

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)» (СГАУ)

**Исследование тепловых процессов  
в вихревом теплогенераторе с помощью САЕ-систем**

Электронные методические указания  
к лабораторной работе

Работа выполнена по мероприятию блока 1 «Совершенствование образовательной деятельности» Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка образовательных стандартов СГАУ по специальности 160700.65 - Проектирование авиационных и ракетных двигателей и направлению подготовки бакалавров 160700.2 - Двигатели летательных аппаратов со сквозной документацией и создание исследовательских лабораторных работ и прогрессивных технологий лекционных занятий»

Соглашение № 1/4 от 3 июня 2013 г.

САМАРА  
2013

УДК 621.53

И 889

Составители: **Бирюк Владимир Васильевич**

**Благин Евгений Валерьевич**

**Шиманов Артём Андреевич**

**Угланов Дмитрий Александрович**

Редакторская обработка : Е. В. Благин

Компьютерная верстка: Е. В. Благин

Доверстка: Е. В. Благин

Рецензент: д-р техн. наук, проф. каф. теории двигателей летательных аппаратов  
В.Н. Матвеев

Исследование тепловых процессов в вихревом теплогенераторе с помощью CAE-систем [Электронный ресурс] : электрон. метод. указания к лаб. работе / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); сост.: В. В. Бирюк, Е. В. Благин, А. А. Шиманов, Д. А. Угланов; - Электрон. текстовые и граф. дан. (3,36 Мбайт). - Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM)

В электронном методическом указании показаны особенности использования программных пакетов NX 8.5 и ANSYS «Fluent» для построение трехмерной модели теплогенератора и моделирования процессов теплопередачи в нём в рамках лабораторного практикума по курсу «Теплогенераторы энергетических установок».

Электронные методические указания предназначены для подготовки специалистов по специальности 160700.68 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», изучающих дисциплину «Теплогенераторы энергетических установок» в 6 семестре.

Подготовлено на кафедре теплотехники и тепловых двигателей

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет 2013

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ SIEMENS NX 8.5 .....	5
2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВИХРЕВОМ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ ANSYS FLUENT .....	23
2.1 Запуск программной оболочки ANSYS Workbench и импорт геометрической модели	23
2.2 Построение сетки.....	26
2.3 Настойка решателя и граничных условий .....	28
2.3.1 Запуск программы ANSYS Fluent и ее особенности.....	28
2.3.2 Настройка параметров расчета.....	31
2.3.3 Задание граничных условий .....	36
2.4 Обработка результатов расчета.....	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	47
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	48

## **ВВЕДЕНИЕ**

Целью данного методического пособия является представление принципа работы теплогенератора посредством его трехмерной модели. Построение данной модели осуществляется при помощи программы Siemens NX 8.5. Моделирование протекания тепловых процессов внутри теплогенератора осуществляется с помощью программы ANSYS Fluent. Эффективность работы теплогенератора зависит от эффекта кавитации, при помощи которого осуществляется нагрев рабочего тела. Исследования, проводимые при помощи CFD-моделирования, позволяют определить рабочие параметры, необходимые для появления эффекта кавитации. Сложности процесса моделирования связаны с построением модели расчетной сетки, а также с учетом параметров возникновения кавитации.

В данную методику расчета входят следующие этапы:

- Построение трехмерной модели внутреннего пространства теплогенератора;
- Построение сетки модели;
- Настройка решателя ANSYS Fluent;
- Анализ полученных данных.

Данный информационный ресурс может использоваться студентами и преподавателями для получения полей распределения основных термодинамических параметров в теплогенераторе с помощью программы ANSYS Fluent, а также позволяет получить навыки работы в программе NX 8.5 и работы с одним из видов фазового перехода – кавитацией.

# 1. ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ SIEMENS NX 8.5

Сначала необходимо запустить *SIEMENS NX 8.5 Пуск→Все программы→Siemens NX 8.5→NX 8.5*.

В открывшемся окне необходимо создать новый документ (*Файл→Новый*), в открывшемся окне (рисунок 1.1) можно выбирать тип будущей детали. Для построения трехмерной модели теплогенератора нужно выбрать вид *Модель*.

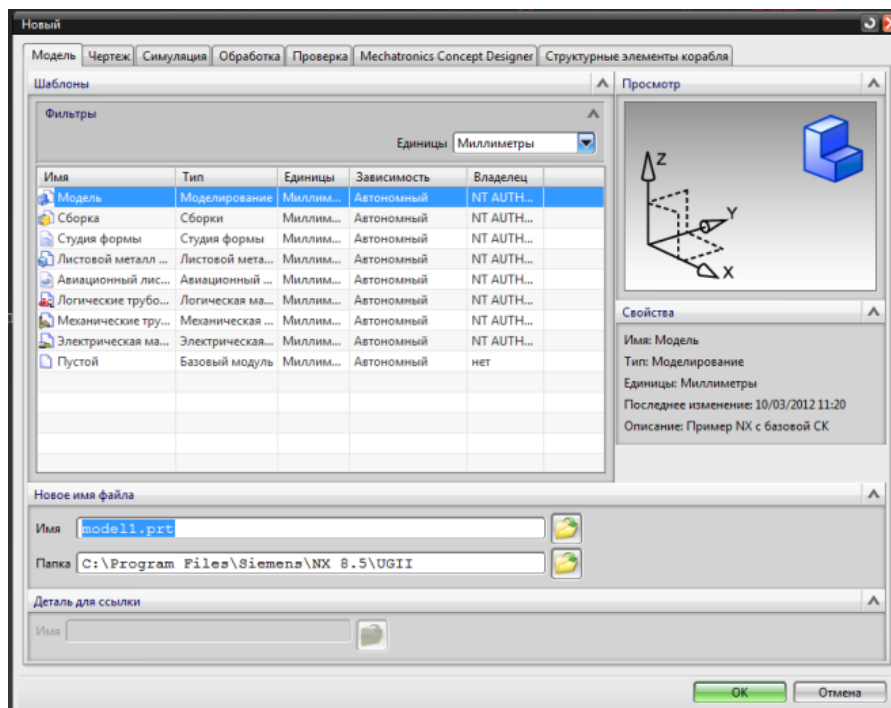


Рисунок 1.1 – Внешний вид окна создания нового файла

Откроется окно модуля «Моделирование» (рисунок 1.2).

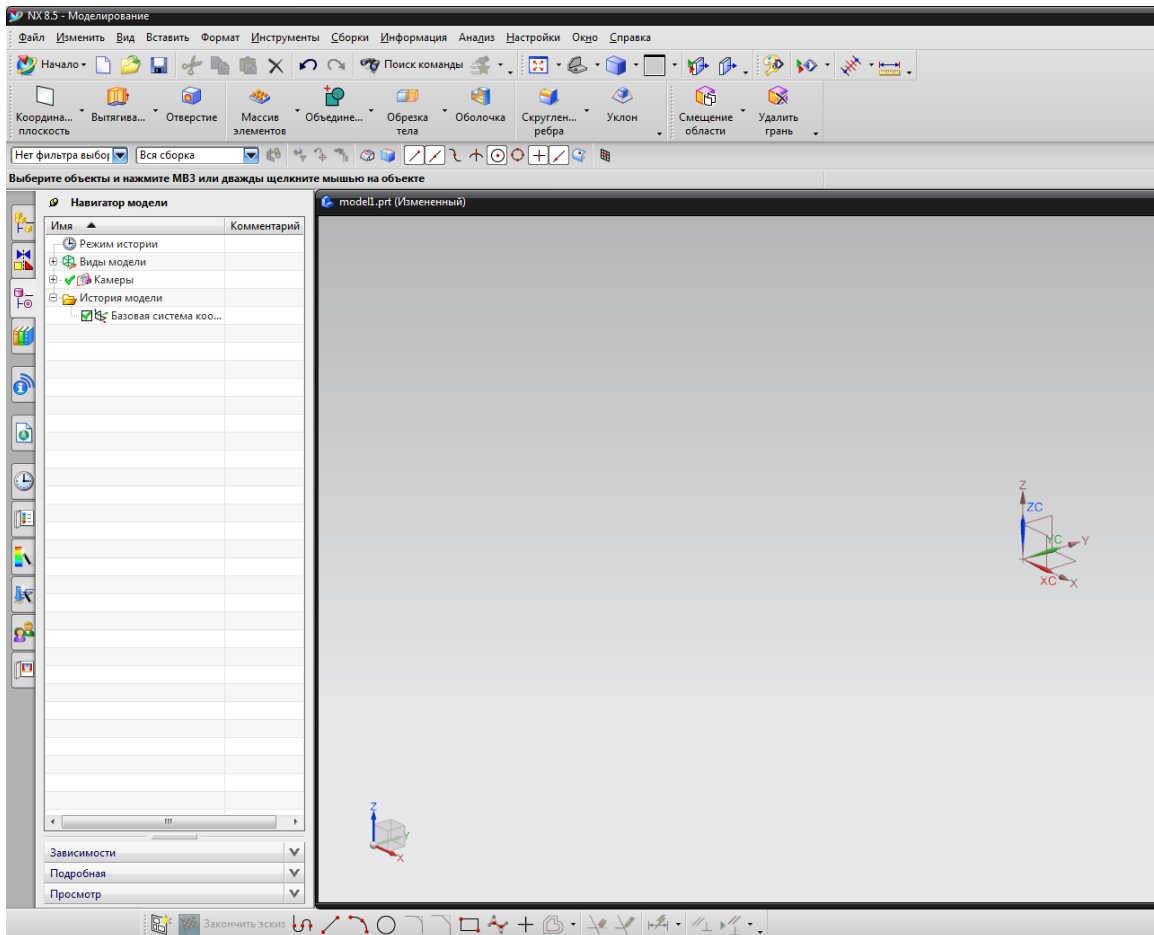


Рисунок 1.2 – Внешний вид рабочего окна модуля «Моделирование».

Построение модели начинается с создания цилиндрической трубы. Необходимо создать эскиз внешнего профиля трубы (*Вставить*→*Эскиз*). В качестве плоскости нужно выбрать базовую плоскость X-Z (рисунок 1.3).

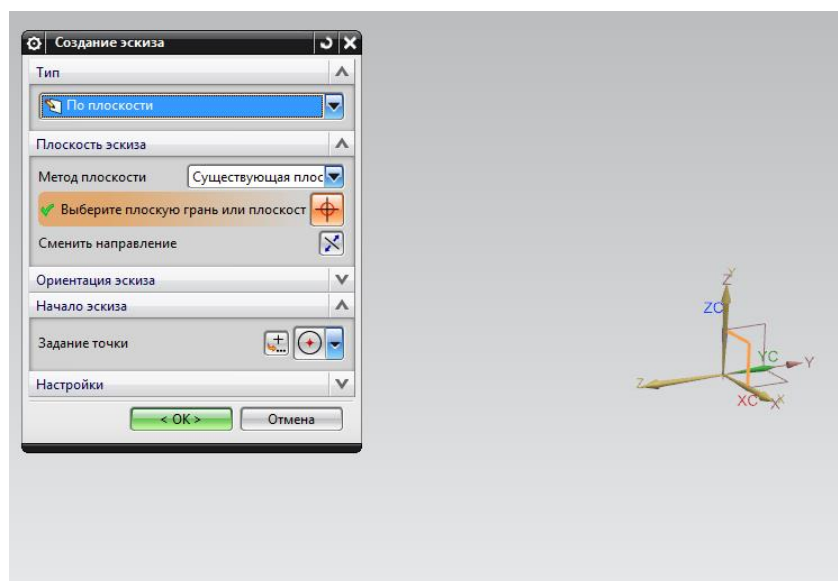



Рисунок 1.3 – Внешний вид окна создания эскиза и выбираемой плоскости

На эскизе (рисунок 1.4) необходимо изобразить окружность с центром в начале координат и диаметром 34 мм. Для этого нужно на панели эскизирования выбрать значок окружности , убедиться, что в качестве метода окружности стоит «*По центру и диаметру*», и указать в качестве центра начало координат, после чего указать значение диаметра, равное 34 мм.

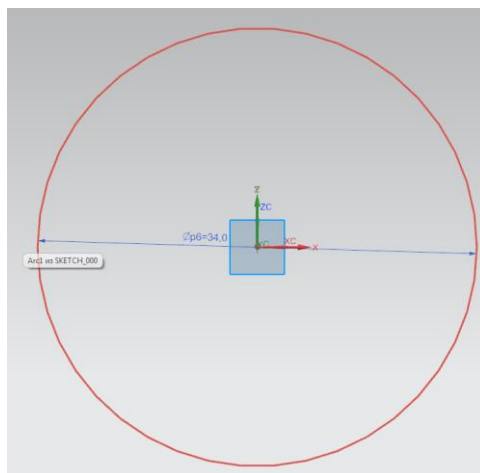


Рисунок 1.4 – Эскиз трубы

После проведения этих операций нужно нажать *Закончить эскиз*.

Теперь необходимо протянуть данную окружность вдоль оси Y. Для этого нужно воспользоваться функцией вытягивание (*Вставить* → *Элементы проектирования* → *Вытягивание*).

Откроется следующее окно (рисунок 1.5):

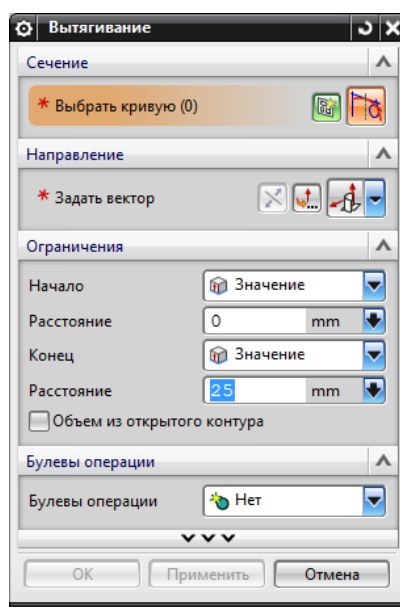


Рисунок 1.5 – Внешний вид окна вытягивания

В качестве кривой сечения нужно выбрать нарисованный ранее эскиз, а в качестве направления – вектор оси Y. Расстояние начала равно 0 мм, а расстояние конца - 182 мм. Программа отобразит предполагаемую фигуру (рисунок 1.6) (Если предполагаемое изображение направлено в противоположную необходимому направлению, то существуют два способа его поменять: нажать **Сменить направление вектора** или указать отрицательное значение расстояния). Окно закрывается нажатием ОК.

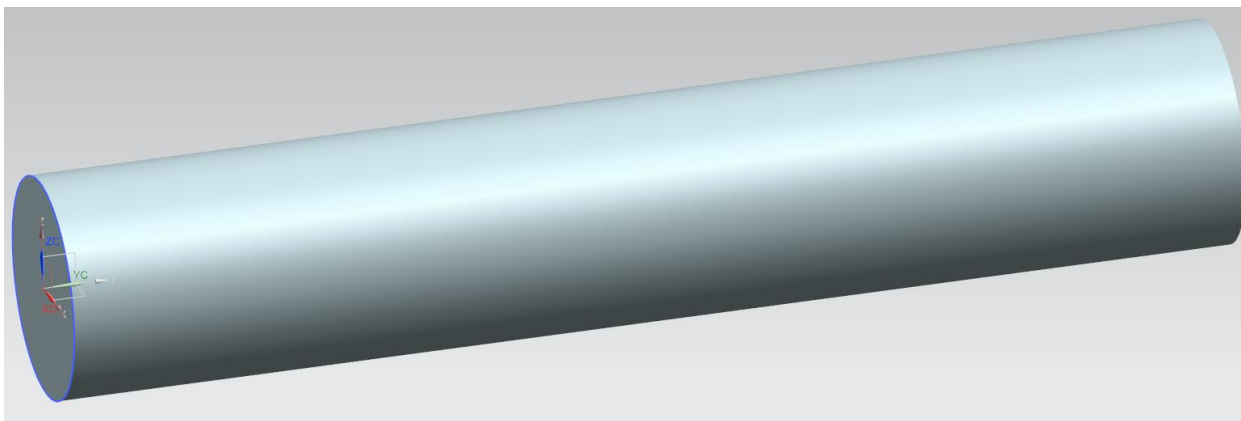


Рисунок 1.6 – Вид внешнего корпуса трубы.

Теперь необходимо создать внешний корпус «улитки». Для этого нужно создать эскиз на плоскости, соответствующей левой кромке цилиндра. Для этого в окне вызова эскиза в качестве плоскости эскизирования нужно указать эту кромку.

В качестве профиля корпуса «улитки» используется окружность диаметром 80 мм, смещенная относительно начала координат вдоль оси Z на 11 мм. Для того, чтобы её изобразить, необходимо создать произвольную окружность с центром в любой точке выше начала координат (рисунок 1.7).

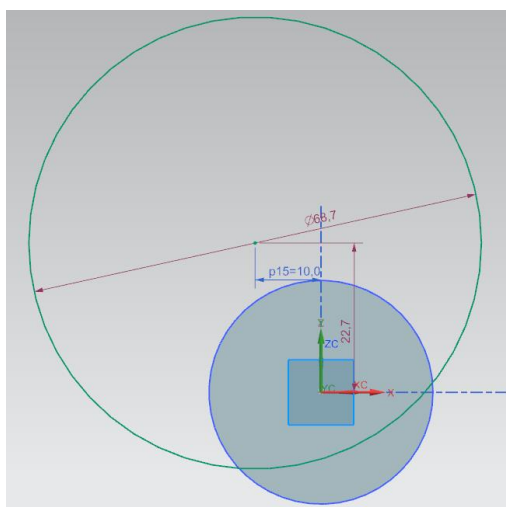


Рисунок 1.7 – Внешний вид изначального эскиза



Программа автоматически выставит размеры. При двойном нажатии на размер появляется возможность его редактирования, после чего соответственно начнет изменяться и сам чертеж. Значение диаметра должно быть равно 80 мм, горизонтальное расстояние от центра окружности до начала координат – 0 мм, а вертикальное – 11 мм (рисунок 1.8).

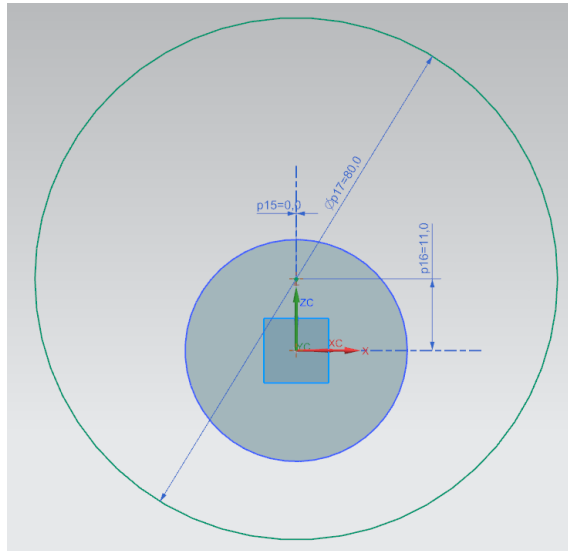


Рисунок 1.8 – Конечный вид эскиза

В дальнейшем данный способ построения эскизов будет применяться практически в каждом эскизе деталей и подробного описания изменения размеров проводиться не будет.

После этого выполняется вытягивание этого профиля в сторону, противоположную цилиндру, на 28 мм.

Должна получиться следующая фигура (рисунок 1.9).

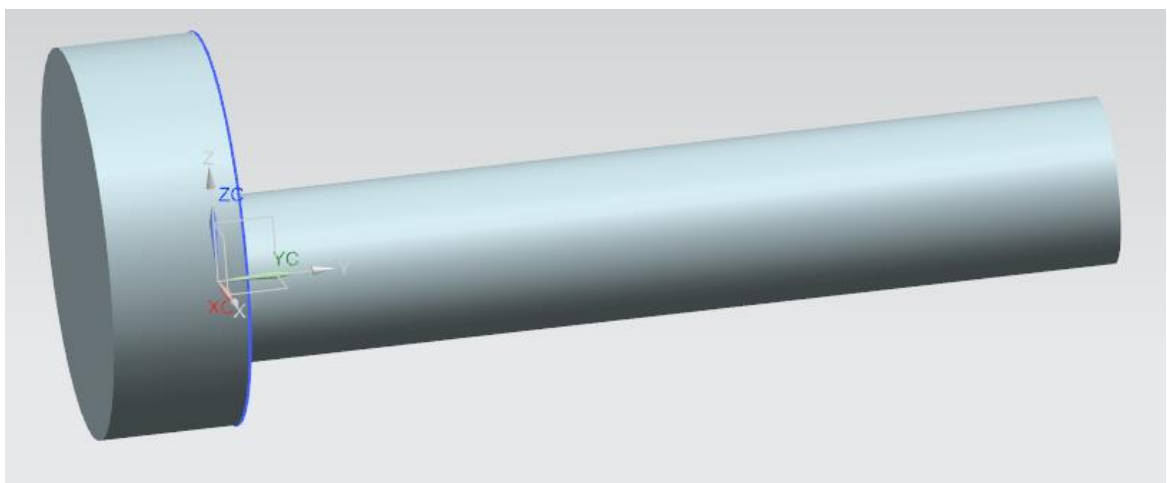


Рисунок 1.9 – Изображение детали после построения корпуса улитки

Однако корпус улитки представляет собой усеченный цилиндр. Для того, чтобы исходный цилиндр преобразовать в такую фигуру необходимо воспользоваться функцией **Обрезка тела** (**Вставить**→ **Обрезка** → **Обрезка тела**) (рисунок 1.10).

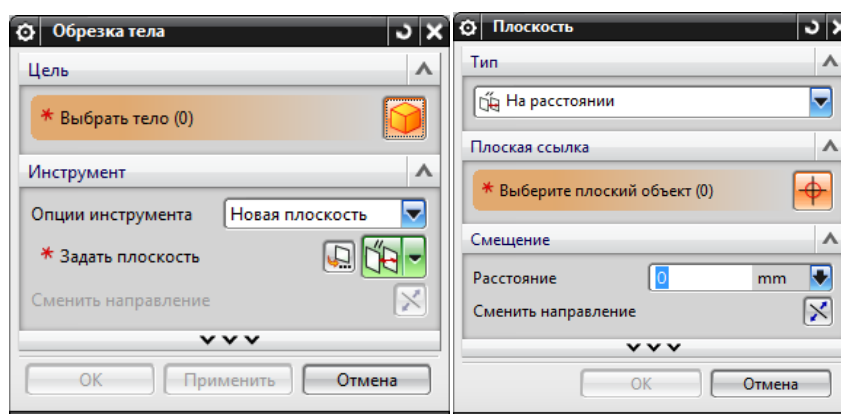


Рисунок 1.10 – Вид окон обрезки тела и создания плоскости

В качестве цели нужно выбрать полученный цилиндр, в качестве инструмента – новую плоскость и нажать задать её. В качестве типа новой плоскости необходимо выбрать **На расстоянии**, в качестве плоской ссылки – плоскость XY и указать расстояние смещения 39 мм. Образовавшаяся фигура должна выглядеть следующим образом (рисунок 1.11):

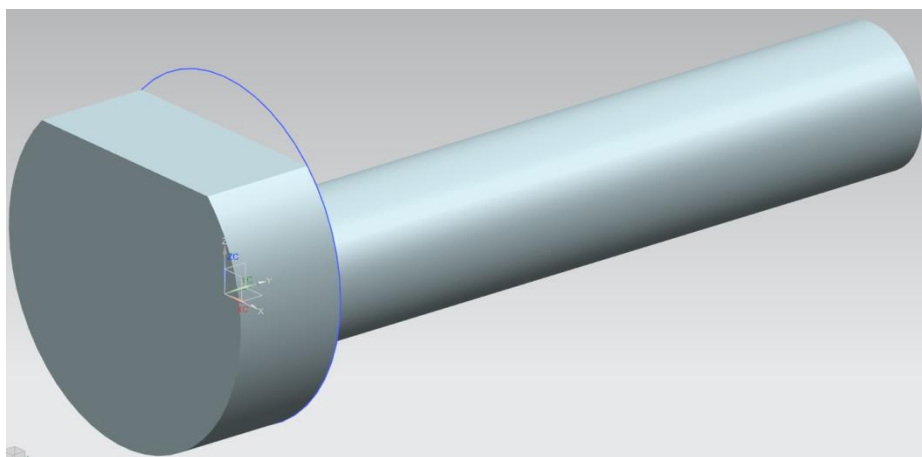


Рисунок 1.11 – Внешний вид детали после обрезки корпуса улитки

Теперь необходимо создать патрубок входа. Он создается при помощи эскиза на плоскости, получившейся после усечения цилиндра. Начало эскиза задается в углу плоскости.

После этого создается окружность диаметром 25 мм, центр которой отстоит от начала эскиза (угла плоскости) на 14 мм по вертикали и горизонтали (рисунок 1.12).

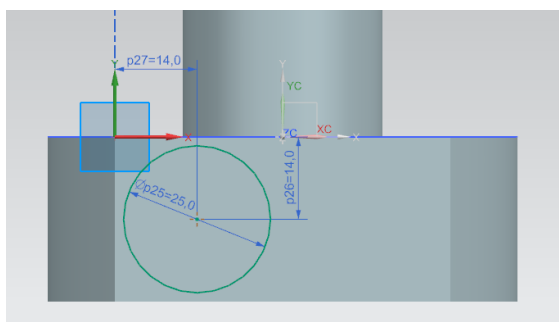


Рисунок 1.12 – Эскиз патрубка входа

Теперь нужно вытянуть эту окружность на 30 мм вверх. После вытягивания должна получиться следующая фигура (рисунок 1.13):

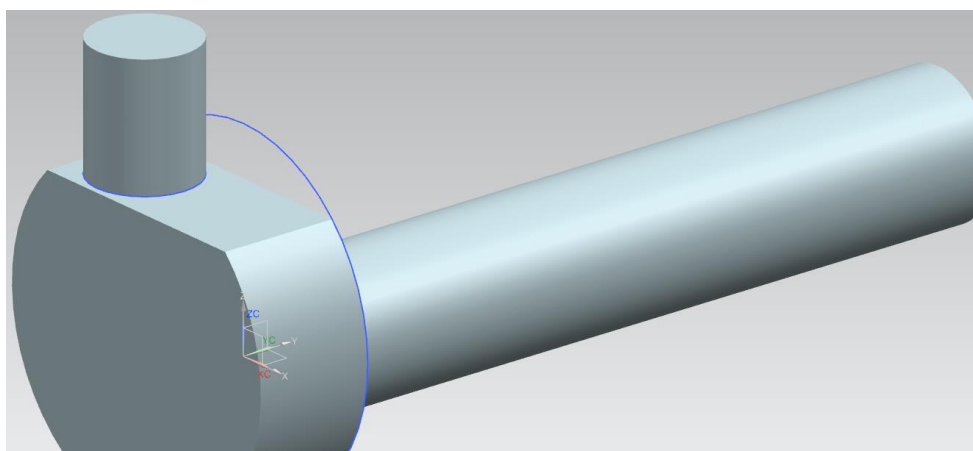


Рисунок 1.13 – Внешний вид модели после создания патрубка входа

Теперь необходимо создать патрубок выхода. Для этого создается эскиз на левой стороне корпуса улитки. Перед построением нужно убедиться, что начало эскиза находится на одной оси с началом координат (Патрубок выхода и труба сосны). После чего строится окружность диаметром 25 мм с центром в начале эскиза. Затем она вытягивается на 30 мм. Получившаяся картина должна выглядеть следующим образом (рисунок 1.14):

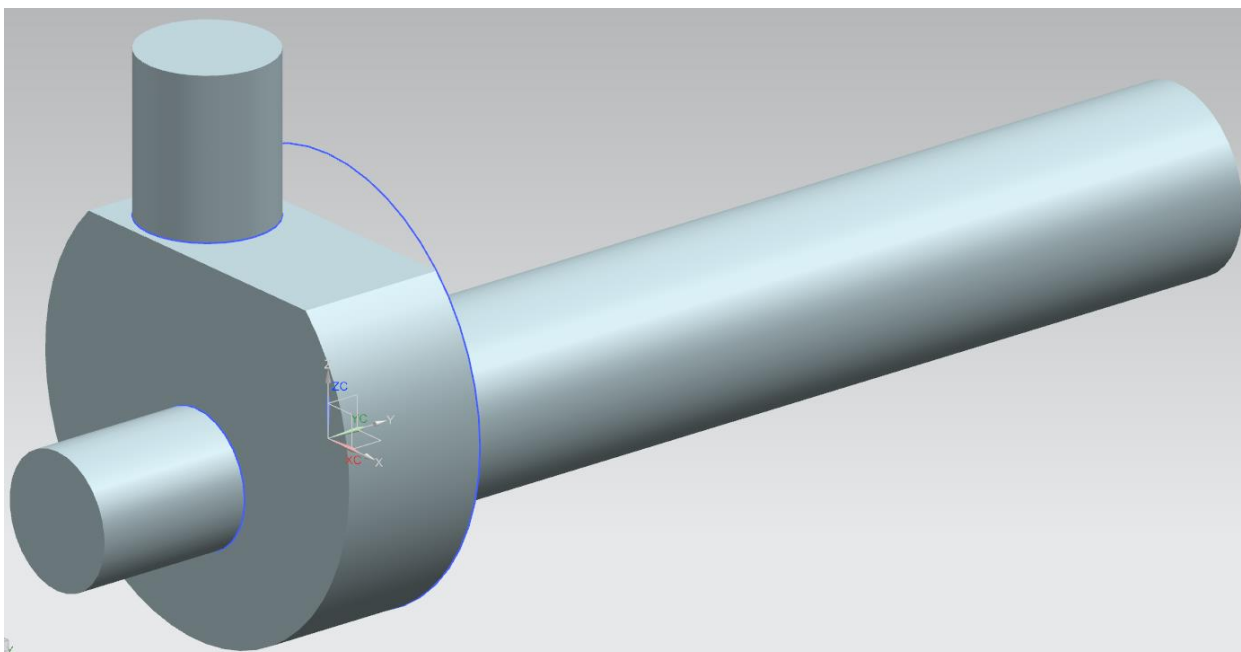


Рисунок 1.14 – Внешний вид детали после создания патрубка выхода

Для удобства просмотра все эскизы можно скрыть. Для этого на навигаторе модели на панели слева нужно выделить все эскизы, нажать ПКМ и выбрать **Скрыть**.

Полученные геометрические объекты хоть и связаны друг с другом, но одним элементом не являются. Для того, чтобы объединить их нужно воспользоваться функцией **Объединение** (**Вставить** → **Комбинировать** → **Объединение**) (рисунок 1.15).

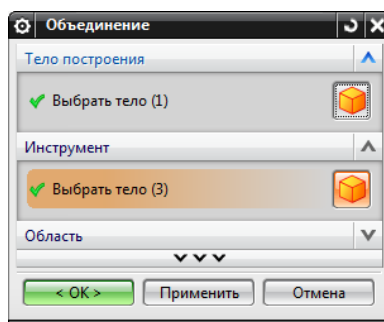


Рисунок 1.15 – Внешний вид окна объединения

В качестве тела построения выбирается любое из построенных тел, а в качестве тел инструмента – остальные тела. После этого нужно нажать ОК.

Теперь необходимо сохранить данную геометрическую модель в формате Parasolid (**Файл** → **Экспорт** → **Parasolid**) (Рисунок 1.16).

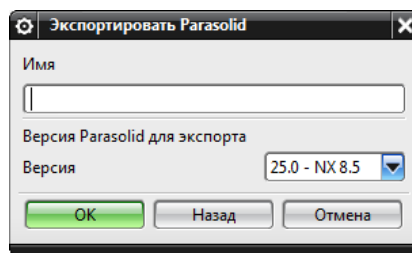


Рисунок 1.16 – Внешний вид окна экспорта в формате Parasolid

После того, как появится данное окно, нужно нажать на геометрическую модель, после чего нажать ОК (Поле **Имя** заполнять не нужно). В появившемся окне проводника указываются имя и расположения экспортированной модели (В названии модели и пути не должно быть кириллицы).

Теперь необходимо создать внутренний канал в патрубке выхода. Для этого на крайней левой плоскости патрубка создается эскиз, представляющий собой окружность радиусом 15 мм с центром в начале координат.

После этого производится вытягивание с одновременным вычитанием полученной модели из ранее построенной (рисунок 1.17).

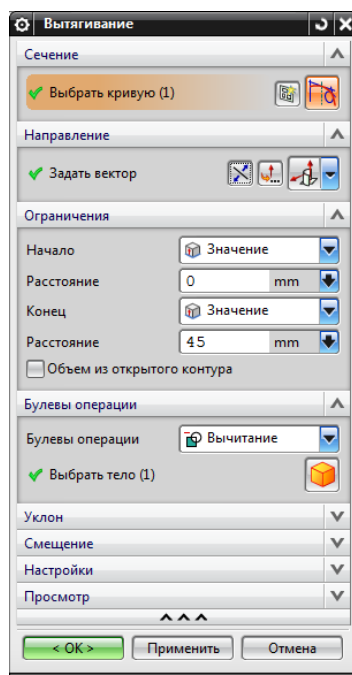


Рисунок 1.17 – Внешний вид окна вытягивания с одновременным вычитанием

Для этого в графе **Булевы операции** указывается **Вычитание**. После этого нужно выбрать тело, из которого будет производиться вычитание (Если тело одно, то оно выбирается автоматически). В качестве расстояния указывается 45 мм. После вычитания деталь должна выглядеть следующим образом (рисунок 1.18) (если программа выдает

ошибку «Тело-инструмент полностью снаружи тела построения», то нужно проверить направление вектора вытягивания, скорее всего он направлен в противоположную сторону):

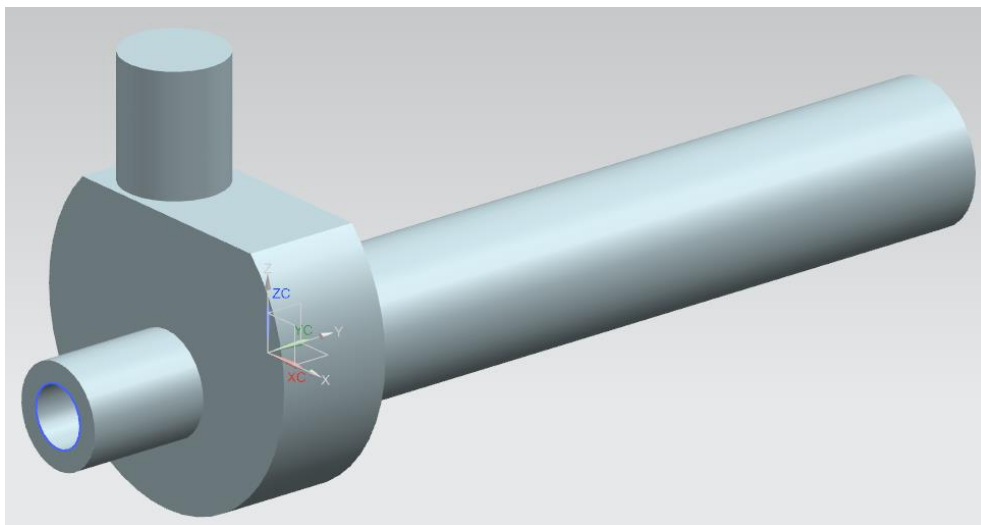


Рисунок 1.18 – Внешний вид детали после создания канала выхода

Теперь необходимо создать внутренний канал улитки. Для начала создается плоскость эскиза – она должна быть параллельна стенкам корпуса и отстоять от левого конца на 8 мм (рисунок 1.19).

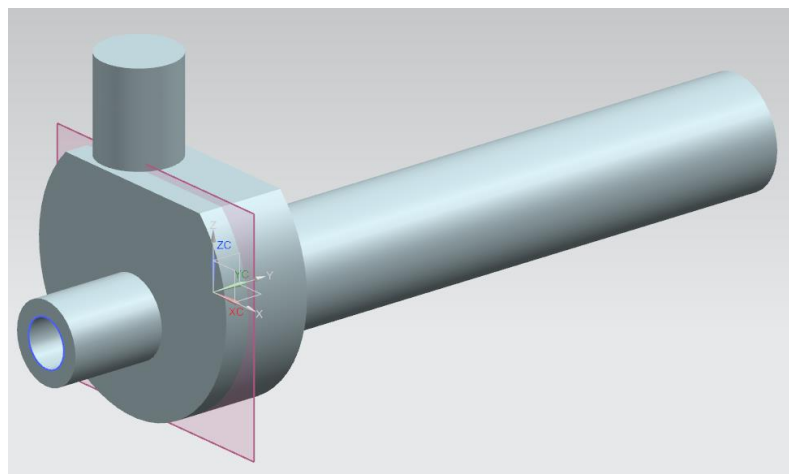



Рисунок 1.19 – Расположение плоскости эскиза внутреннего канала улитки

Профиль канала представляет собой спираль Архимеда (которая представляет собой зависимость вида  $\rho=A(\varphi+\varphi_0)$ ). Так как возможности NX позволяют создавать только пространственные спирали, то профиль канала будет создаваться при помощи сплайновой линии, проходящей через точки с заданными координатами. Координаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Координаты канала в форме спирали Архимеда

№ точки	X	Y
1	-8.5657	9.778997
2	0	14.00197
3	10.67443	10.67443
4	16.18988	0
5	12.22152	-12.2215
6	0	-18.3778
7	-13.7686	-13.7686
8	-20.5657	0

После нажатия значка  появляется меню создания сплайновой линии. Оно выглядит следующим образом (рисунок 1.20):

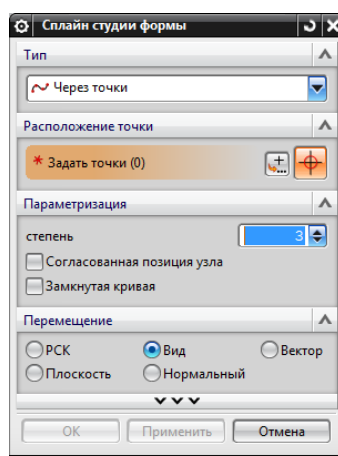


Рисунок 1.20 – Внешний вид окна создания сплайновой кривой

В данном окне предлагается создать сплайновую линию через точки. Для того, чтобы это сделать, необходимо нажать клавишу **Конструктор точки**. Появится следующее окно (рисунок 1.21):

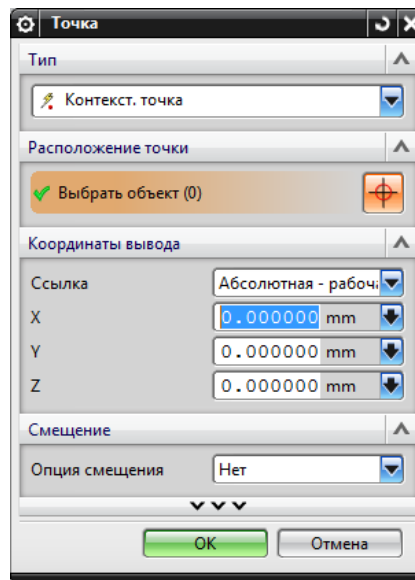


Рисунок 1.21 – Внешний вид окна создания точки

В этом окне необходимо изменить ссылку на рабочую систему координат (РСК), после чего изменится координата Z. После этого нужно указать координаты X и Y точки 1 и нажать ОК. Программа вернется к окну создания сплайновой линии, а у линии появится начало. После этого необходимо вновь нажать **Конструктор точки**, после чего выставить РСК и вбить координаты второй точки. Следует обратить внимание на то, что NX не сохраняет выставленную систему координат и её необходимо менять для каждой точки. После того как будут вбиты все точки из таблицы, в окне создания сплайновой линии нужно нажать ОК. Полученная линия должна выглядеть следующим образом (рисунок 1.22):

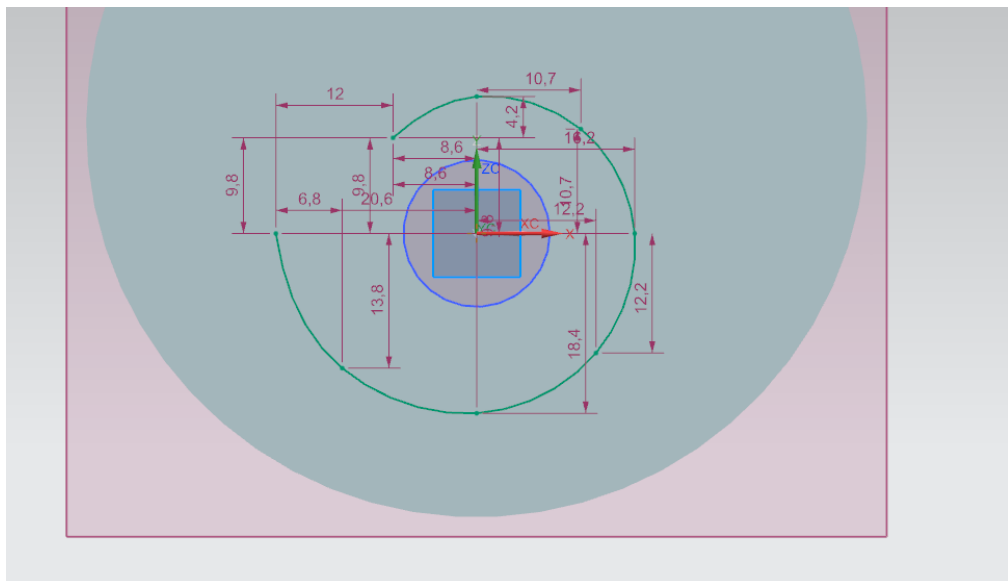


Рисунок 1.22 – Профиль нижней части канала улитки



После этого эскиз дополняется профилем канала входа, и после этого эскиз примет следующий вид (рисунок 1.23):

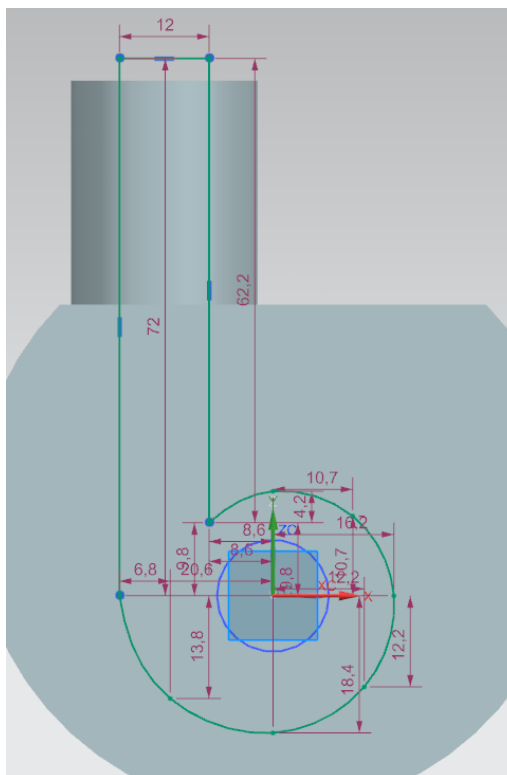


Рисунок 1.23 – Эскиз канала улитки

После построения эскиза необходимо произвести его вытягивание вдоль оси Y на 12 мм совместно с вычитанием его из детали

Фигура должна принять следующий вид (рисунок 1.24):

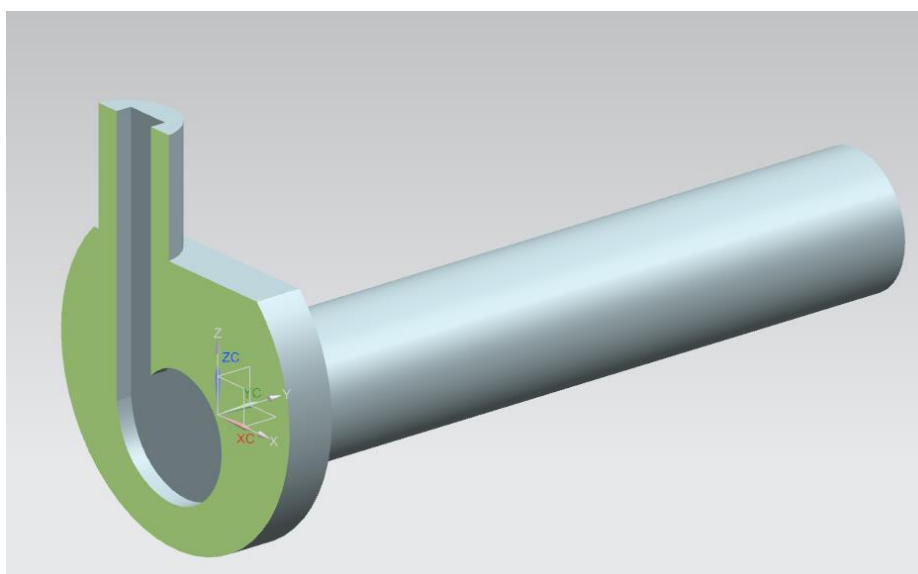



Рисунок 1.24 – Вид детали в разрезе после создания канала улитки

Чтобы увидеть данный вырез необходимо настроить рабочее сечение. Это производится нажатием клавиши  на стандартной панели. Появится следующее окно (Рисунок 1.25):

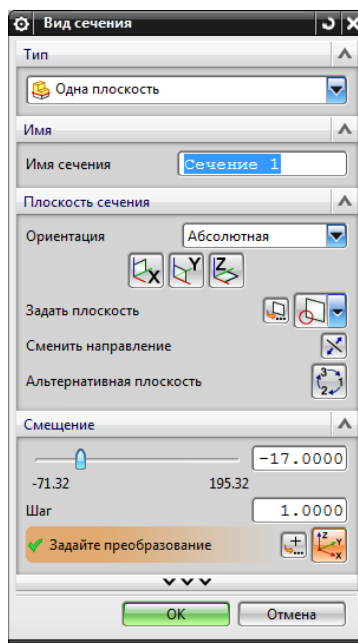


Рисунок 1.25 – Внешний вид окна выбора вида сечения

Меняя ориентацию (перпендикулярно осям X, Y и Z) и двигая ползунок *Смещение*, можно просматривать деталь в различных разрезах.

Теперь необходимо создать внутренний канал трубы. Для этого создается эскиз на внутренней стороне улитки (рисунок 1.26):

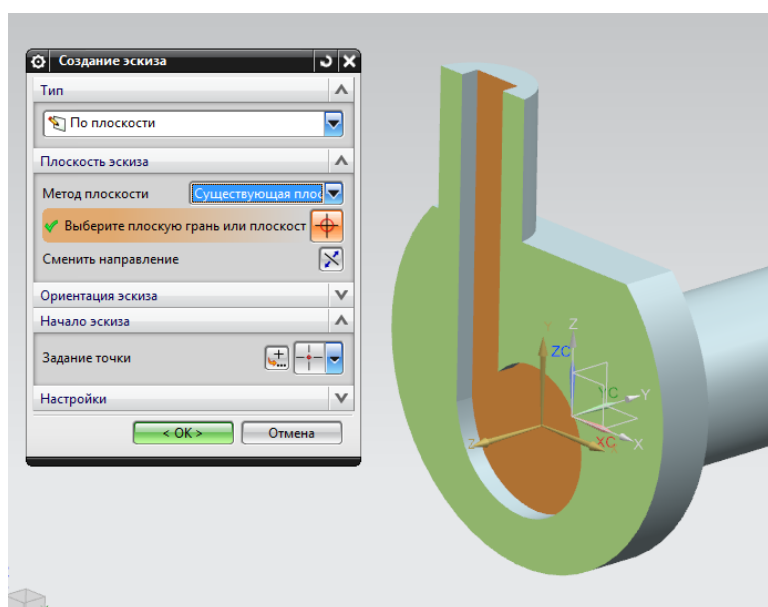


Рисунок 1.26 – Расположение плоскости эскиза внутреннего канала трубы

После этого создается окружность диаметром 24 мм с центром в начале координат. После чего нужно вытянуть полученный профиль на 185 мм внутрь трубы. После этого деталь должна принять следующий вид (рисунок 1.27):

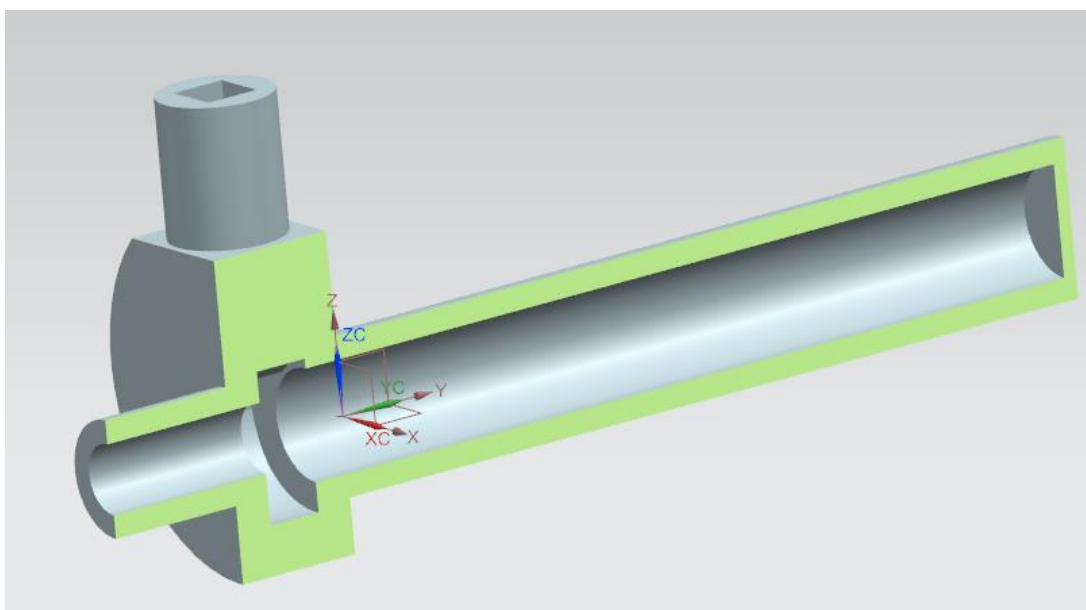


Рисунок 1.27 – Вид детали в разрезе после создания канала трубы

Далее необходимо создать развихритель. Для этого надо создать плоскость эскиза, находящуюся на расстоянии 20 мм от правого конца трубы (Рисунок 1.28):

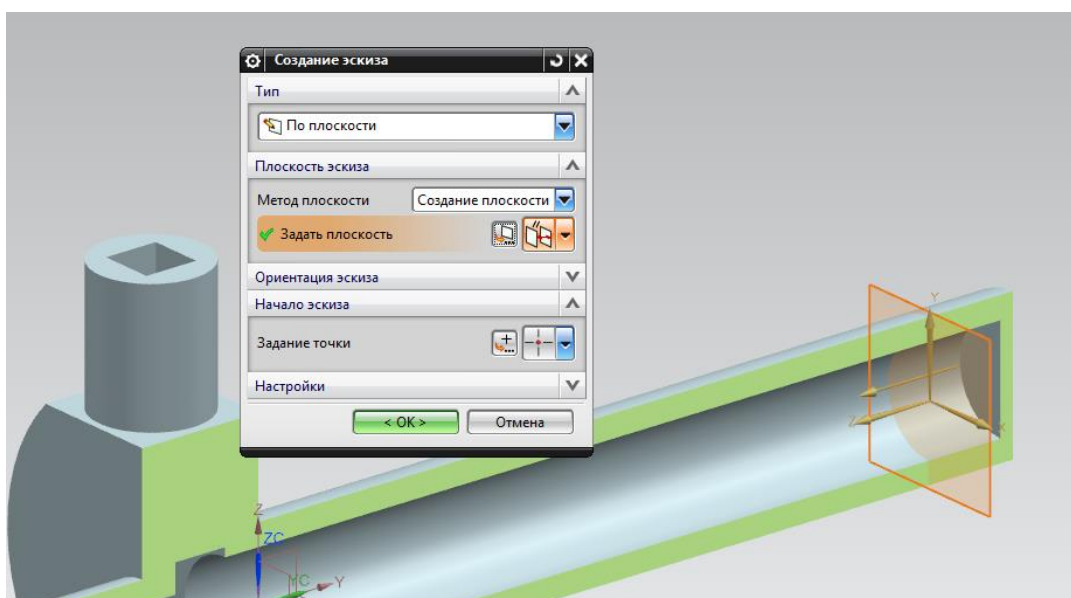


Рисунок 1.28 – Расположение плоскости эскиза развихрителя

Затем на этой плоскости создается эскиз со следующим содержанием (рисунок 1.29):

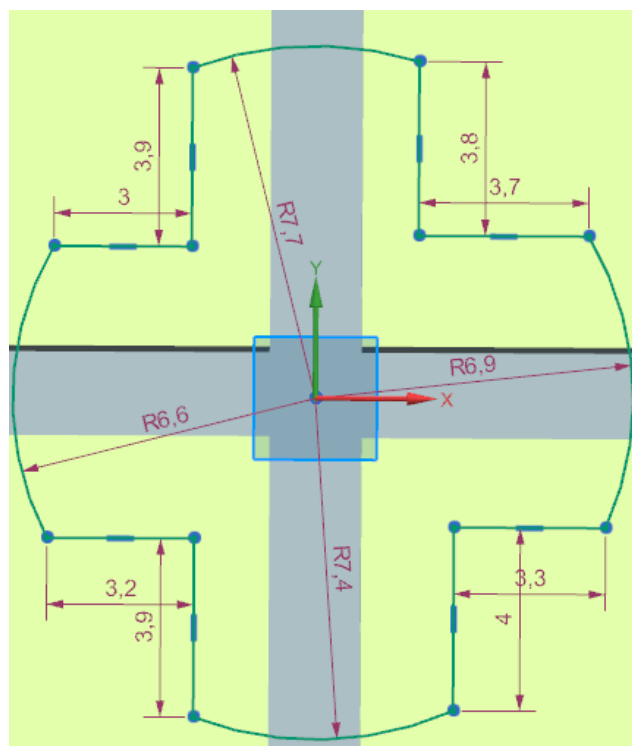





Рисунок 1.29 – Первоначальный эскиз развихрителя

Линии должны быть соответственно вертикальными и горизонтальными, все дуги должны быть построены с центром в начале координат. Размеры линий и дуг произвольны. После того, как данный профиль будет построен, нужно задать ряд ограничений. Ограничения добавляются нажатием соответствующего значка  на панели эскизирования. Первым выбирается ограничение равной длины . В качестве первого объекта ограничения нужно выбрать одну из прямых линий, в качестве второго – другую. Эту операцию нужно проводить до тех пор, пока все прямые линии не станут одинаковой длины. Это привяжет длины всех линий к одной из них и, меняя эту величину, можно изменять значения всех линий. Затем нужно установить ограничение равного радиуса  на дуги. После этого на эскизе должно остаться всего 2 размера: радиус дуг и длина прямых линий. Однако необходимым геометрическим параметром является толщина одной из сторон креста, поэтому нужно задать геометрический размер между двумя параллельными линиями. Так как для того, чтобы эскиз был полностью определен необходимо всего 2 геометрических размера, то размер длины сторон исчезнет. Радиус дуг равен 12 мм, толщина креста – 2 мм. Построенный профиль должен выглядеть следующим образом (рисунок 1.30):

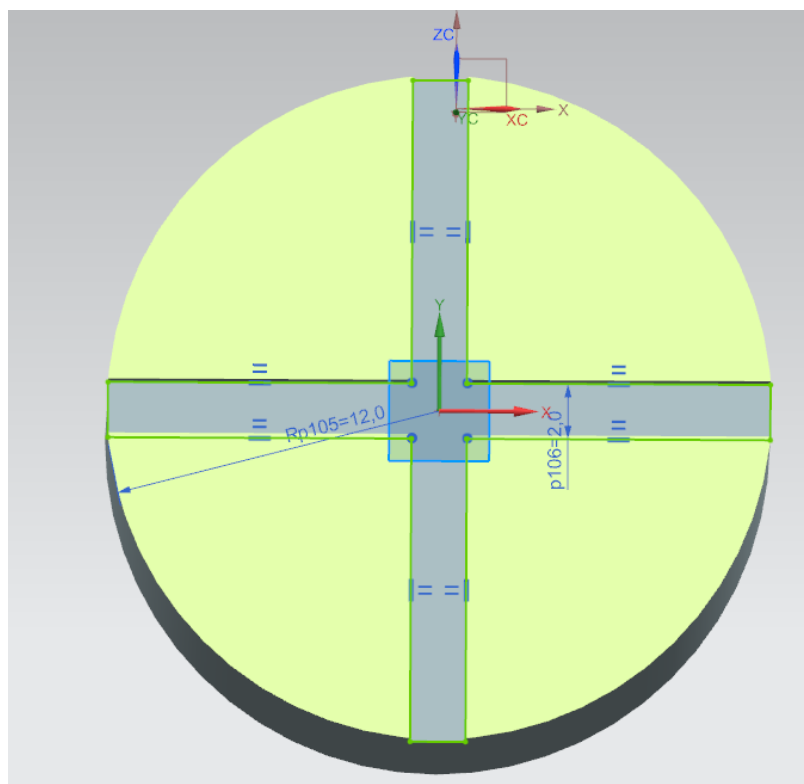


Рисунок 1.30 – Конечный эскиз развихрителя

После построения профиля его нужно вытянуть на 10 мм в сторону улитки, при этом одновременно выполняя булеву операцию «объединение», чтобы соединить полученный развихритель с деталью. Полученная модель должна выглядеть следующим образом:

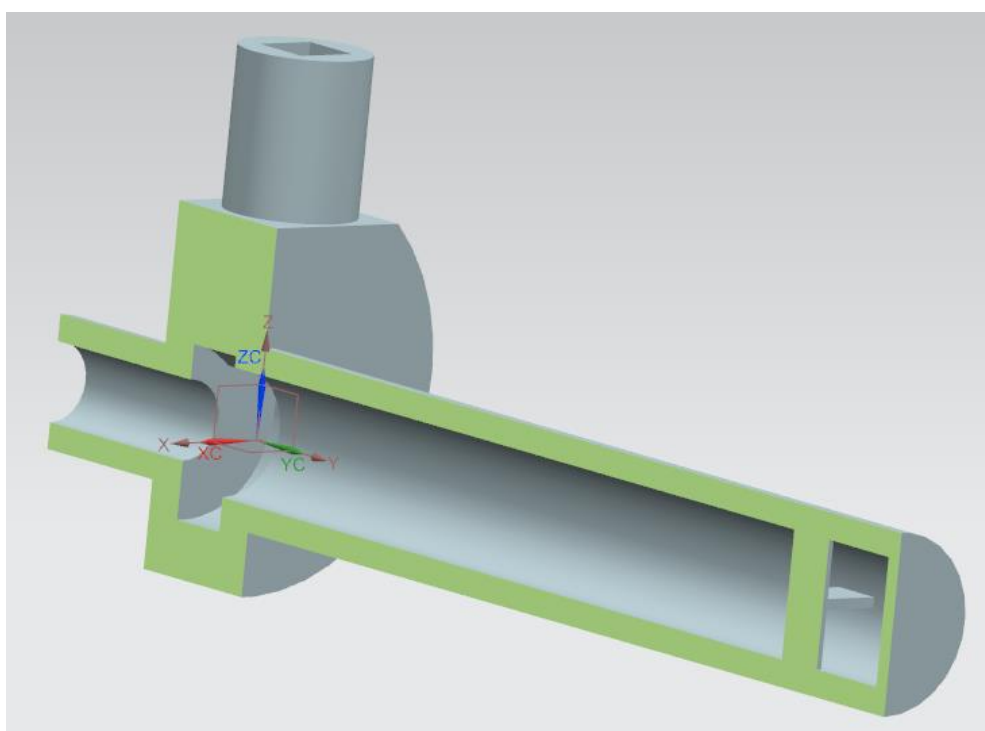


Рисунок 1.31 – Вид детали в разрезе после создания развихрителя

Геометрическая модель теплогенератора построена. Но для расчета в *ANSYS Fluent* необходима модель его внутреннего пространства. Чтобы создать её, необходимо импортировать сохраненный ранее файл Parasolid. В разрезе деталь станет выглядеть таким образом (Рисунок 1.32):

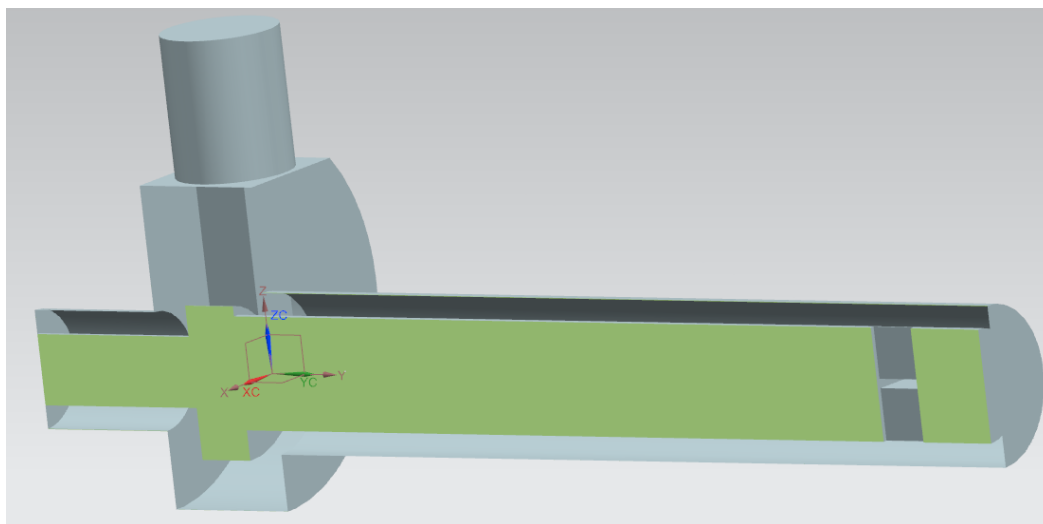


Рисунок 1.32 – Совместный вид созданной и экспортированной детали.

Теперь необходимо из экспортированной детали вычесть смоделированную модель. Это выполняется булевой операцией вычитание (**Вставить**→ **Комбинировать** → **Вычитание**). В качестве тела построения выбирается импортированная модель, а в качестве инструмента – построенная. Результатом операции является трехмерная модель внутреннего пространства теплогенератора (Рисунок 1.33):

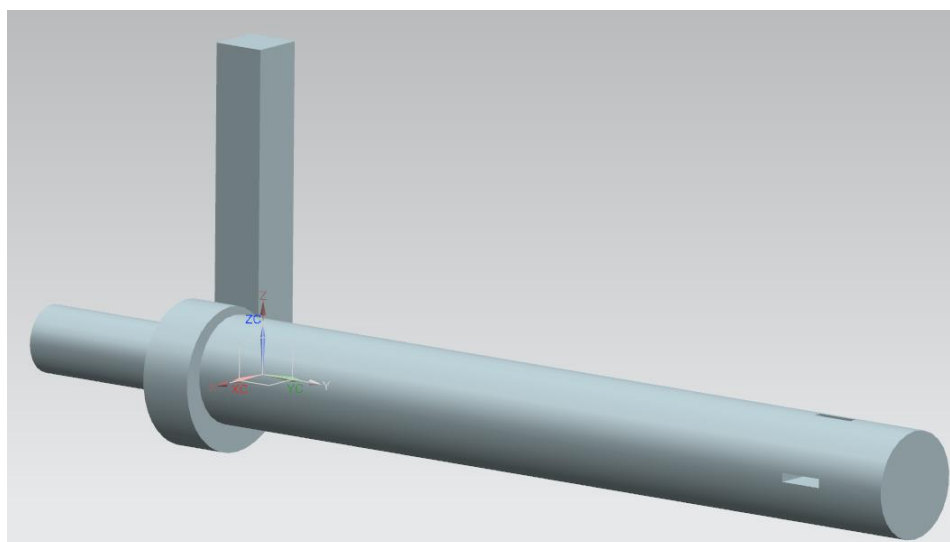


Рисунок 1.33 – Внешний вид внутреннего пространства теплогенератора

Полученную модель необходимо сохранить (**Файл**→ **Сохранить как...**) или экспортировать в формате Parasolid.

## 2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВИХРЕВОМ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ ANSYS FLUENT

### 2.1 Запуск программной оболочки ANSYS Workbench и импорт геометрической модели

Расчет производится на основе программной оболочки ANSYS Workbench 14.5.

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

В качестве проекта нужно выбрать **Fluid Flow (Fluent)** (Рисунок 2.1).

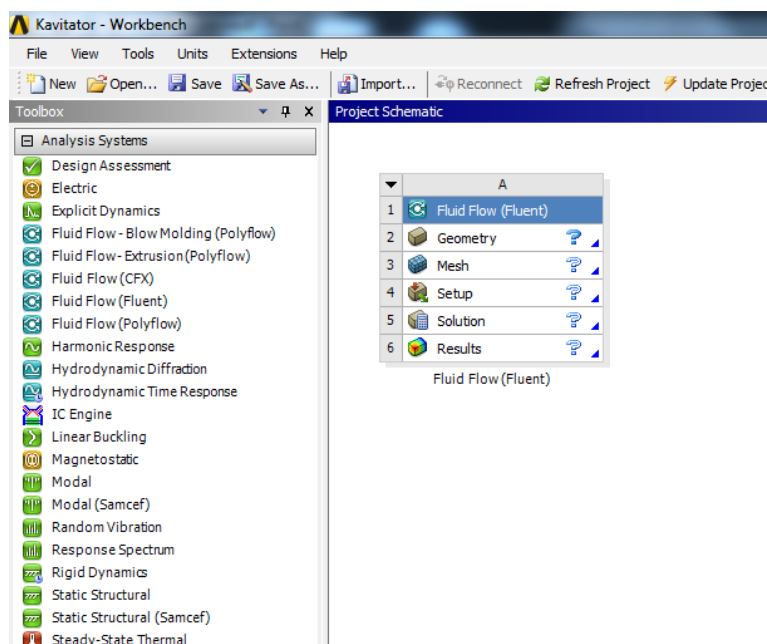


Рисунок 2.1 – Внешний вид рабочего окна **Workbench** и схемы расчета **Fluid Flow (Fluent)**

Для импорта геометрической модели нужно зайти в модуль **Geometry**.

Программа предложит выбрать единицу измерения. Необходимо выбрать миллиметры (Рисунок 2.2).

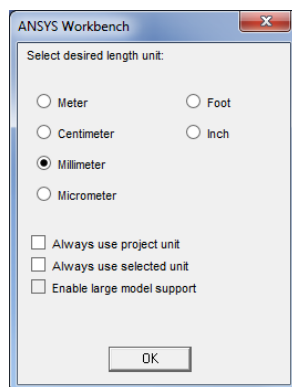


Рисунок 2.2 – Окно выбора геометрической единицы измерения

После этого загружается геометрическая модель проточной части теплогенератора, созданная в программном комплексе *SIEMENS NX 8.5* (*File*→*Import External Geometry File*). На дереве построения появится значок *Import*. Нажмите на него ПКМ и выберите *Generate*. После этого модель должна визуализироваться в окне *Graphics* (рисунок 2.3).

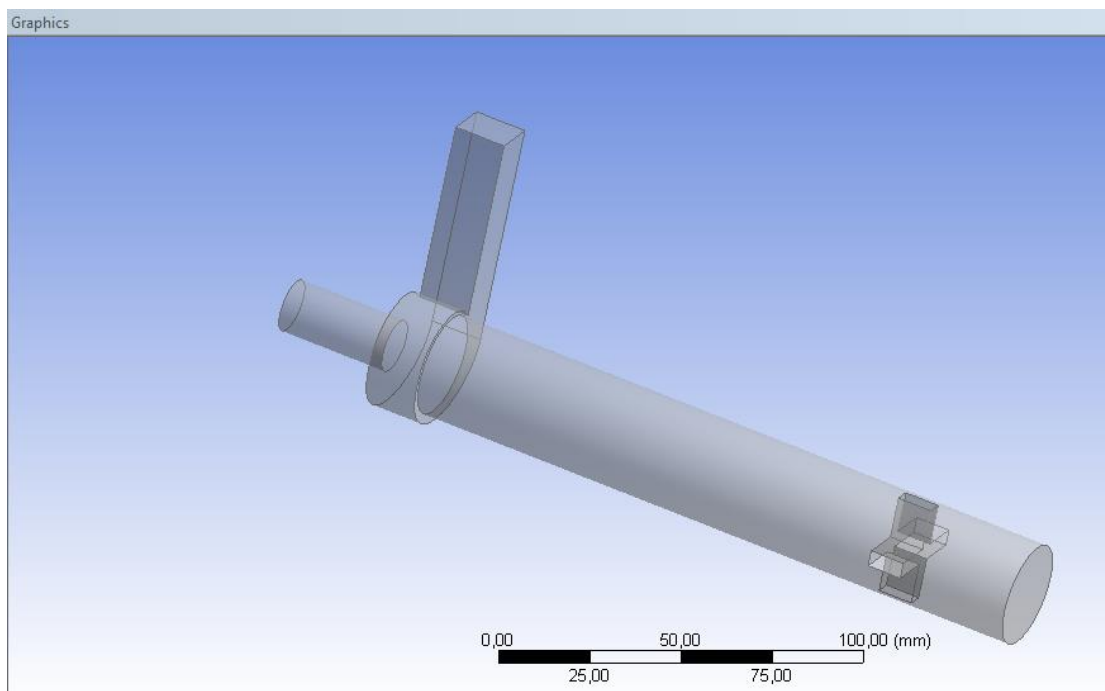


Рисунок 2.3 - Внешний вид проточной части теплогенератора

Данная модель состоит из сложных геометрических объектов. Для более корректного её разбиения на конечные элементы предлагается разделить её на 3 основных части: канал патрубка выхода, канал улитки и патрубка входа и канал трубы.

Для того, чтобы это сделать, необходимо воспользоваться функцией Разрезание (*Slice*) (*Create*→*Slice*) (рисунок 2.4).



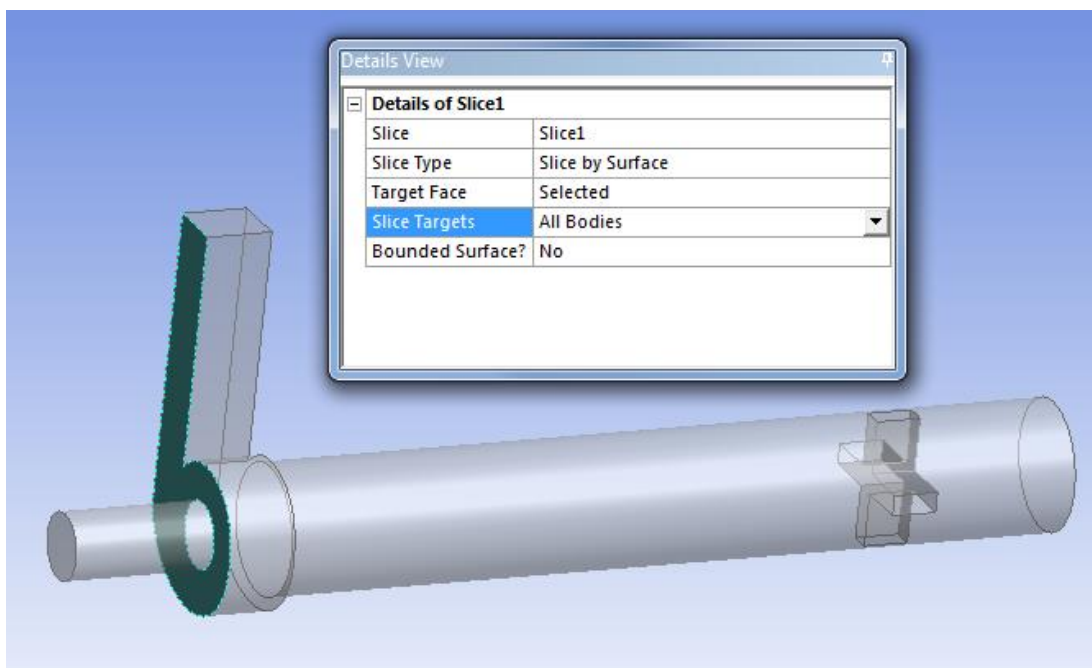


Рисунок 2.4 – Внешний вид окна операции *Slice* и расположение выбранной плоскости разрезания

В *Slice Type* необходимо выбрать *Slice by Surface*, в качестве целевой поверхности (*Target Face*) указать левую сторону улитки. После этого необходимо нажать *Generate*. Результатом этих действий станет отделение патрубка выхода от улитки.

После этого аналогичную операцию необходимо провести для отделения трубы от улитки. Для этого нужно провести операцию Разрезание по правой стороне улитки. После этой операции проточная часть должна состоять из 3 частей: канала патрубка выхода, каналов улитки и патрубка входа и канала трубы (рисунок 2.5).

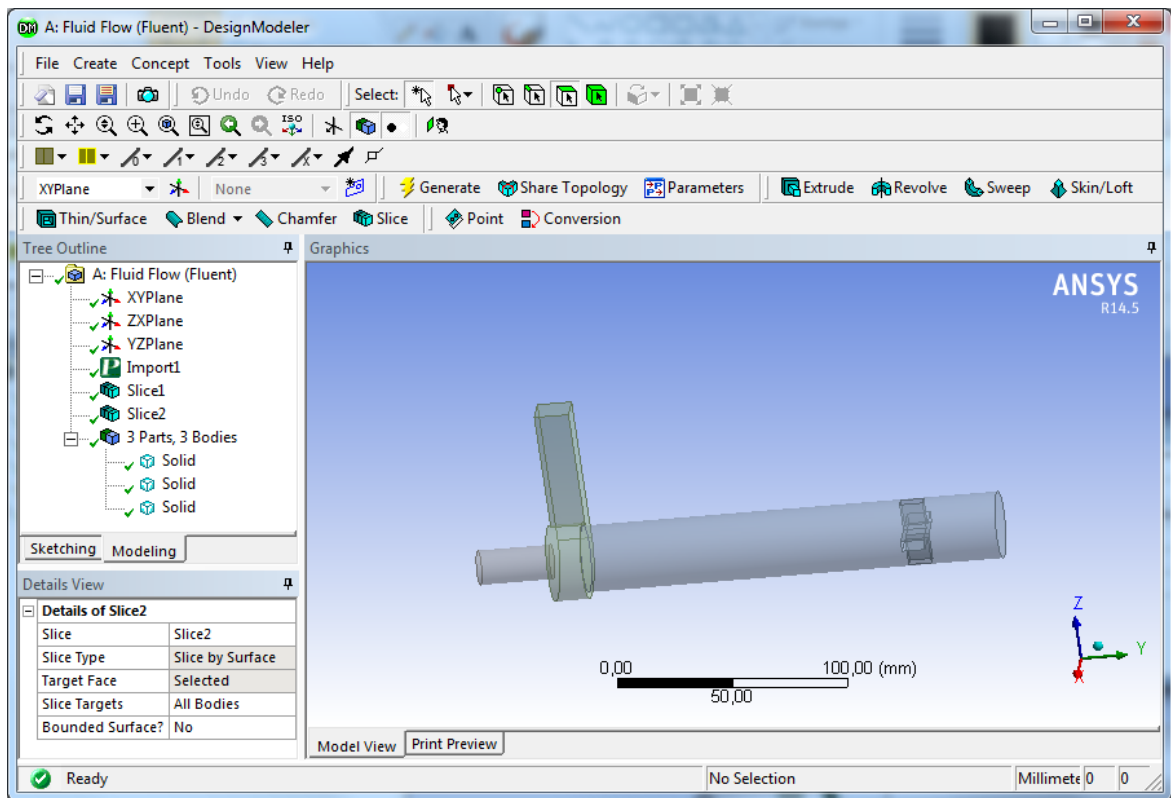


Рисунок 2.5 – Вид проточной части после разделения

После этого можно закрыть экран *Design Modeler*.

## 2.2 Построение сетки

Построение сетки детали производится в модуле *Meshing*. Модель теплогенератора загрузится автоматически (рисунок 2.6).

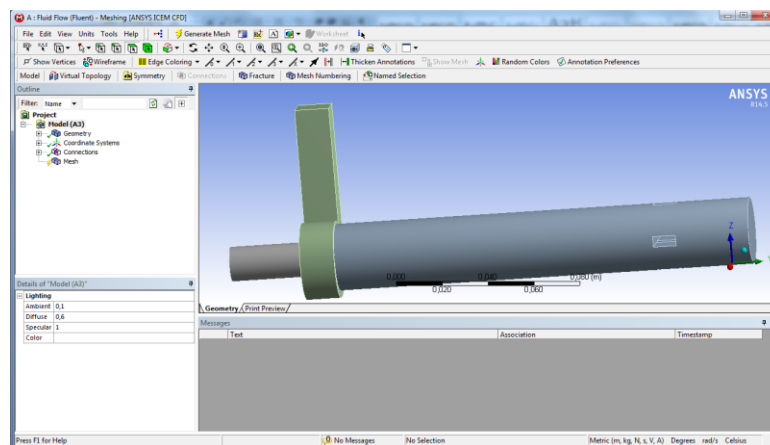


Рисунок 2.6 – Рабочее окно модуля Meshing и внешний вид загруженной геометрической модели проточной части

В дерево модели нужно выбрать инструмент *Mesh*, в разделе *Sizing* которого указать максимальный размер элемента (*Max Size*), равным 0,001 м, а Максимальный размер поверхности (*Max Face Size*), равным 0,0008 м. После этого необходимо нажать

ПКМ на **Mesh** и выбрать **Update**. Программа начнет процесс разбиения объемов конечно-элементной сеткой. После его окончания модель будет выглядеть следующим образом (Рисунок 2.7):

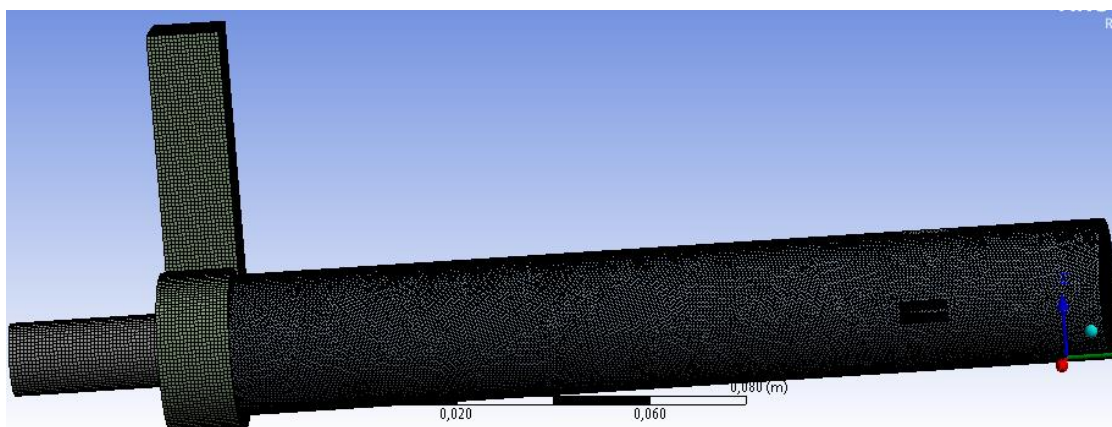


Рисунок 2.7 – Внешний вид построенной сетки

Теперь нужно обозначить поверхности для граничных условий входа и выхода рабочего тела. Для этого надо выделить необходимую поверхность, нажать ПКМ и выбрать пункт **Named Selection**. Откроется диалоговое окно (рисунок 2.8):

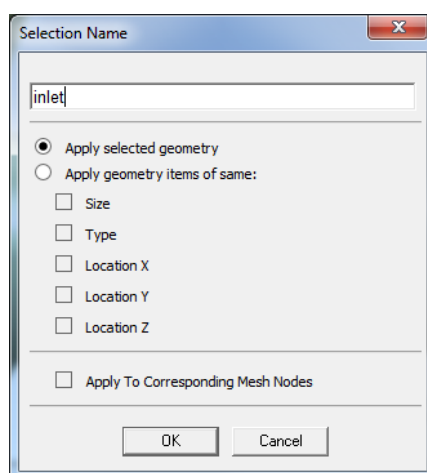


Рисунок 2.8 – Внешний вид окна выбора имени поверхности

Введите название поверхности **inlet** – для входного канала и **outlet** – для выходного.

После этого модуль **Meshing** можно закрыть.

## 2.3 Настойка решателя и граничных условий

### 2.3.1 Запуск программы ANSYS Fluent и ее особенности

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

Чтобы запустить программу, нужно в среде *ANSYS Workbench* зайти в модуль Setup. Откроется диалоговое окно запуска *ANSYS Fluent* (Рисунок 2.9).

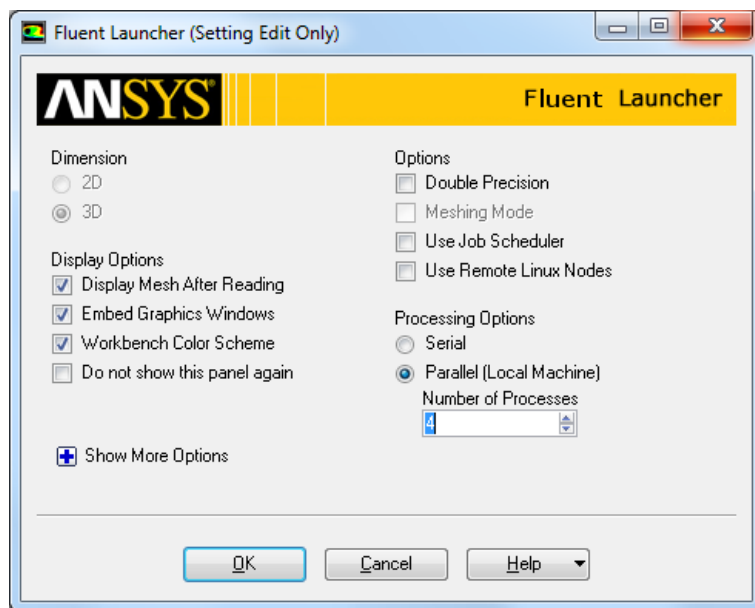


Рисунок 2.9 – Меню запуска программы *ANSYS Fluent* (*Fluent Launcher*)

В рассматриваемом случае задача является трехмерной. После выбора нужно нажать кнопку *OK*. В результате на экране компьютера появляется рабочее окно программы *ANSYS Fluent* (рисунок 2.10).

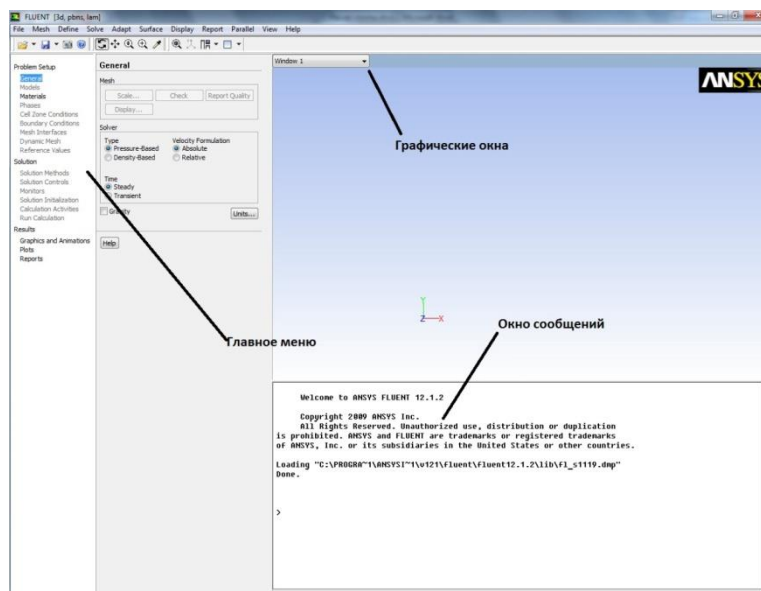


Рисунок 2.10 – Рабочее окно программы *ANSYS Fluent*

Окно программы достаточно простое и состоит из трех основных частей:

*главного меню*, через которое осуществляется доступ ко всем командам и меню программы;

*окна сообщений*, где находится командная строка и отображаются результаты выполнения команд;

*графических окон*, в которых отображаются результаты расчета и построений.

### Загрузка файла сетки

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

### Проверка конечно-элементной сетки на наличие ошибок

Проверка расчетной сетки на наличие ошибок осуществляется с помощью команды:

**ГМ: Mesh → Check**

После ее запуска программа начнет проверять конечно-элементную сетку (рисунок 2.11), а в окне сообщений появятся полные сведения о конечно-элементной сетке. Если будет найдена ошибка, то будет выдано соответствующее сообщение. В этом случае необходимо вернуться в программу *Meshing*, найти ошибку и исправить ее.

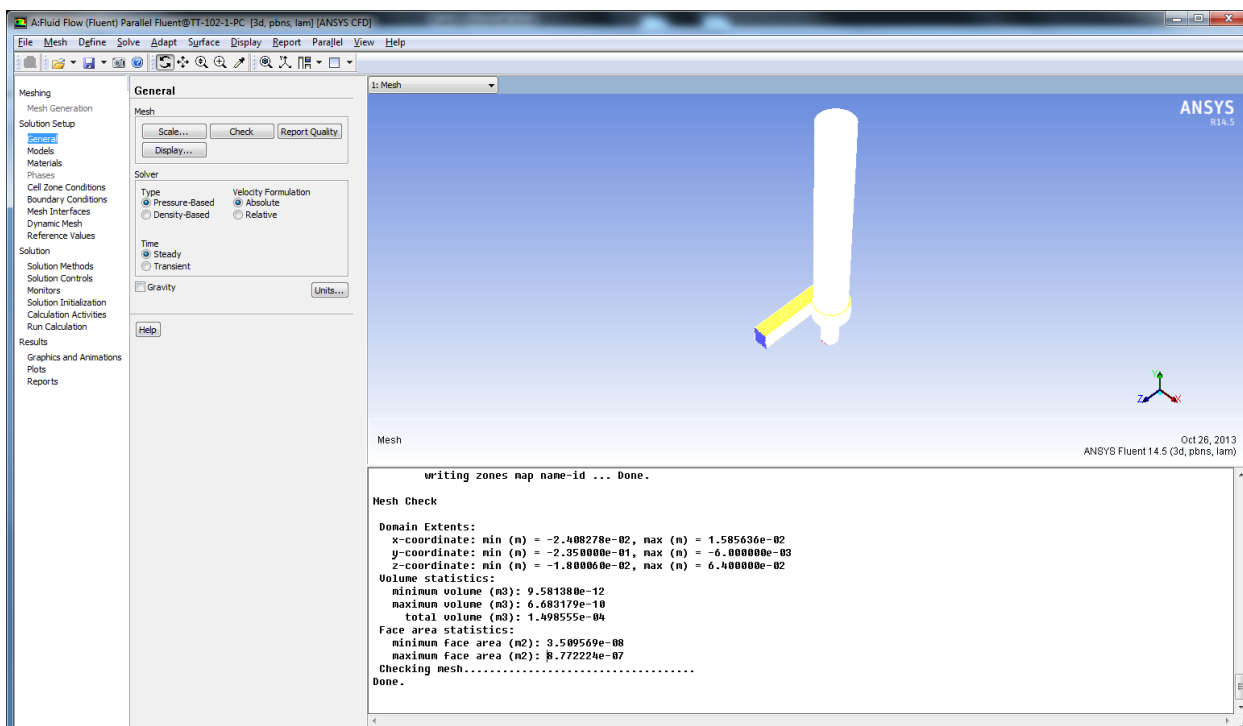


Рисунок 2.11 – Отображение Сетки (*Mesh Display*)

### Масштабирование конечно-элементной сетки

Геометрические размеры в *ANSYS Fluent* обязательно должны быть указаны в метрах, поэтому в случае создания модели в миллиметрах необходимо произвести её масштабирование. В нашем случае данный шаг не нужен, так как при переносе геометрической модели из *SIEMENS NX 8.5* в *ANSYS Design Modeler* масштабирование проводится автоматически.

### Просмотр конечно-элементной сетки.

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

*ГМ: Display* → *Mesh*

В появившемся меню *Mesh Display* (рисунок 2.12) в окне *Surfaces* требуется выбрать все поверхности, образующие сеточную модель. Следует обратить внимание на то, что имена в списке совпадают с именами поверхностей, заданных в *Meshing*. Для просмотра выбранных элементов сетки нужно нажать кнопку *Display*.

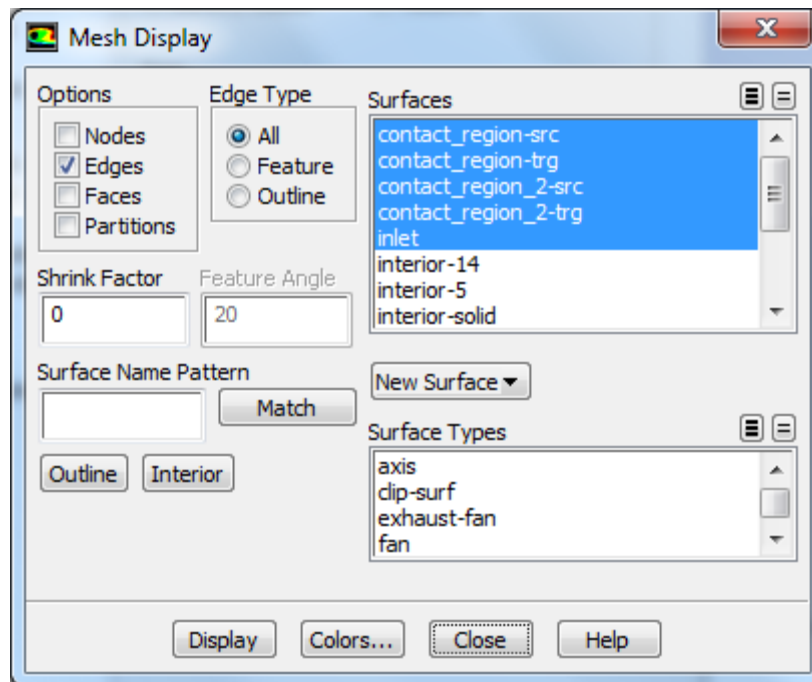


Рисунок 2.12 – Отображение сетки (*Mesh Display*)

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

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

### 2.3.2 Настройка параметров расчета

#### Задание опций решателя.

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

#### *ГМ: Define*

В меню *Solver* (рисунок 2.13) нужно обратить внимание на следующие моменты. Программа *ANSYS Fluent* позволяет использовать два алгоритма решений: *Pressure Based* (алгоритмом установления) или *Density Based* (алгоритм расщепления). Первый из них изначально разрабатывался для низкоскоростных потоков, но впоследствии был модифицирован и распространен и на другие течения. Алгоритм установления создавался для расчетов высокоскоростных транс- и сверхзвуковых потоков. Для решения рассматриваемой задачи целесообразно выбрать *Pressure Based*.

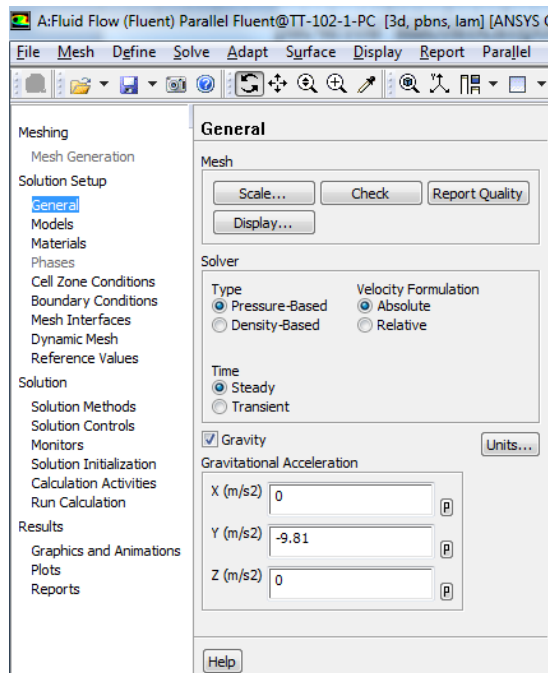


Рисунок 2.13 – Меню настройки решателя (*Solver*)

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

#### Выбор модели турбулентности

Поток жидкости характеризуется наличием *турбулентности* – беспорядочного движения вихревых масс. При этом на основное направление скорости накладываются поперечные составляющие, вызывающие сильное перемешивание жидкости/газа. При исследовании течения в канале теплогенератора целесообразно использовать модель турбулентности *k-epsilon*, поскольку она позволяет получать решения с приемлемой точностью, и для этой модели она хорошо сходится (рисунок 2.14).

*ГМ: Define → Models → Viscous.*



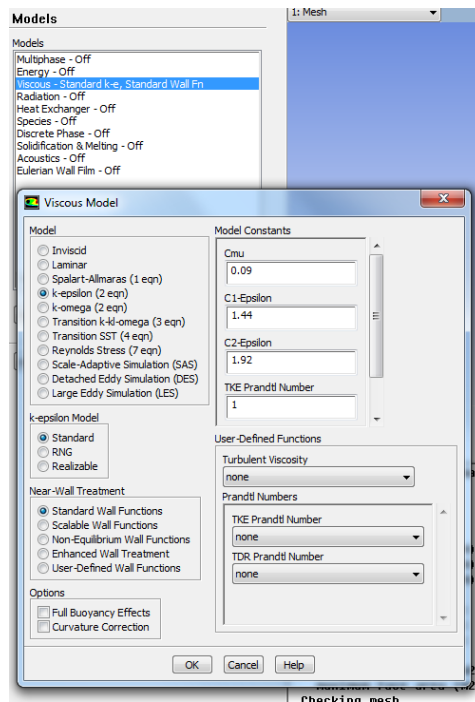


Рисунок 2.14 – Настройка параметров турбулентности (*Viscous*)

### Подключение уравнения энергии

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

***Define*** → ***Models*** → ***Energy...***

В появившемся окне нужно поставить галочку в строке ***Energy Equation*** и нажать ***OK*** (рисунок 2.15).

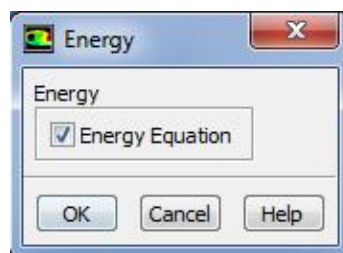


Рисунок 2.15 – Меню включения уравнения энергии (*Energy*)

### Настройка параметров двухфазного состояния

В рассматриваемой задаче будут присутствовать две фазы состояния – жидкость и газ (рисунок 2.16).

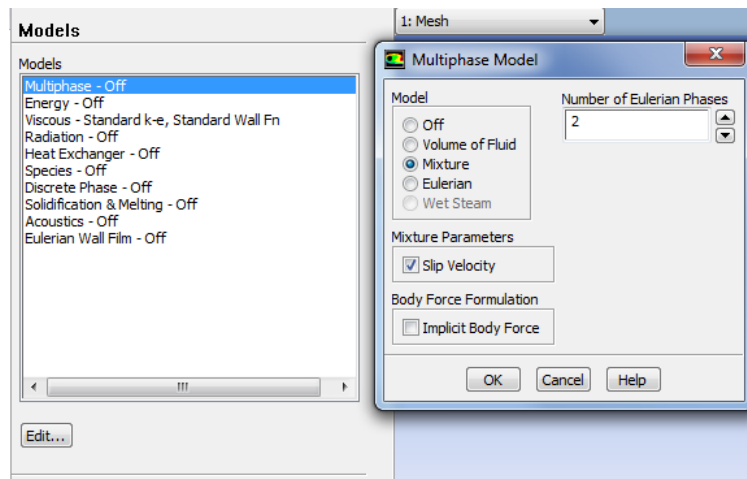


Рисунок 2.16 – Меню настройки параметров двухфазного состояния (*Multiphase*)

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

*ГМ: Define* → *Models* → *Multiphase*

#### Задание свойств рабочего тела и справочного давления

Задание свойств рабочего тела осуществляется в меню *Materials* (рисунок 2.17), которое вызывается командой:

*ГМ: Define* → *Materials*

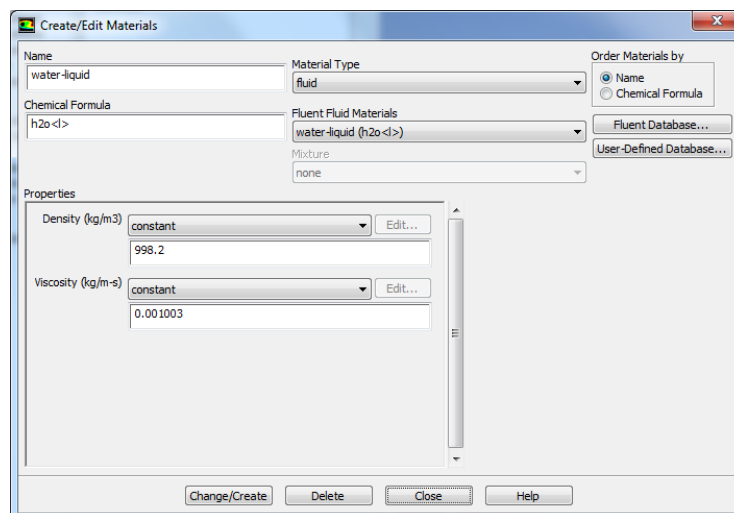


Рисунок 2.17 – Меню материалов (*Materials*)

В рассматриваемой задаче в качестве рабочего тела используется вода и водяной пар. Для того, чтобы осуществить эту установку, в меню *Materials* необходимо нажать

кнопку *Fluent Data Bases*, далее в появившемся списке *Fluent Fluid Materials* выбрать необходимые материалы:

Задать в опции **fluid** water-liquid из базы.

Задать в опции **fluid** water-vapor из базы.

Особенность программы *ANSYS Fluent* состоит в том, что давление, получаемое и задаваемое в расчете, является избыточным. То есть для того, чтобы получить истинное значение давления, необходимо прибавить к нему так называемое «справочное давление». По умолчанию в его качестве используется нормальное атмосферное давление – 101325 Па. Если в качестве «справочного давления» принять 0, то результаты расчета и исходные данные будут задаваться в абсолютных значениях. Изменить значение «справочного давления» можно в меню (рисунок 2.18), которое появится в результате выполнения команды:

*ГМ: Define* → *Operating Conditions*

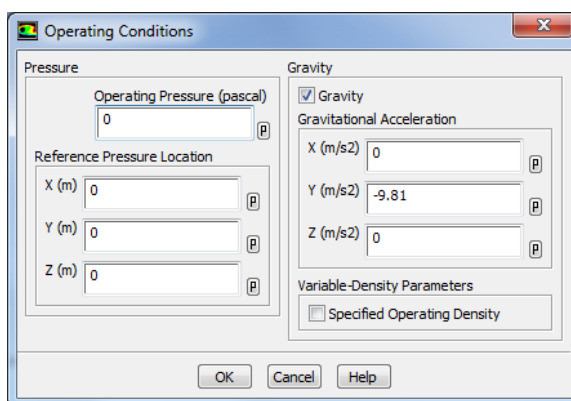


Рисунок 2.18 – Справочное давление (*Operating Conditions*)

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

#### Установка модели кавитации

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

*ГМ: Define* → *Phases*

Далее необходимо выполнить следующие действия:

установить phase-1 – **water-liquid** (рисунок 2.19);

установить phase-2 – **water-vapor**.

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

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

**ГМ: Define** → **Phases** → **Interaction ...**

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

устанавливается значение давления насыщенных паров **Vaporization Pressure** до 2650 и сохраняются значения по умолчанию для других параметров (рисунок 2.20).

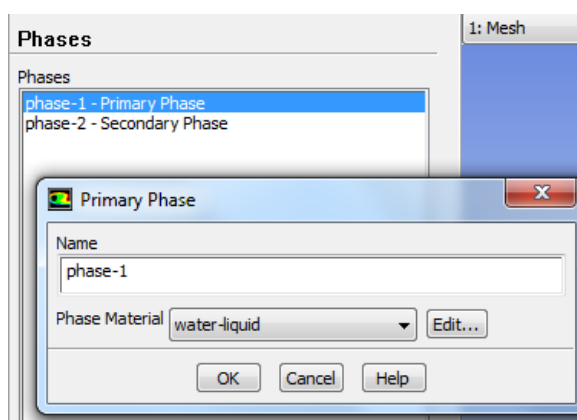


Рисунок 2.19 – Выбор и установка фаз (**Phases**)

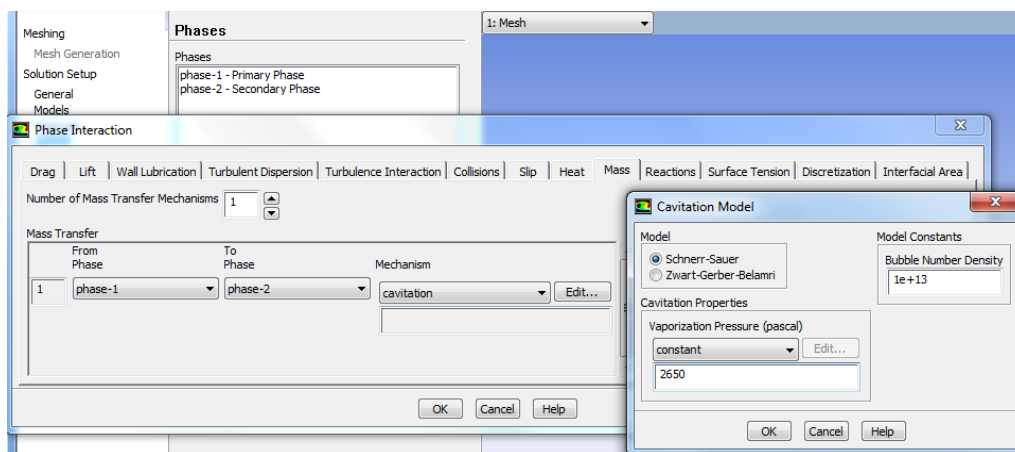


Рисунок 2.20 – Панель взаимодействия фаз (**Phase Interaction**)

### 2.3.3 Задание граничных условий

Меню задания граничных условий (рисунок 2.21) вызывается командой:

## ГМ: *Define* → *Boundary Conditions*

В поле **Zone** находится список всех граничных условий, определенных в **Meshing**. Если выбрать имя одного из них, например **inlet**, то в окне **Type** будет указан тип граничного условия. В случае необходимости в этом окне тип граничных условий можно поменять. Чтобы приступить к заданию граничных условий, необходимо в окне **Zone** выбрать нужное граничное условие, убедиться, что в окне **Type** тип граничного условия указан верно, в окне **Phase** указано **Mixture**, затем нажать **Edit...** После этого выполняются следующие действия:

Устанавливаются параметры для входного граничного условия (**inlet**), в соответствии с рисунком 2.22:

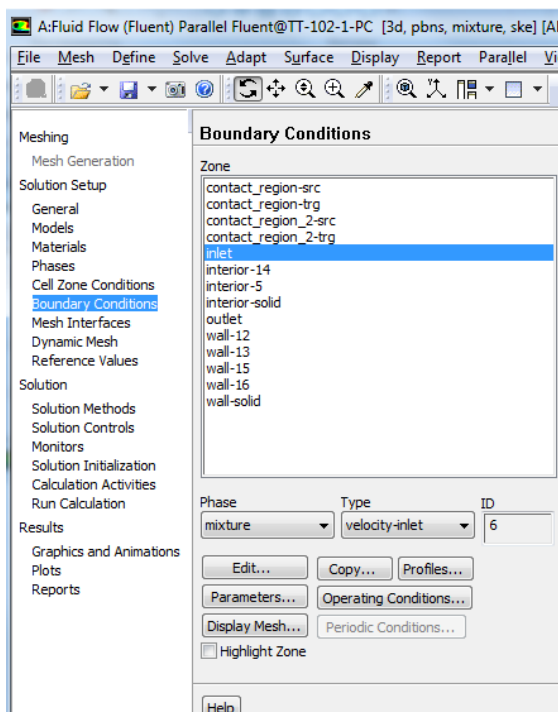


Рисунок 2.21 – Граничные условия (*Boundary Conditions*)

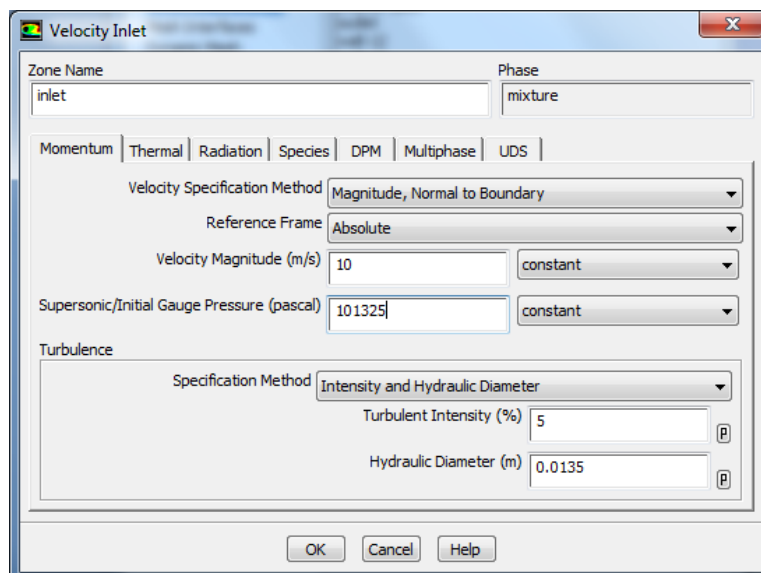


Рисунок 2.22 – Настройка граничных условий для входного сечения (*inlet*)

Затем проводятся настройки параметров выходного сечения (*outlet*), согласно рисунку 2.23:

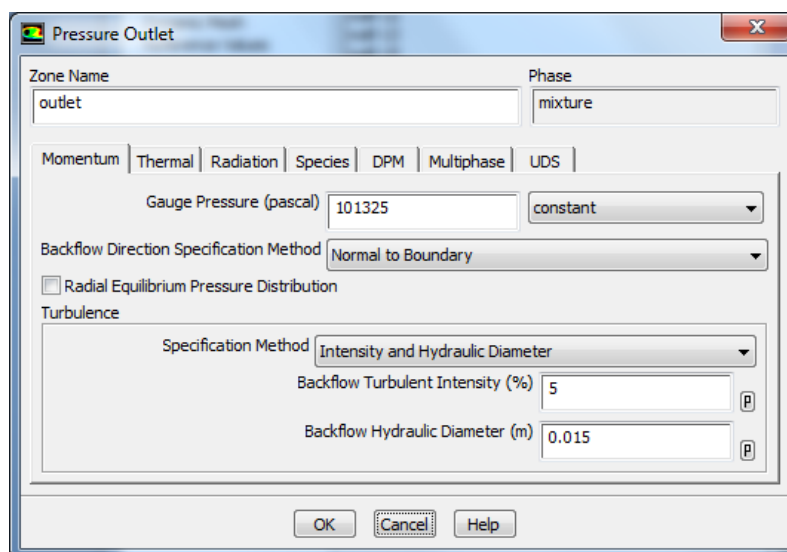


Рисунок 2.23 – Настройка граничных условий для выходного сечения (*outlet*)

#### Настройка зон проницаемости между отдельными областями сетки

ANSYS версии 14.5 производит автоматическое создание зон проницаемости, после чего они отображаются в окне Mesh Interfaces (рисунок 2.24):

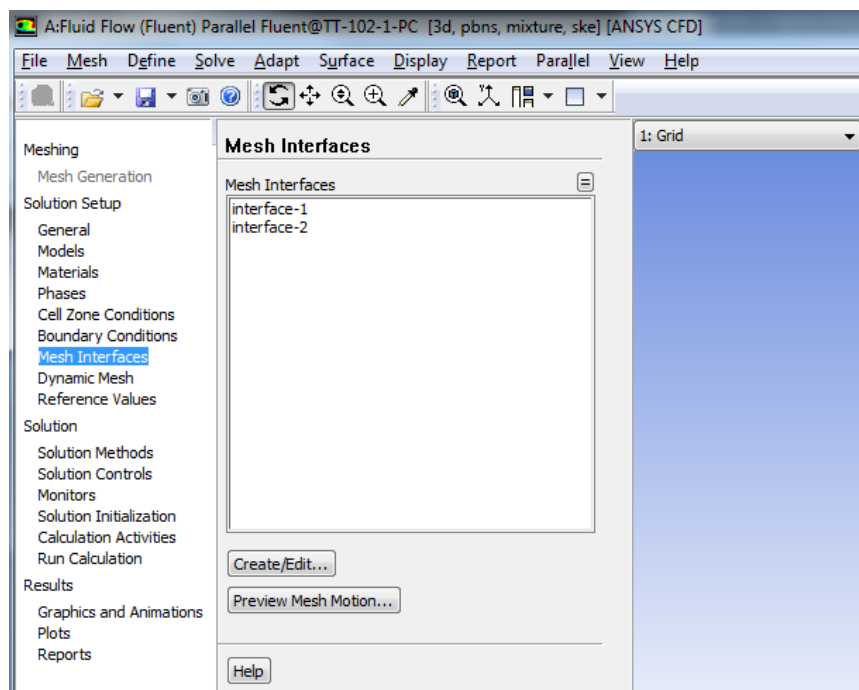


Рисунок 2.24 – Отображение созданных поверхностей

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

Для этого нужно в окне *Mesh Interfaces* нажать *Create/Edit*. Для создания зоны проницаемости (рисунок 2.25) в графе *Mesh interface* необходимо указать *interface-1*, в качестве *Interface Zone 1* выбрать *contact\_region-src*, в качестве *Interface Zone 1 - contact\_region-trg*, после чего нажать ОК. Аналогично создается *interface-2*, в качестве *Interface Zone 1 - contact\_region-src*, в качестве *Interface Zone 1 - contact\_region-src*.

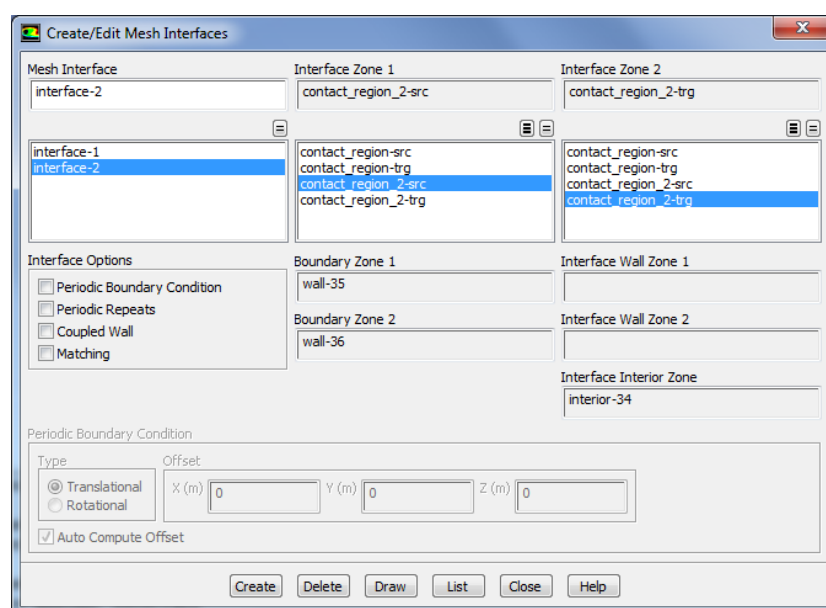


Рисунок 2.25 – Настройка создаваемых зон проницаемости

## Настройка процесса решения задачи

### Установка параметров расчета

Доступ к меню установки параметров расчета осуществляется с помощью команды:

*ГМ: Solve → Methods*

В результате на экране появится меню *Solution Methods* (рисунок 2.26).

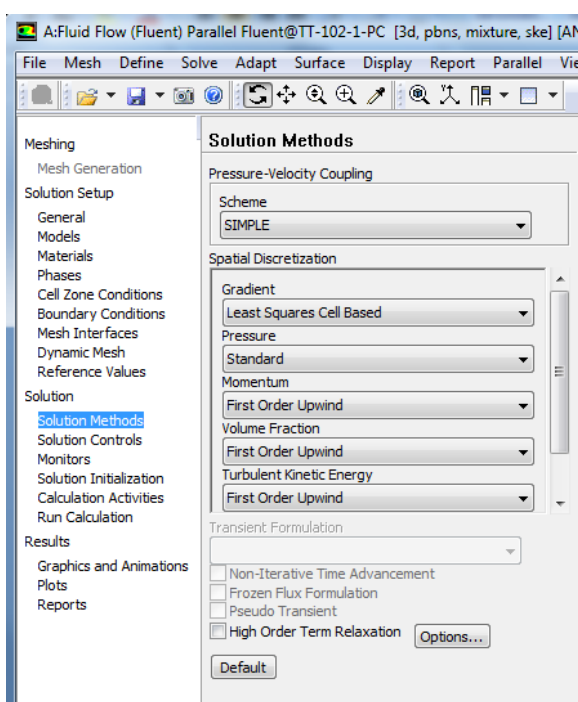


Рисунок 2.26 – Настройка параметров расчета (*Solution Methods*)

Данное меню состоит из трех основных групп настраиваемых параметров:

*Spatial Discretization;*

*Pressure-Velocity Coupling;*

*Transient Formulation.*

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

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



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

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

Установка начальных значений параметров расчета (инициализация процесса расчета).

При решении задач газовой динамики численными методами перед запуском решения необходимо установить начальные значения параметров в расчетной области. Меню установки начальных условий (рисунок 2.27) вызывается командой:

*ГМ: Solve → Solution Initialization*

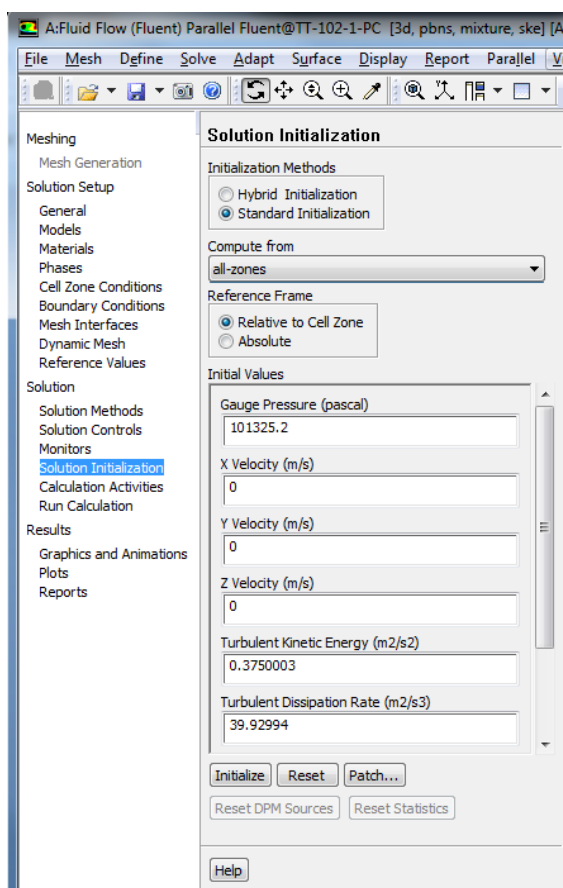


Рисунок 2.27 – Инициализация процесса расчета (*Solution Initialization*)

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

Настройка отображения процесса решения.

Для того, чтобы отображать невязки в процессе расчета, а также задать критерий остановки решения, необходимо вызвать меню **Residual Monitors** (рисунок 2.28) с помощью команды:

*ГМ: Solve* → *Monitors* → *Residual Monitors*

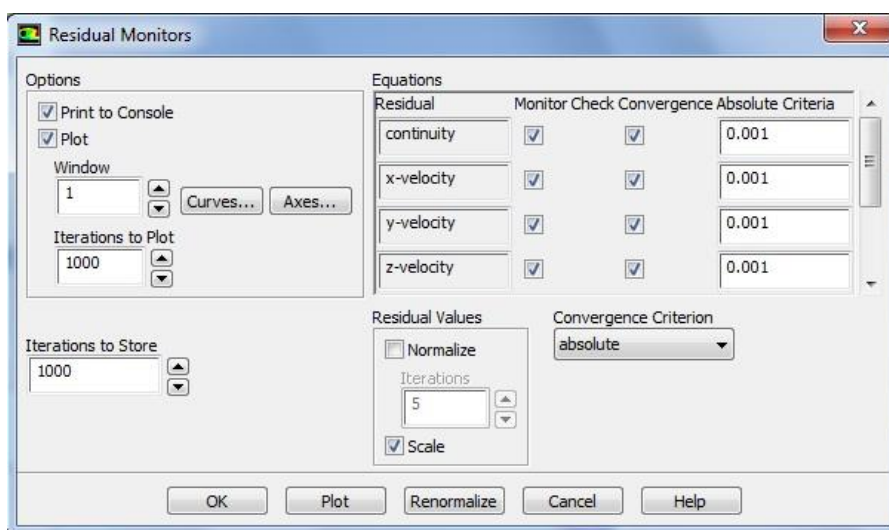


Рисунок 2.28 – Настройка отображения процесса решения (**Residual Monitors**)

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

В полях **Residual** друг над другом перечислены все решаемые уравнения, а напротив каждого из них установлены предельные невязки. Задача считается решенной, когда невязки по всем уравнениям окажутся меньше заданных значений. В этом случае процесс вычисления будет автоматически остановлен. Считается, что для получения точного решения достаточно достижения невязок  $10^{-3}$  по всем уравнениям. Для сохранения расчетной модели и всех сделанных настроек решателя необходимо вызвать команду:

*ГМ: File* → *Save Project*.

Запускаем расчет для 1000 итераций с помощью следующих действий (рисунок 2.29):

*ГМ: Solve* → *Run Calculation*

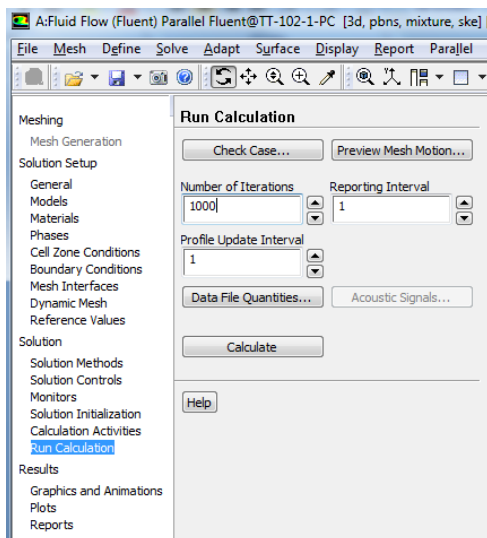


Рисунок 2.29 – Запуск процесса расчета (*Run Calculation*)

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

## 2.4 Обработка результатов расчета

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

*ГМ: Display* → *Contours*

В результате ее выполнения появится меню *Contours* (рисунок 2.30). Чтобы распределение параметров отображалось в виде полей, необходимо в окошке *Filled* поставить галочку. В противном случае распределения параметров будут изображаться в виде изолиний. Параметр, изменение которого требуется отобразить, выбирается в поле *Contours of*. Оно состоит из двух ниспадающих списков. В верхнем выбирается группа, к которой принадлежит нужный параметр (например, давление). В нижнем списке

уточняется, какой именно параметр группы требуется определить (например, статическое давление). Это типовая и часто используемая процедура выбора отображаемого параметра в программе *ANSYS Fluent*. Аналогичным образом, определяется параметр при определении среднеинтегральных значений. В поле *Surfaces* задаются поверхности, на которых строятся поля распределений параметров. В случае если нужно отобразить параметры по всей расчетной области, выбирается поверхность *interior-solid*.

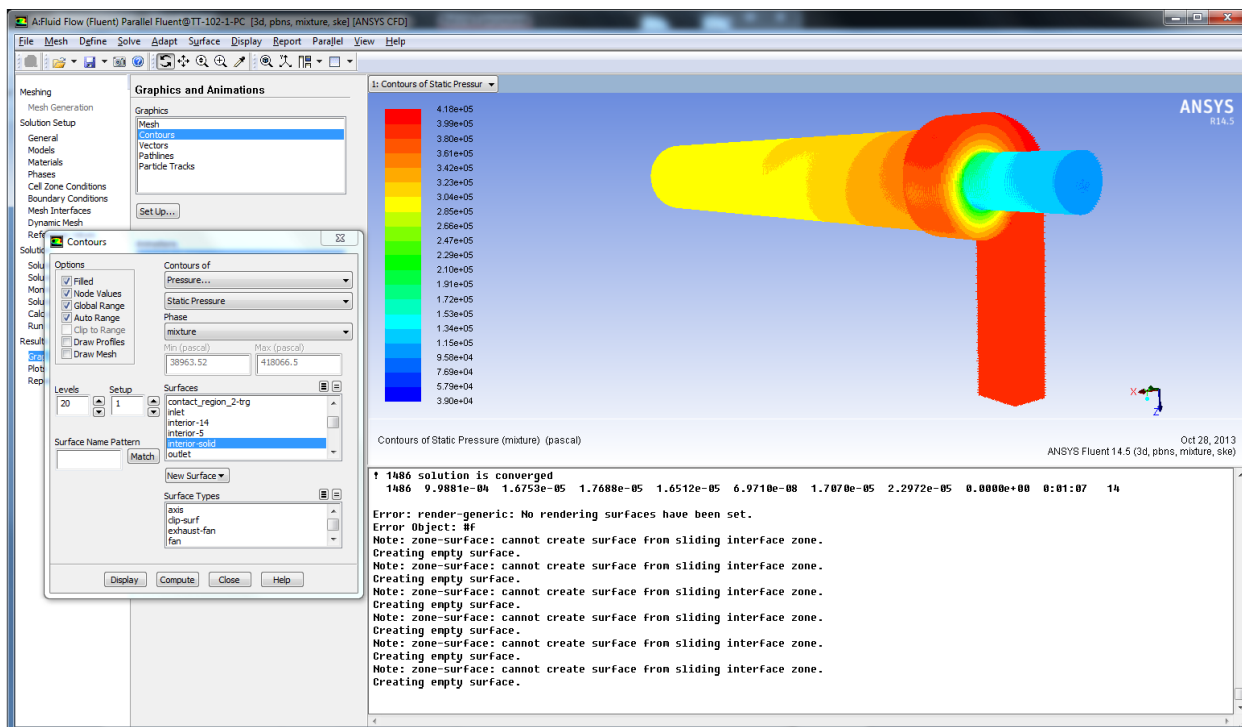


Рисунок 2.30 – Отображение полей статического давления (*Contours*)

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

*ГМ: Surface* → *Iso-Surface...*

В появившемся окне (рисунок 2.29) в поле *Surface of Constant*, выбирается *Mesh* (Сетка) и *X-Coordinate* (Координата-*X*).

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

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

Затем нажимается кнопка *Create* (Создать) (рисунок 2.32).

Аналогично создаются другие плоскости сечения.

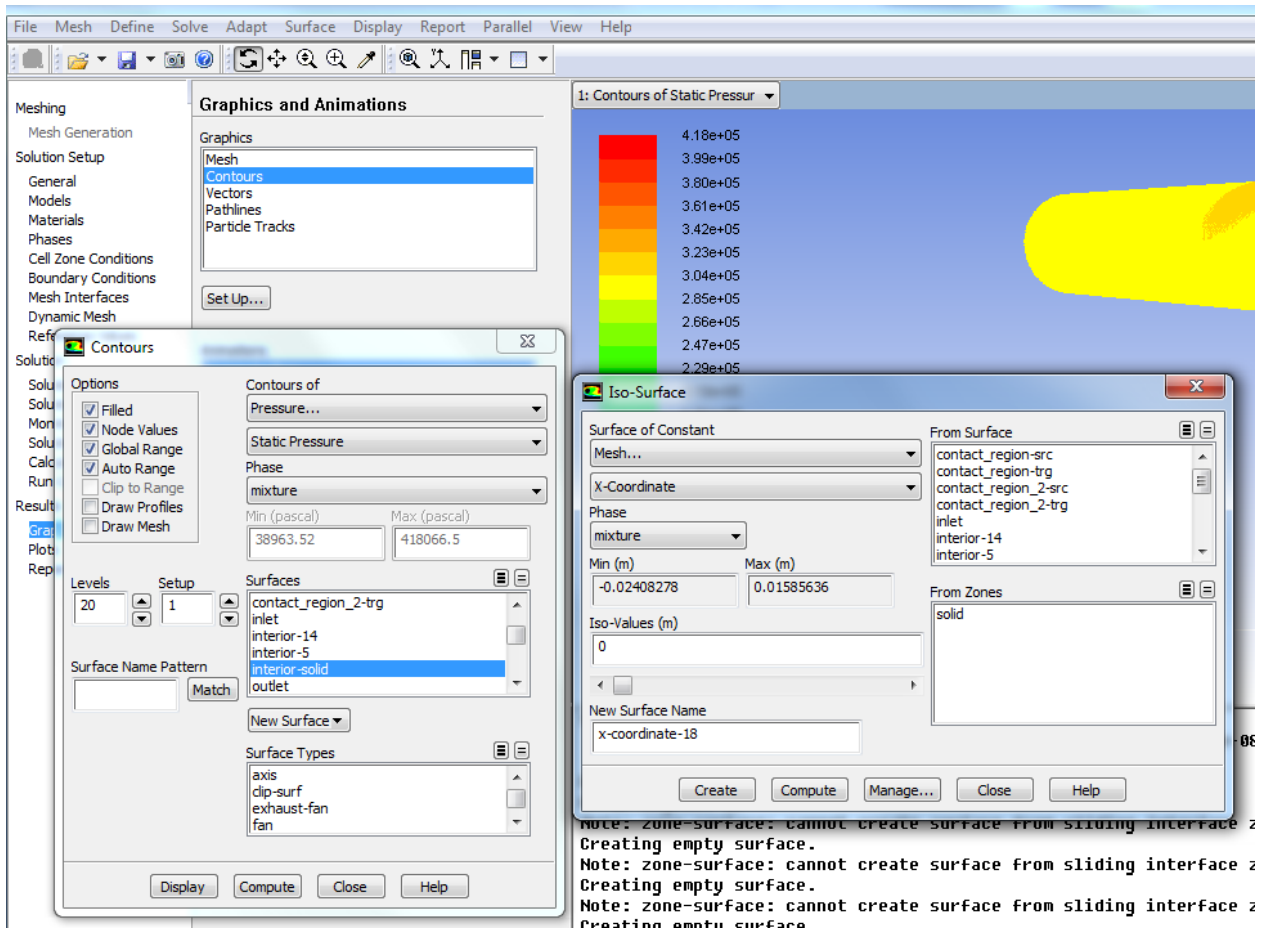


Рисунок 2.31 – Создание вспомогательной плоскости (Iso-Surface)

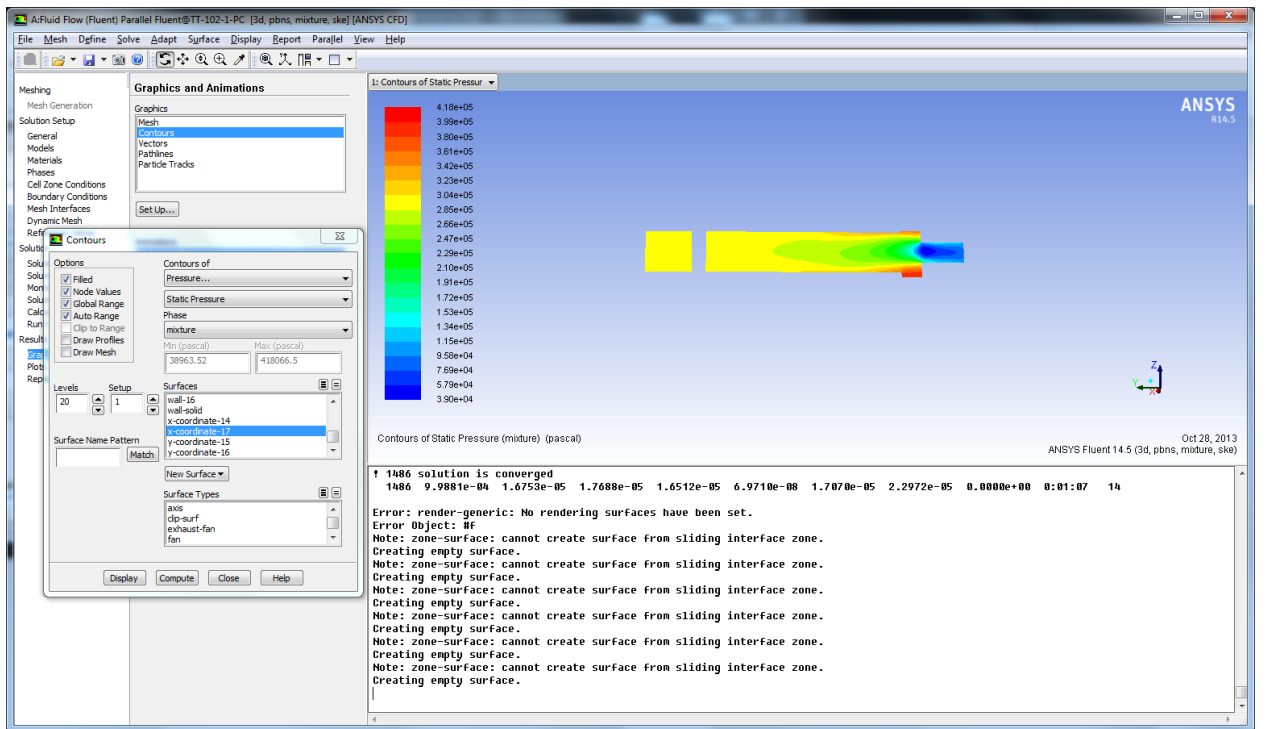


Рисунок 2.32 – Статическое давление в продольном сечении теплогенератора

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

*ГМ: Display* → *Vectors*.

В результате ее выполнения появится меню *Vectors*. В этом меню в поле *Surfaces* нужно выбрать поверхность или границу, где необходимо отобразить векторы. В зоне *Color by* задается закономерность окраски векторов. Цвет вектора в каждой точке расчетной области будет соответствовать величине параметра, определенного в зоне *Color by*. Если размеры векторов окажутся маленькими, их можно увеличить, задав большее число в поле *Scale* (рисунок 2.33).

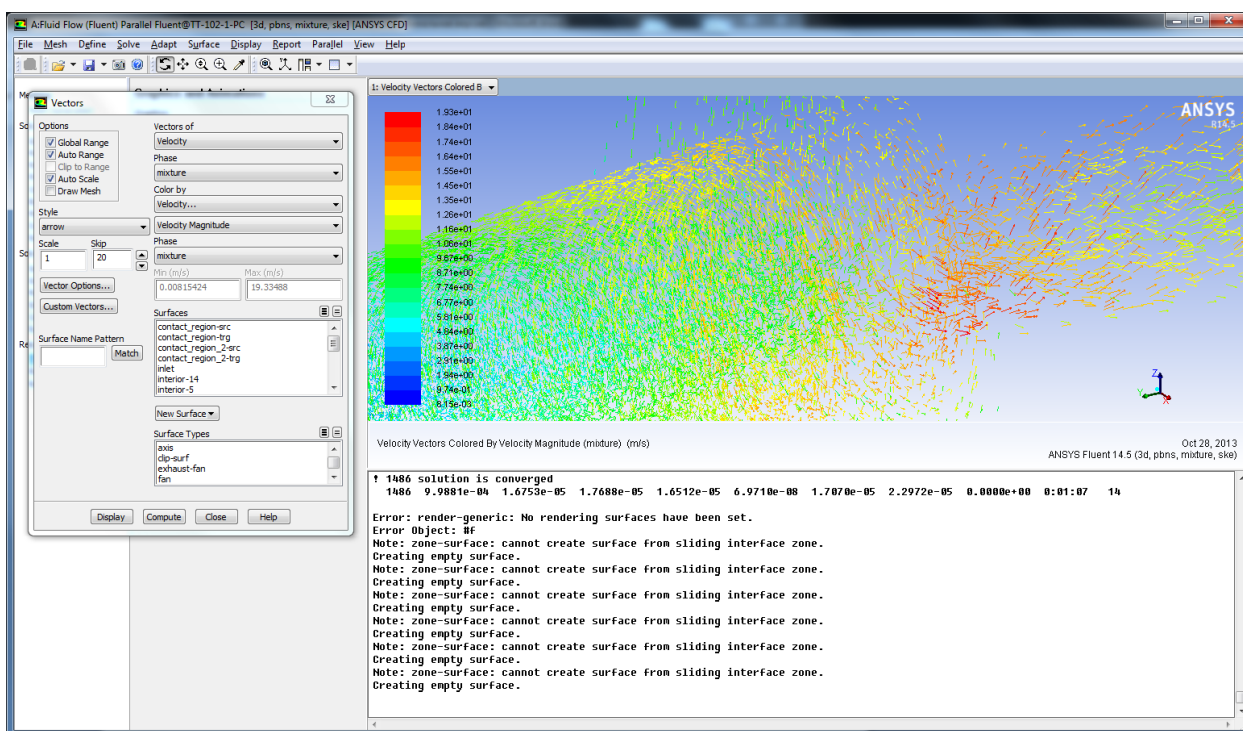


Рисунок 2.33 – Визуализация векторов скорости

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

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создано электронное учебное пособие по исследованию тепловых процессов в вихревом теплогенераторе. По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы:

- Создан алгоритм создания трехмерной модели внутреннего пространства теплогенератора;
- Создан алгоритм расчета теплогенератора в программе ANSYS Fluent;
- Проанализированы результаты расчета теплогенератора.

По результатам анализа можно сделать вывод, что при данных начальных условиях кавитации не происходит. Причинами этому может быть недостаточно низкое статическое давление внутри трубы, что в совокупности с небольшой температурой жидкости не позволяют эффекту кавитации произойти.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Меркулов А. П. Вихревой эффект и его применение в технике. - М.: Машиностроение, 1969, с. 185.
2. А. Д. Суслов, С. В. Иванов, А. В. Мурашкин, Ю. В. Чижиков. Вихревые аппараты. М.: Машиностроение, 1985. 256 с.
3. 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.