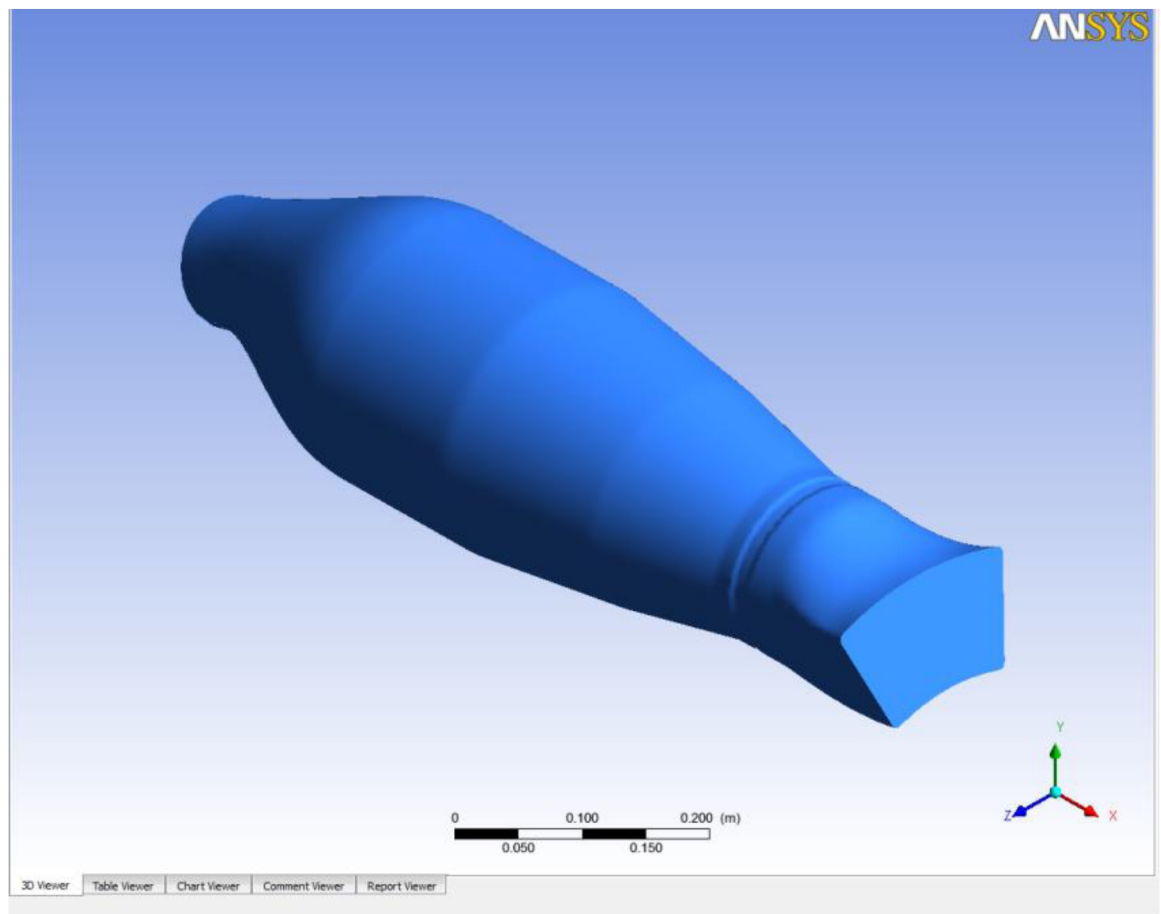


Рис.87

С помощью кнопок Vector, Contour, Streamline выбираем форму и параметры результатов расчёта (рис.88, 89).

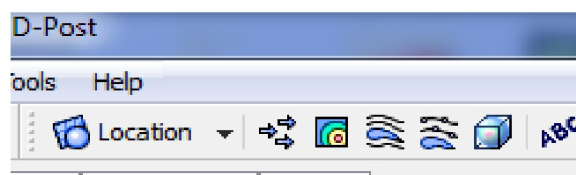


Рис.88

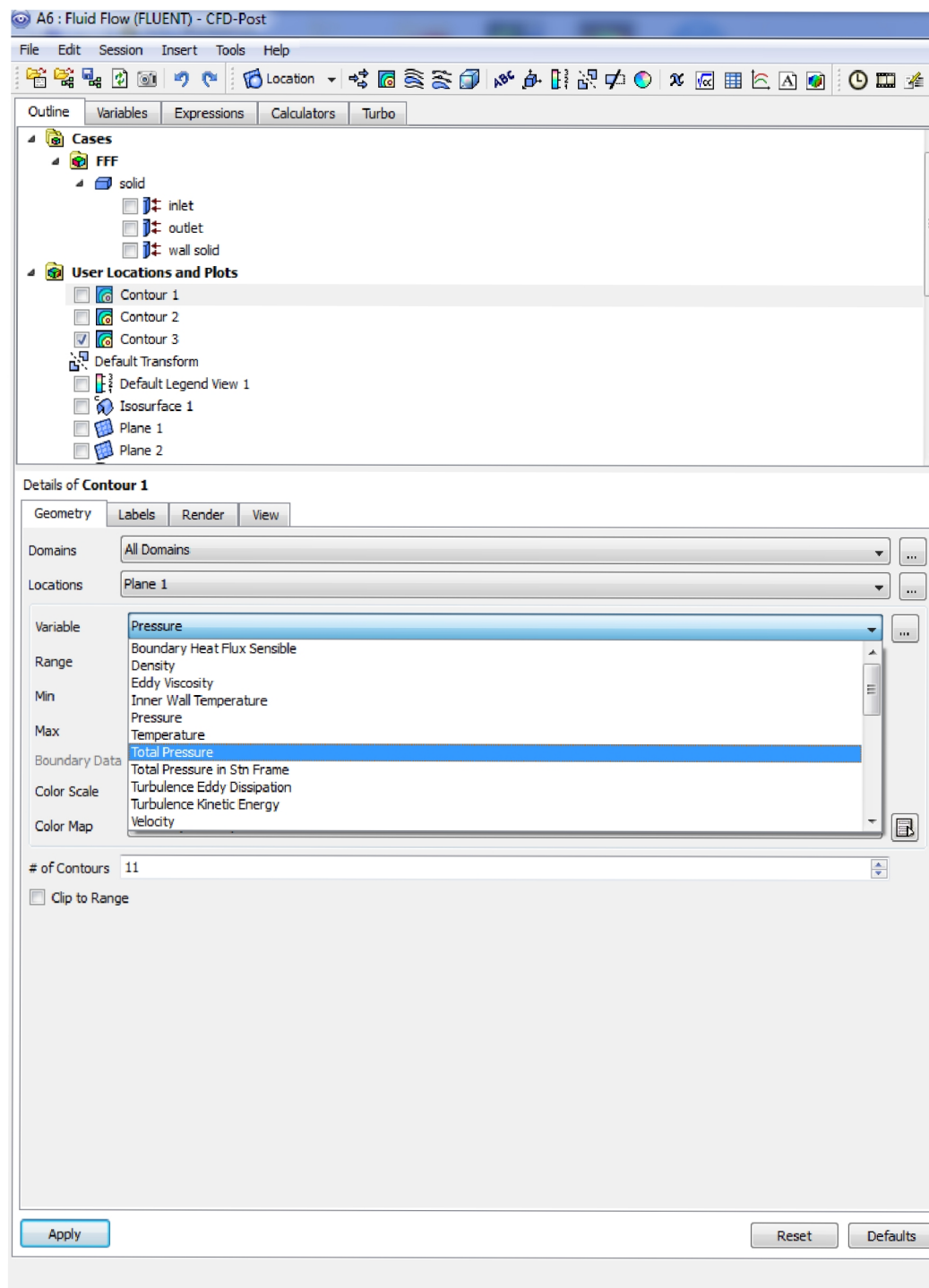


Рис.89

На рис. 90 показаны линии тока для газового потока в КС. Такие картины полезны для определения размеров зон обратных токов, местоположения застойных зон и т.д. На базе их анализа в совокупности с анализом других результатов расчётов, возможно совершенствование рабочего процесса для различных режимов работы ГТД и его камеры сгорания.

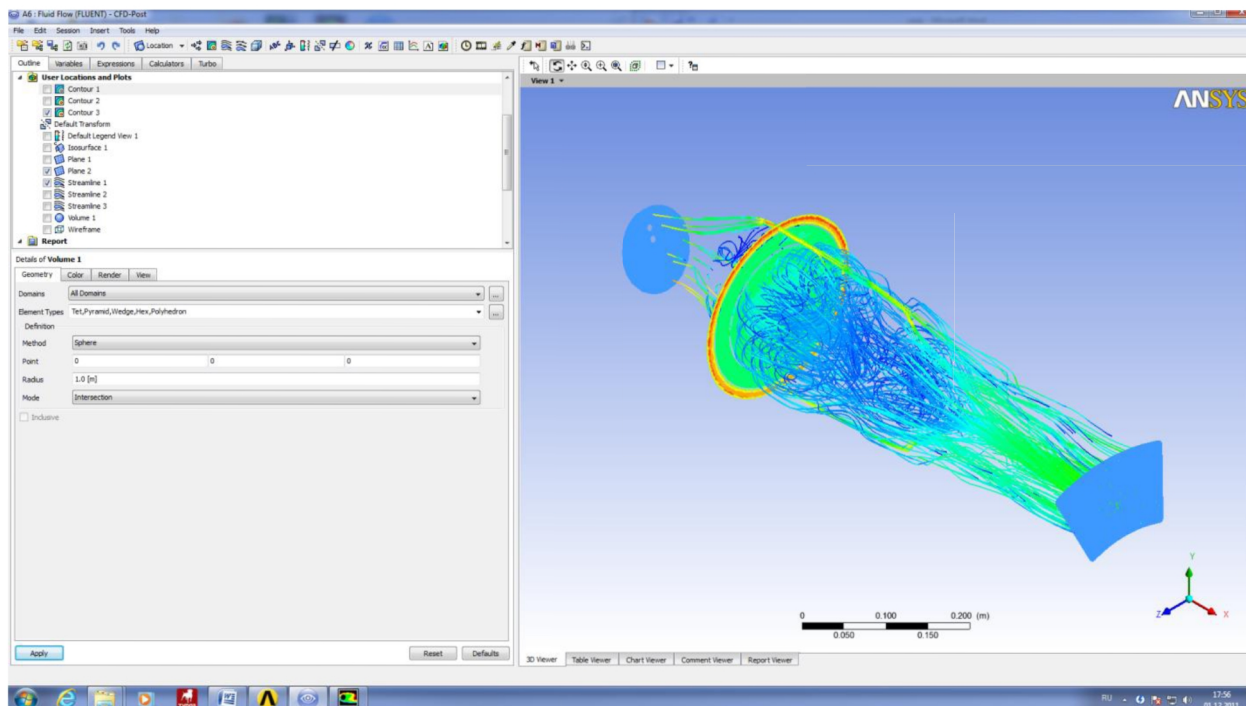


Рис. 90

На рис. 91 показано изменение скорости газового потока в КС.

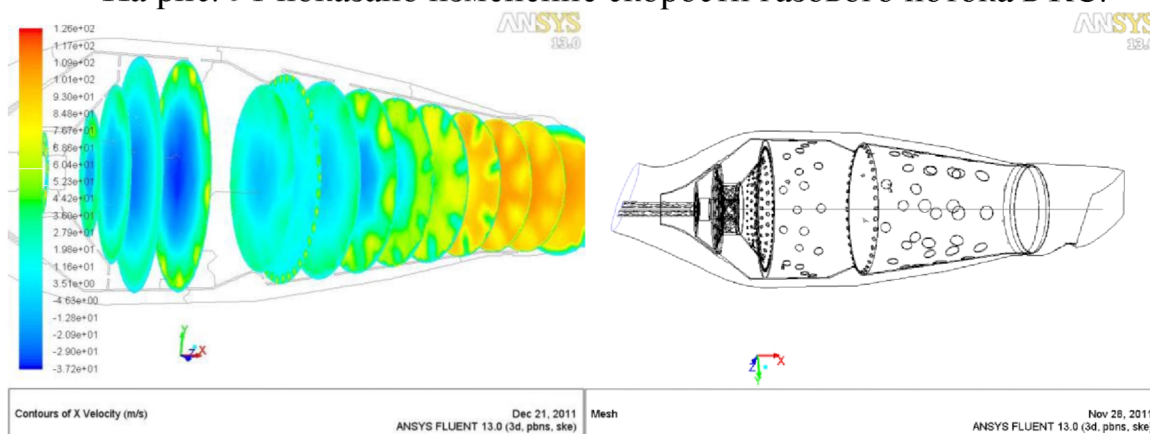


Рис. 91

Распределение статического и полного давлений по длине камеры сгорания представлено на рис. 92 – 93.

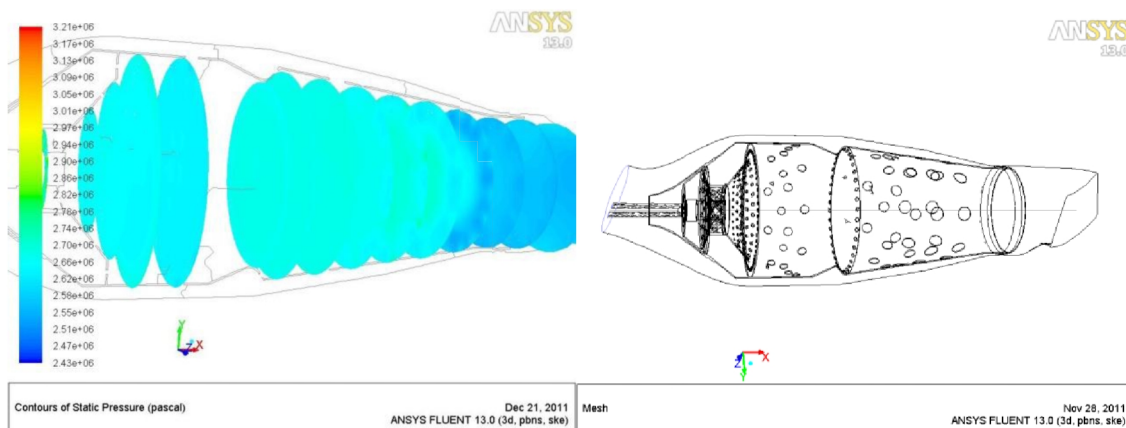


Рис. 92

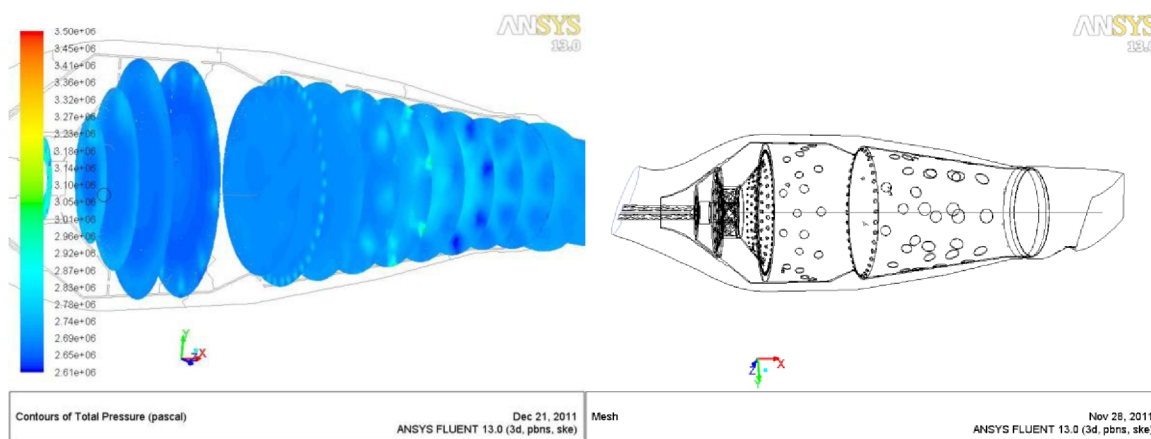


Рис. 93

По потерям давления в КС можно оценивать её аэродинамическое совершенство. В стендовых условиях его принято оценивать при «холодных» продувках, без горения топлива. Аналогичные данные могут быть получены за счёт численного моделирования с помощью САЕ-систем. Такая задача может быть поставлена преподавателем в качестве задания для данной лабораторной работы.

Гидравлические потери полного давления в камере сгорания:

$\Delta P_{K^*} = P_{B^*} - P_{Г^*}$ (где P_{B^*} и $P_{Г^*}$ - полные давления соответственно воздуха на входе в камеру сгорания и газа на выходе из неё). Часто пользуются относительными потерями давления, в %:

$$\sigma_{Г^*} = \Delta P_{K^*} / P_{B^*} = (P_{B^*} - P_{Г^*}) / P_{B^*}.$$

Величина ΔP_{K^*} учитывает три вида потерь: на трение, турбулентные (в диффузоре, на смешение потоков, в местных сопротивлениях и т.д.) и на потери в потоке при подводе теплоты. При моделировании холодной продувки последний, третий вид потерь отсутствует. Для камер сгорания ГТД обычно $\sigma_{Г^*} \geq 3...5\%$. В ходе выполнения лабораторной работы может сложиться ситуация, когда расчётные потери окажутся значительно больше рекомендованных. Тогда студенты должны выполнить анализ полученной расчётной картины и на базе его предложить и использовать при выполнении работы конструктивные мероприятия, обеспечивающие их снижение.

Внимание! В общем случае для снижения величины гидравлических потерь камер сгорания необходимо по возможности уменьшать скорости потока, исключать наличие отрывных зон, вихревых течений и дополнительных местных препятствий в нехарактерных для них местах.

Содержание отчёта

1. Результаты выполненных расчётов.
2. Картины и графики распределения расчётных параметров, указанных преподавателем в начале лабораторной работы.

Контрольные вопросы к зачёту по лабораторной работе

1. Назовите основные этапы подготовки и проведения расчёта с помощью CAE-систем.
2. Каковы особенности геометрической модели КС для расчёта течения газового потока в ней?
3. Какие требования выдвигаются к построению конечно-элементной модели расчётной области?
4. В чём заключается физический смысл использования граничных условий?
5. Назовите особенности построения конечно-элементных моделей для расчёта различных процессов в камерах сгорания ГТД.
6. Что лежит в основе численного моделирования рабочего процесса камер сгорания ГТД?
7. Какие требования предъявляются к представлению результатов компьютерного моделирования процессов в камерах сгорания?