

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)

**В. С. Мелентьев, А. С. Гвоздев, А. М. Уланов**

**Создание параметрической САД-модели двигателя с агрегатами:  
система запуска, маслосистема, система охлаждения, опоры**

Электронное учебное пособие

Работа выполнена по мероприятию блока 2 «Развитие и повышение эффективности научно-инновационной деятельности» и блока 3 «Развитие информационной научно-образовательной среды и инфраструктуры» Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка технологии и методического обеспечения для создания виртуального двигателя внутреннего сгорания и проектирование на этой основе ДВС мощностью 2 л.с.»

Соглашение № 2/13 от 03 июня 2013 г.

САМАРА  
2013

УДК 004.925.84:621.432(075)  
М 473

Авторы: **Мелентьев Владимир Сергеевич,**  
**Гвоздев Александр Сергеевич,**  
**Уланов Александр Михайлович**

Рецензенты:

доц. кафедры «Теплотехники и тепловых двигателей», к.т.н. Угланов Д. А.,  
инж. отраслевой научно-исследовательской лаборатории вибрационной прочности и  
надёжности авиационных изделий Давыдов Д. П.  
Компьютерная верстка: Гвоздев А. С.

**Мелентьев, В. С. Создание параметрической САД-модели двигателя с агрегатами: система запуска, маслосистема, система охлаждения, опоры [Электронный ресурс] :** электрон. учеб. пособие / В. С. Мелентьев, А. С. Гвоздев, А. М. Уланов; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. дан. (7 Мб). – Самара, 2013. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В пособии приведена теория и практика создания параметрических САД-моделей двигателей. Рассмотрены вопросы создания эскизов, выполнения операций по созданию геометрии, добавления дополнительной геометрии, создания сборок двигателя с анализом и применением необходимых граничных условий, а также общие вопросы технологии проектирования 3D-моделей. Приведены сведения по параметрическому моделированию. Даны практические примеры по использованию предложенной технологии моделирования основных деталей двигателя.

Учебное пособие предназначено для подготовки бакалавров по направлению 141100.62 «Энергетическое машиностроение» (ГОС-3), изучающих дисциплину «Компьютерные технологии поддержки проектирования» в 6 семестре.

Подготовлено на кафедре конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов СГАУ.

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>1 О технологиях создания САД-моделей</b> .....	5
<b>2 Создание 3D-моделей отдельных деталей</b> .....	18
<b>3 Создание 3D-модели двигателя</b> .....	97
<b>4 Технологии параметризации САД-моделей</b> .....	107
<b>4.1 Системы без параметризации</b> .....	108
<b>4.2 Системы на базе "умных моделей"</b> .....	108
<b>4.3 Системы на основе объектно-управляемого моделирования</b> .....	108
<b>4.4 Системы с моделированием, основанным на базе правил и условий</b> .....	109
<b>4.5 Системы с открытой расширяемой средой</b> .....	111
<b>4.6 Библиотеки готовых компонентов</b> .....	116
<b>4.7 Обоснование выбора количества параметров в модели</b> .....	118
<b>4.8 Ассоциативность моделей</b> .....	119
<b>4.9 Классификация параметров</b> .....	122
<b>4.10 Принцип инкапсуляции в параметрическом моделировании</b> .....	125
<b>4.11 Принцип абстракции в параметрическом моделировании</b> .....	127
<b>4.12 Принцип наследования в параметрическом моделировании</b> .....	128
<b>5 Параметризация деталей двигателя</b> .....	129
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	140
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b> .....	141

## ВВЕДЕНИЕ

Желание избежать доводки, создать другой способ проверки качества изделия, является главной движущей силой в создании все более совершенных систем автоматизированного анализа виртуальных моделей механизмов и машин. Для этого используются специальные алгоритмы технологии создания «виртуального двигателя», в которые САД-часть входит как один из основных этапов. Этот метод основан на следующих принципах: 3D-модель изделия, полностью описывающая конструкцию механизма (или ее часть), отправляется на кинематический расчет, в ходе которого определяются перемещения, скорости и ускорения всех элементов модели. Если они не удовлетворяют конструктора, он может вернуться к САД-пакету и изменить компоновку или размеры деталей. Иначе модель подвергается динамическому расчету, в ходе которого определяются силы и моменты, действующие в конструкции, в том числе и реакции во всех соединениях. Здесь опять возможен возврат к 3D-модели, либо же продолжение расчетов. Далее следует прочностной анализ, в ходе которого определяются напряжения во всех элементах. Если и прочность удовлетворяет конструктора, то далее следует переработка модели для производства, для чего также существуют специальные программы.

Если обеспечить универсальность модели для каждой из программ, то есть свободный обмен информацией между ними посредством специализированного программного обеспечения, то можно говорить об алгоритме проектирования двигателя, реализованного на базе интегрированных программ – «виртуальном двигателе».

## 1 О технологиях создания САД-моделей

На сегодняшний день можно с уверенностью сказать, что создание любого механизма состоит из следующих основных этапов:



Если для каждого звена этой цепочки подобрать подходящий программный пакет или их набор, а также обеспечить свободную циркуляцию информации между ними, можно говорить о создании алгоритма безбумажного проектирования. Идея подобного цикла существовала уже давно. Подобные объединения вытекают из самой сути алгоритмизации. Так, из набора отдельных программ синтезируются операционные системы, текстовые редакторы учатся работать с графикой и видео, графические редакторы объединяют векторные и растровые форматы. Происходит это потому, что цифровое моделирование, использование которого все более возрастает по мере роста его универсальности, имеет ряд преимуществ по сравнению со старыми видами отображения действительности. Главным из них является расширение набора решаемых задач, которое достигается за счет гармоничного объединения различных функций и инструментов. Применительно к моделированию конструкции механических систем можно выделить следующие основные достоинства:

1. Интерактивность означает, что машина отслеживает попытки инженера внести изменения в конструкцию, будь то 2D или же 3D-моделирование. Современные пакеты оснащены целой системой всплывающих окон, интерактивных подсказок. Часто программа предлагает выбирать несколько вариантов применения изменений, разрешается предварительно просмотреть, как будет выглядеть принятая модификация. Также существует возможность отмены нескольких предыдущих действий.

2. Информативность означает, что каждая модель способна очень многое рассказать о конструкции изделия. Особенно это применимо к 3D-моделям. Возможность вращать модели, увеличивать или уменьшать их, делать произвольные разрезы и сечения, просматривать информацию о массово-инерционных характеристиках, видеть зазоры между деталями в сборке и так далее – все это позволяет в одном файле хранить все существенные свойства модели.

3. Возможность параметризации означает, что можно создавать базы, хранящие в себе все стандартные или широко использующиеся элементы, для которых пользователи могут задавать свои размеры. Пользователи могут и сами параметризовать свои модели, что позволяет изменением нескольких значений мгновенно преобразовать конструкцию изделия.

4. Легкость передачи означает, что раз созданная модель может легко передаваться из одной программы или с одной машины на другую, невзирая на различные операционные системы или расстояния. Свойство это тесно связано с универсальностью, которая означает способность использовать модель для различных целей, что предполагает целый комплекс программ. Конечно, совершенно универсальных форматов не существует, но в целом универсальность 3D-моделей во много раз выше цифровых 2D-аналогов, не говоря уже о бумажном варианте.

Сюда же можно отнести такие свойства, как эргономичность работы, длительное время хранения, легкость копирования, наглядность и многие другие.

Естественно, желание использовать эти преимущества, привело к многочисленным попыткам создания САД-программ, которые начали распространяться с конца 70-х годов, а массовое распространение получили в 80-е годы, с начала эпохи персональных компьютеров. Первоначально очень простые и узкоспециализированные, они постепенно усложнялись, включая в себя различные модули. Так, сейчас любая серьезная 3D-конструкторская

программа включает в себя модуль создания двумерных изображений. Сейчас стандартом проектирования является 3D-геометрия. Производители же CAD/CAM/CAE-систем пошли дальше, объединяя различные программы в целые пакеты, например, конструкторские, кинематические, динамические, прочностные программы объединяются в единый пакет.

2D-моделирование появилось намного раньше, чем 3D. Это связано с тем, что построение 2D-моделей значительно проще с точки зрения математической модели редактора. Естественно, гораздо ниже и требования к аппаратным ресурсам. Как только появилась возможность выводить на экран графическую информацию, а также относительно надежные и доступные средства распечатки цифровых рисунков (70-е годы XX века), началась эра автоматизации проектировочной деятельности.

Первоначально для построения диаграмм, несложных чертежей и таблиц использовались обычные графические редакторы, которые лишь впоследствии стали разделяться по разным направлениям. Одни из них сделали своей специализацией создание и изменение высококачественных рисунков (из них произошли современные графические пакеты), другие эволюционировали в направлении создания видеороликов, третьи выбрали своей специализацией появившийся позже Интернет. Среди всего этого разнообразия были программы, которые все больше ориентировались на чертежную работу. Из них и сформировалось семейство пакетов 2D-моделирования. Подобные программы конкурировали между собой, все время шла дифференциация пакетов по различным сферам, но в то же время, происходил синтез различных алгоритмов, что приводило к росту функциональных возможностей каждого. Вскоре настало время 3D-моделирования, и 2D-пакеты были поглощены выросшими на их базе программными средами для объемного моделирования. Сейчас 2D-программы отдельно практически не встречаются, а входят в качестве одного из модулей в среды трехмерных CAD-пакетов.

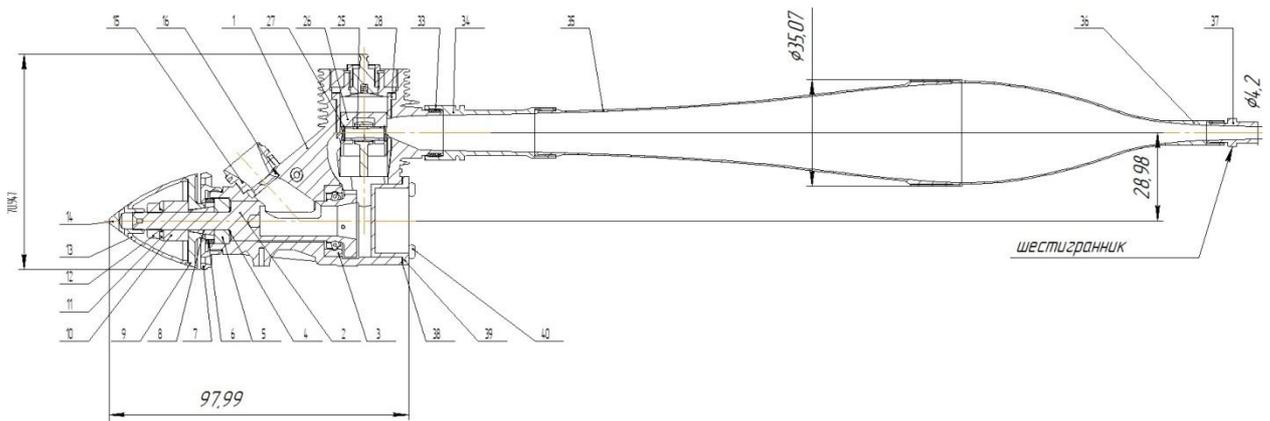


Рис. 1.1 – Фрагмент 2D-модели двигателя ПД-СГАУ

Одним из основных предпосылок к созданию 2D-программ, помимо роста аппаратных возможностей, стала унификация чертежных требований. Четкая разработка подобных правил позволила алгоритмизировать их и изложить на языках программирования. Как правило, таких комплексов стандартов программы предусматривают несколько. Например, *ANSI, ISO, DIN, JIS, BSI, GOST, GB*. Они различаются многими параметрами:

- Прежде всего, языком, на котором производятся все подписи и обозначения.
- Обозначениями размеров, значками и линиями.
- Шаблонами документов и многим другим.

Рассматривая подробнее основные свойства 2D-моделирования, можно отметить, что современные пакеты, как правило, включают в себя:

- а) Стандартные чертежные шрифты любого размера. Файлы шрифтов могут добавляться в программу при изменении стандартов. Как правило, поддерживаются и обычные шрифты MS Word.
- б) Шаблоны для создания всех типов чертежей со всеми необходимыми таблицами и полями. Самыми распространенными являются формы для сборочных и рабочих чертежей форматами A3 и A1, однако 2D-редакторы поддерживают все стандартные форматы с различным расположением основной надписи. При необходимости, формы могут быть упрощены.

Отдельные редакторы позволяют создать различные спецификации, в том числе многоуровневые. Названия деталей, упомянутые в спецификации, являются базой для их наименования в 3D-пакетах.

в) Набор линий разной формы и толщины: толстая, тонкая, пунктирная, штрихпунктирная и так далее. Как правило, линии подбираются автоматически в каждом конкретном случае.

г) Автопозиционирование видов, разрезов и сечений на листе. Особенно это актуально для рабочих чертежей сложных деталей. Конструктор может создавать все необходимые виды и разрезы, не заботясь о том, как их разместить на листе. Кроме того, 2D-модули часто поддерживают автоматическое создание одного или трех видов детали по ее 3D-модели.

д) В 2D-пакетах всегда предусмотрены библиотеки стандартных и часто встречающихся элементов.

- Прежде всего, резьбовые элементы. Так в КОМПАС-3D содержится библиотека стандартных метрических резьб, созданная на основе ГОСТов. Здесь же хранятся параметризированные модели болтов, гаек, винтов, шпилек и т. п.

- Прочие крепежные элементы (шпонки, клепки и т. д.).

- Модуль создания зубчатых колес различных типов.

- Модуль построения валов, с возможностью включения зубчатых колес.

- Библиотека электротехнических элементов и прочие специальные библиотеки.

Предусмотрено обновление и дополнение существующих библиотек, а также включение в программу новых.

Большое внимание уделяется параметризации. Наибольшего расцвета она достигает в 3D-моделировании, однако в 2D-пакетах она также присутствует в той или иной степени. Параметризацию вообще можно разделить на следующие виды:

Прямая пространственная связь. Универсальный метод параметризации, из-за своей простоты использующийся всюду, в том числе и за пределами САД-пакетов. Например, ряд геометрических объектов (линий и точек) объединяется в группу, которая в дальнейшем воспринимается как единое целое. На простейшем уровне так создаются стандартные фигуры (скажем, прямоугольник состоит из четырех линий). На более сложном уровне вы можете работать уже не с линиями и фигурами, а с видами, разрезами или их частями. Другим, более сложным, вариантом пространственных связей являются параллельность или перпендикулярность прямых, горизонтальность, вертикальность, симметричность и прочее.

Прямая размерная связь. Простой способ связать между собой размеры детали (линейные или угловые), записав уравнение вида

*Размер А* = математическая функция от *Размера В*.

Например,  $A = (B + 2) / 3$ .

В более сложном виде этот метод позволяет задать зависимость одного размера от нескольких других. Данный метод широко используется в пакете SolidWorks.

Косвенная размерная связь. Не всегда удобно параметризовать чертеж, связывая размеры друг с другом. Иногда требуется задать их зависимость от неких параметров, не связанных с длинами и углами. К тому же, связь эта может быть весьма сложной. В этом случае каждый размер обозначается некоторой переменной, имеющей уникальное название. Затем в модель добавляются внешние переменные и пишутся уравнения.

Совершенно очевидно, что стандартные библиотеки основаны на косвенной размерной связи, автоматическая параметризация использует прямые пространственные связи, а для обычных чертежей удобно использовать прямую размерную связь. Аналогично построена параметризация для 3D-моделей, хотя имеются некоторые дополнения.

*Интерактивный режим* подразумевает следующие элементы:

- Получение краткой справки о назначении кнопок при задерживании на них указателя мыши.
- Отправка в соответствующий отдел *Help* при нажатии специальной клавиши в процессе сложной операции.
- Строка состояния, куда выводится текущая информация. Когда пользователь не производит операций с моделью, данная строка пуста либо отображает статистическую информацию. При работе с моделью там выводятся данные о состоянии модели, а также рекомендуемый следующий шаг. Например, «*укажите радиус окружности*» или «*выберите конечную точку прямой*».
- Специальный инструмент, который способен найти ошибки в модели и вывести соответствующий отчет. Некоторые модели предлагают еще и варианты устранения на выбор.
- Звуковые сигналы, соответствующие проводимым операциям, изменение внешнего вида кнопок и панелей, предоставление шаблонов и прочие методы поддержания диалога «человек-машина».

*Точность построения, отображения и масштабирования.* Раньше в технике на чертежах могли не ставиться размеры, поскольку необходимые измерения можно было сделать непосредственно с чертежа. Сейчас принят другой стандарт, согласно которому все необходимые размеры обязательно указываются на чертеже. 2D-пакеты поддерживают оба этих стандарта, что позволяет пользователю измерить точное расстояние между любыми объектами в модели.

Различные программы используют свои форматы для хранения 2D-моделей. Все форматы можно разделить условно на две большие группы:

*Программные форматы.* Эти форматы используются только одной программой и нигде более не применяются.

*Нейтральные форматы.* Эти форматы в большинстве своем тоже раньше принадлежали какой-то отдельной программе, которая была или остается

стандартом для своей области. Либо они специально создавались для обмена информацией между пакетами. Их основное отличие в способности большинства программ «понимать» скрытую в них информацию с той или иной степенью качества. Без нейтральных форматов невозможно создание сквозных алгоритмов автоматизированного проектирования, поскольку без них программы не могут «общаться» друг с другом. Нейтральные форматы также можно разделить на группы: универсальные или специальные, для передачи геометрии или результатов расчета, полные или компактные и так далее. К нейтральным форматам можно отнести: \*.igs, \*.step, \*.x\_t и .x\_b (*Parasolid*), \*.dwg, \*.dwt и другие.

2D- и 3D-моделирование тесно связаны. В большинстве современных пакетов двумерные профили используются в процессе создания объемной модели, о чем подробнее рассказывается в следующей главе.

В современном промышленном производстве роль обычного 2D-моделирования постепенно отходит на второй план, хотя пока обойтись без двумерных чертежей не представляется возможным. Причина – человеческий фактор. Там, где производство и сборка изделий производится роботами, 3D-модели преобразуются в программы станков без 2D-этапа. Однако для многих рабочих трудно использовать 3D-модели при изготовлении деталей. Здесь большая информативность 3D-моделей оборачивается своей отрицательной стороной, в то время как обычный чертеж сообщает только необходимую информацию. К тому же, информацию о базах, шероховатостях, уклонах, допусках, посадках и т. п. пока удобнее снимать с 2D-модели. Но 3D-моделирование постоянно развивается, и возможно, в ближайшем будущем оно освоит этап производства.

Разумеется, для разных стран характерно разное внедрение CAD-пакетов. Для российских промышленных предприятий 2D-моделирование еще долго будет оставаться стандартом на всех этапах жизни изделия наряду с постепенно отмирающим черчением вручную (речь идет о чертежной

документации, так как технические эскизы во все времена выполнялись и, вероятно, будут выполняться вручную). Что же касается мировых стандартов, то на этапе проектирования предпочтение обычно отдается 3D-моделированию, рассмотрению которого и посвящена следующая глава.

В любом 3D-пакете объемная геометрия создается на базе так называемых «примитивов». Однако примитивы эти существенно различаются в разных средах. Можно разделить их на две большие группы:

а) Программы с объемными примитивами. Например, ADAMS и ADEM. В этих пакетах имеется большой набор объемных примитивов: сферы, конусы, параллелепипеды, торы и так далее. Создавая модель, вы должны расположить их в определенном порядке, а затем с помощью булевых операций (сложения, вычитания, вырезания и других) создать деталь нужной геометрии. Новая геометрия называется *сложной*. Очень важно помнить, что булевы операции действуют только для примитивов. Примитив можно присоединить к сложной геометрии, а вот соединить сложные геометрии уже нельзя. Поэтому необходимо заранее разметить порядок соединения примитивов. К другим недостаткам метода относится сложность подбора примитивов для создания геометрий сложной формы, например пера лопатки. В силу своих недостатков данный метод сегодня используется редко. В пакете ADAMS он сохранился, так как здесь CAD-модуль играет вспомогательную роль.

б) Программы с эскизным методом построения. К ним относятся SolidWorks, NX, КОМПАС-3D и большинство других современных программ. Данный метод не использует объемных примитивов. Вместо этого он применяет *эскизы* и *операции над эскизами*. Некоторые 3D-пакеты не имеют 2D-модулей, но все они способны создавать плоские эскизы. Итак, *эскиз* здесь – это некий плоский замкнутый контур, оснащенный всеми необходимыми размерами. Основное назначение эскиза – служить основой для 3D-геометрии, поэтому эскизы не имеют штриховки, знаков шероховатостей и

т. п. Для того чтобы эскиз мог стать объемной геометрией, с ним нужно выполнить одну из следующих операций: *вытянуть*, либо *провернуть* вокруг оси. В зависимости от направления и требуемых свойств эти операции выполняют разные инструменты:

вытянуть в объем вдоль  
линии;  
вытянуть в отверстие вдоль  
линии;  
повернуть в объем/отверстие  
вытянуть вдоль сплайна;  
повернуть на сектор;  
создать тонкостенный  
элемент.

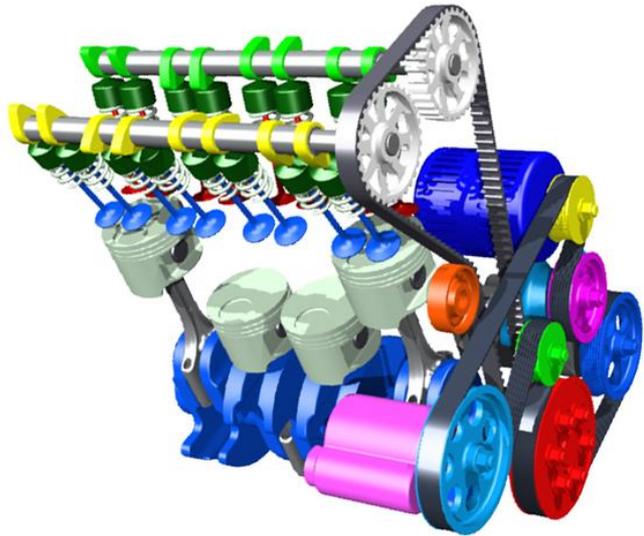


Рис. 2.2 – Модель рядного ДВС с ГРМ

И другие, более сложные. Так, например, возможно построение одного тела по нескольким эскизам (перо лопатки по сечениям).

Возможно создание трехмерных эскизов. Кроме того, с самими эскизами (и получившейся на их основе геометрией) можно выполнять множество дополнительных операций: копирования (массивами вдоль линий или вокруг осей), зеркального отражения, перемещения, масштабирования и так далее.

Создание из подобных объемов единой детали происходит потому, что при перекрытии тел их геометрии сливаются. Как правило, новые эскизы рисуются на плоских гранях существующего тела, однако могут размещаться и на специально созданных плоскостях. Для любого пакета наложение геометрии может происходить следующим образом:

Слияние. В этом случае первое тело (базовое) сохраняет всю свою геометрию, а второе тело (присоединяемое) сохраняет только ту часть,

которая лежит за пределами геометрии базового тела. Тела сливаются воедино. У них появляется общий центр масс, моменты инерции и масса.

Наложение. В этом случае тела соединяются внешней связью, но сохраняют каждое свои свойства: центр масс, текстуру, форму, моменты инерции, массу, название и другие.

«Склеивание». В этом случае тела сохраняют свою форму, массу, центры масс и моменты инерции. Однако их текстура и название становится общим. С этого момента они движутся как одно тело. По созданной 3D-геометрии возможно автоматизированное создание разрезов в любых плоскостях. По требованию, программа может создать любую заготовку 2D-вида либо их комбинацию, разумеется, без размеров и обозначений. Принцип построения 3D-геометрии не зависит от создаваемой детали, будь то газотурбинный двигатель или обыкновенный карандаш.

Однако для различных задач может потребоваться различная детализация модели:

1 Принципиальные – это модели, отражающие самую суть изделия. Они очень обобщенные, чаще всего стержневые.

2 Общие – это модели, которые используются для презентаций, изучения и передачи в САЕ-пакеты для кинематического, динамического и прочностного расчетов. Они имеют некоторые упрощения.

3 Детальные – модели, которые используются для передачи на производство (в том числе и для построения рабочих чертежей). Самые подробные модели. Очень часто в них закладывают информацию о допусках, посадках, шероховатостях поверхностей и т.п.

4 Специальные – модели для конкретной цели, например, расчета шума или подвески автомобильного двигателя. В них детализируется только требуемый аспект, прочие же упрощаются.

Для безбумажных алгорит-

мов проектирования основными являются общие модели.

Помимо отдельных деталей, 3D-пакеты позволяют создавать сборки. Сборка состоит из расположенных в определенном порядке деталей, оснащенных необходимыми связями.

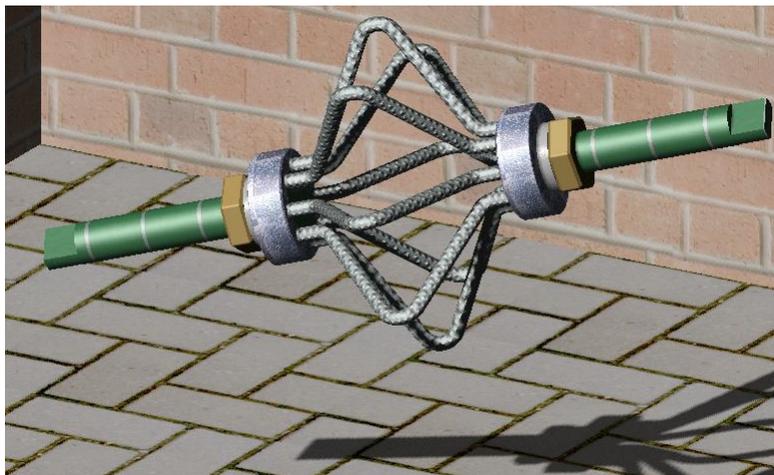


Рис. 1.3 – Фотореалистичная модель тросового виброизолятора

Благодаря этому, при перемещении одной детали изменяется положение остальных. Например, вращая коленчатый вал, вы можете наблюдать перемещение поршней в модели двигателя внутреннего сгорания. С помощью определенных соединений можно связывать перемещения граней, кромок, вершин, осей, плоскостей и других элементов. К самым распространенным связям относятся: совпадение, параллельность, перпендикулярность, касательность, концентричность, соосность. Для специальных задач используются особые типы связей.

Созданные детали легко добавляются в сборку. Как правило, файл сборки создается отдельно от файлов деталей, но после создания они оказываются связаны: при любом изменении детали автоматически перестраиваются сборка всех уровней, в которых она участвовала. Кроме доступных и для 2D-модели, в объемных геометриях возможна параметризация:

- отдельно эскизов и операций над эскизами, а также действий, например, копирования массива;
- положения деталей в сборке. Иногда допускается создание единого комплекса параметров для сборки, включающего в себя параметры

отдельных деталей. Однако, подобные опции не во всех пакетах доступны в полном объеме.

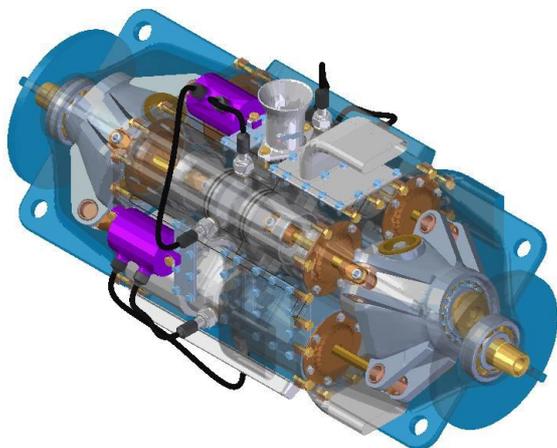


Рис. 1.4 – Четырехцилиндровый аксиальный ДВС с противоположно движущимися поршнями, разработанный в ОАО «СКБМ»

Задав плотность материала детали (либо сам материал из списка) можно определить массу детали. При этом автоматически вычисляются положение центра масс и моменты инерции.

Если определены массы всех деталей, можно проделать аналогичную операцию для сборки. Данная информация может быть сохранена в модели для последующих расчетов.

Иногда требуется создать модель реально существующего двигателя, например, для изучения возможности его модернизации. В данном случае очень важно обеспечить собираемость сборки. Поскольку детали выполнены с допусками и могли деформироваться в процессе работы, созданные по размерам детали могут не соответствовать друг другу. Особенно это важно для ряда линейно расположенных элементов, например, деталей на валу двигателя. Поэтому перед созданием деталей следует составить размерную цепь и убедиться, что тела впишутся в заданный объем. При создании моделей следует избегать также ненужных зазоров.

Для серии похожих деталей часто используют масштабную параметризацию, когда изменением масштабного фактора можно уменьшать или увеличивать детали в сборке в одинаковой пропорции. Выполненная таким образом модель для серии виброизоляторов показана на рисунке 1.3. Точно так же созданы базы стандартных деталей.

## 2 Создание моделей отдельных деталей

Рассмотрим создание отдельных деталей двигателя на примерах: от простой в построении детали, создающейся одной операцией и не имеющей дополнительных элементов (скруглений , фасок , отверстий  и т.д.), до самой сложной корпусной детали, имеющей более сотни сложных операций.



Рис. 2.1 - Поршневой палец

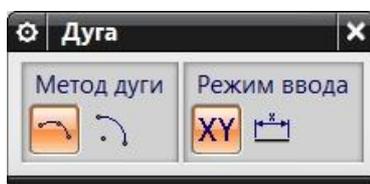
Рассмотрим создание детали "Поршневой палец" (см. рис. 2.1), созданной на базе двух эскизов  с использованием одной операции вращения . Эскиз  (см. рис. 2.3) описывает замкнутый контур, который при повороте относительно оси (см. рис. 2.4) создаёт замкнутый объём (см. рис. 2.5).

Для создания эскиза  применяются встроенные инструменты NX (см. рис. 2.2), которые:

 - создаёт ряд связанных прямых и/или дуг в режиме цепочки, то есть конец последней кривой становится началом следующей кривой

 - создаёт отрезок между двумя точками

 - создаёт дугу одним из двух методов: через три точки или указанием центра и конечных точек. Выбор метода осуществляется в дополнительном диалоговом окне, которое открывается при нажатии на значок 



 - создаёт окружность, проходящую через три точки или заданием центра и диаметра

 - создаёт скругление между двумя или тремя кривыми

 - создаёт фаску

 - создаёт прямоугольник одним из трёх методов: по двум крайним точкам, по трём точкам, от центра

 - позволяет динамически создавать и редактировать сплайны с помощью перетаскивания узлов и полюсов и назначения условий касания и кривизны в определяющих точках

 - создаёт точки эскиза

 - масштабирует цепочку кривых, лежащих в плоскости эскиза, через задание величины их смещения относительно исходной цепочки

 - обрезает или удлиняет линии до ближайшей точки пересечения

 - создаёт размерное ограничение (фиксирует размер элемента), тип размера зависит от контекста выбора объектов

 - добавить ограничения к геометрии эскиза: параллельность и перпендикулярность линий, совпадение точек (вершин) между собой или с линиями, нахождение средней точки линии, горизонтальность и вертикальность, коллинеарность линий, концентричность окружностей, равенство линий, равенство радиусов дуг, касательность.



Рис. 2.2 - Панель создания эскизов

Одну деталь можно сделать разными способами, среди которых есть более удачные и менее, трудоемкие и простые. Есть пути создания, которые на определённом этапе заводят в тупик. Для быстрого создания удачных моделей при создании эскиза  следует придерживаться нескольких простых правил:

1. Перед началом работы в среде NX следует чётко расписать последовательность операций в виде блок-схемы, что позволит сразу же отсеять многие неверные пути.

2. Следует стремиться к сокращению числа операций построения модели, поэтому все эскизы  должны быть максимально информативны, особенно первый. Например, поршневой палец (рис. 2.1) можно было бы создать четырьмя операциями: вытягивание цилиндра , прорезание отверстия , добавление внутреннего уклона , создание симметрии . Однако, использование операции вращения  позволило сократить дерево построения модели  до одной операции.

3. По возможности, следует использовать простейшие операции: вытягивание  и вращение . Это делает дерево построения модели  понятнее, облегчает перестроение модели, устраняет возможные ошибки при передаче модели в другие пакеты (для производства, динамического, газодинамического, прочностного расчётов и т.д.) и создании чертежей, делает возможным логичную параметризацию модели. Исключение составляют объекты, для создания которых предусмотрены специальные инструменты, например, листовой металл  или сварка .

Подробнее о создании эскизов  в среде NX можно узнать в [1].

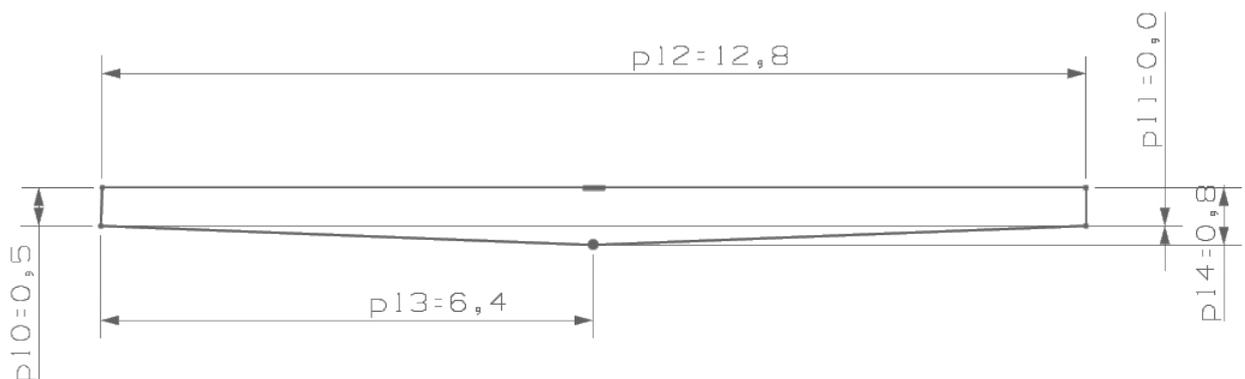


Рис. 2.3 - Первый эскиз  для создания поршневого пальца

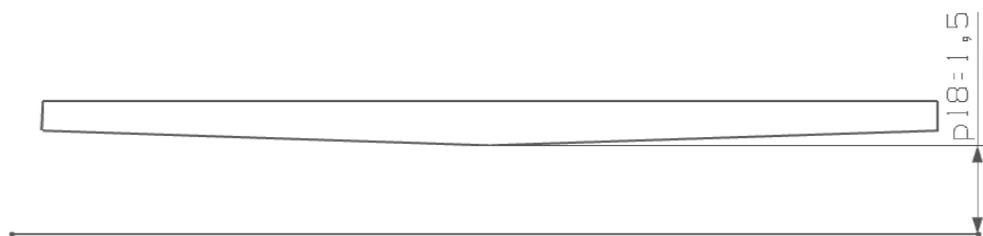


Рис. 2.4 - Второй эскиз  для создания поршневого пальца

Использование операции вращение  представлено на рис. 2.5. Для её работы требуется эскиз  с замкнутым контуром (см. рис. 2.3) и ось, относительно которой производится вращение контура. В качестве оси вращения могут выступать различные элементы, например, специально созданные координатные оси , оси системы координат  или линии эскиза . В данном случае в качестве оси использована линия , созданная в отдельном эскизе  (см. рис. 2.4). Рассмотрим подробнее диалоговое окно задания параметров операции вращение .

 - выбрать кривую. Задаёт замкнутый контур для операции. Если в качестве контура выбрать замкнутый эскиз , то все его линии будут приняты для операции автоматически, при этом в скобках указывается их количество. При добавлении в эскиз  дополнительных кривых при его редактировании требуется запустить инструмент редактирования свойств операции  в древе  и выбрать кривые мышью вручную. Кривые в контуре имеют номера. Порядок обхода кривых задаётся опцией : по часовой или против часовой стрелки. Инструмент  позволяет перейти к редактированию эскиза  с контуром.

 - задать начальную кривую. Данной командой выбирается кривая, которая имеет номер 1.

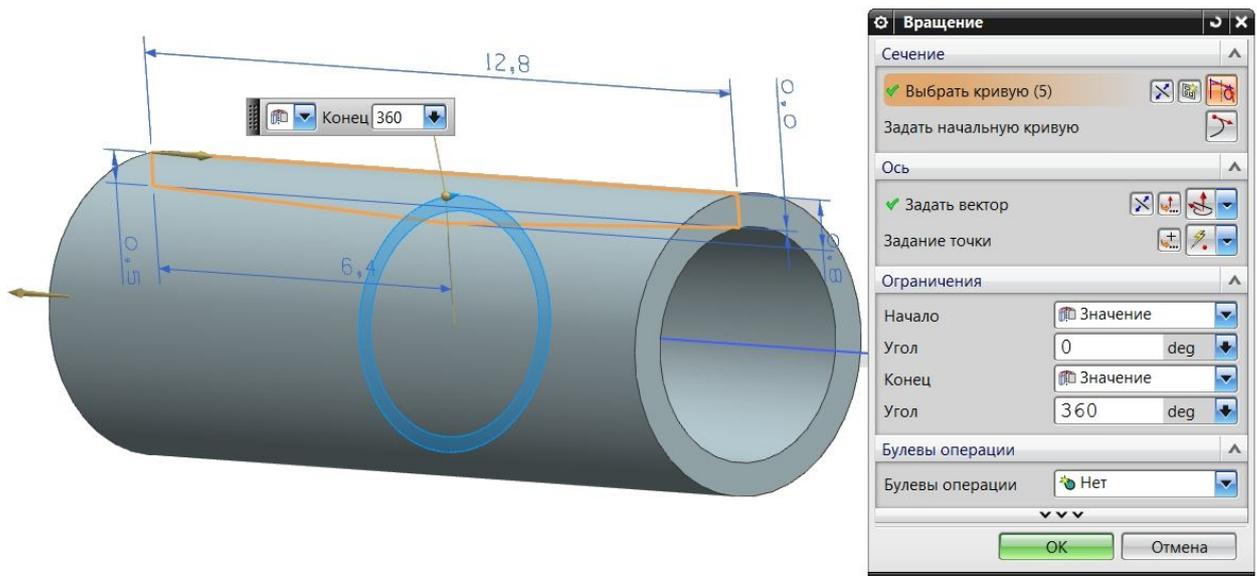


Рис. 2.5 - Создание объёма поршневого пальца с помощью операции "вращение" 

 - задать вектор. Задаёт направление оси вращения. В NX существует множество методов выбрать направление оси:

 - контекстный вектор. NX пытается определить направление вектора, анализируя выбранный пользователем элемент. Подходит, когда решение очевидно, например, если выбирается созданная ось , вращение будет происходить относительно неё.

 - две точки. Вектор создаётся указанием начальной и конечной точек.

 - вектор кривой/оси. Вектор создаётся указанием на существующие элементы геометрии.

 - вектор по кривой. Вектор задаётся по нормали либо по касательной к кривой.

 - нормаль грани/плоскости.

Следующие 6 команд ориентируют ось вращения согласно осям текущей системы координат .

 - противоположно оси X.

 - вдоль оси Z.

 - вдоль оси Y.

 - вдоль оси X.

 - противоположно оси Y.

 - противоположно оси Z.

 - направление вида. Ориентирует вектор по текущему виду, т.е. перпендикулярно плоскости экрана.

Более подробно задать параметры вектора можно с помощью инструмента "Меню вектора" .

В данной модели использован метод , когда в качестве оси выбрана заранее созданная линия эскиза.

 - задание точки. Если вектор указывает направление оси, то данный инструмент определяет точку начала этого вектора. Способов поиска нужной точки также может быть несколько, например, это может быть положение курсора , уже существующая точка , конечная точка , управляющая точка (определяющая угол наклона кривой) , точка пересечения линий , центр дуги, эллипса, сферы , точка квадранта , точка на кривой или ребре , точка на грани  и другие. Более подробно задать параметры точки можно с помощью инструмента "Меню точки" , в том числе возможно задать положение точки  по выражению = и прямое задание координат точки X, Y, Z в выбранной системе координат (общей либо связанной с деталью). Задание точки может не требоваться, если ось вращения совпадает с заранее созданной линией.

В полях **начало** и **конец** выбирается способ задания граничных плоскостей  для операции вращения . В данном случае (см. рис. 2.5)

выбран полный оборот сечения вокруг оси, начинающийся в нуле градусов и заканчивающийся в 360 градусах, т.е. в той же точке. Существует возможность задать границы операции  с помощью мыши. При этом требуется задать точку нахождения глаза виртуального наблюдателя в пространстве и угол его обзора. Также существуют другие методы указания граничных условий:  - путём измерения существующего угла,  $f(x)$  - функции,  $=$  - с помощью формулы или  - ссылки. Последние два условия позволяют осуществлять параметризацию размеров модели.

Использование булевых операций  позволяет в процессе создания тела объединять его с ранее созданной геометрией  или вычитать из неё.

 - нет. Операция создаёт новое тело.

 - объединение. Операция объединяет созданное тело с предыдущими. Выбор тела, с которым производится объединение задаётся инструментом .

 - вычитание. Операция исключает объём, занимаемый телом из ранее созданной геометрии .

 - пересечение. Операция оставляет в модели только геометрию, в которой объёмы вновь создаваемого и ранее созданных тел  пересекаются.

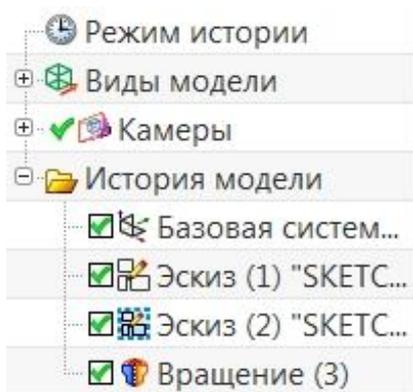


Рис. 2.6 - Древо модели 

"Поршневой палец"

Итоговое древо модели  "Поршневой палец" показано на рис. 2.6.

Подробнее о конструкции двигателей внутреннего сгорания (ДВС), функциональном назначении отдельных деталей, принципах их работы и выборе размеров деталей можно узнать в [2].

Для знакомства с операцией вытягивание  рассмотрим построение модели задней прокладки двигателя (см. рис. 2.8). Создание модели, как обычно, начинается с выбора плоскости для построения эскиза . В качестве плоскости могут быть использованы одна из плоскостей системы координат  или вновь созданная плоскость . С использованием рассмотренных выше инструментов производится создание эскиза  (см. рис. 2.7). Для получения корректной модели все элементы эскиза  должны быть образмерены , причём размерные линии требуется располагать так, чтобы размеры  хорошо читались, а размерные линии имели минимум пересечений. Из других требований ЕСКД хотелось бы отметить, что размерные цепочки должны быть расположены на одном уровне.

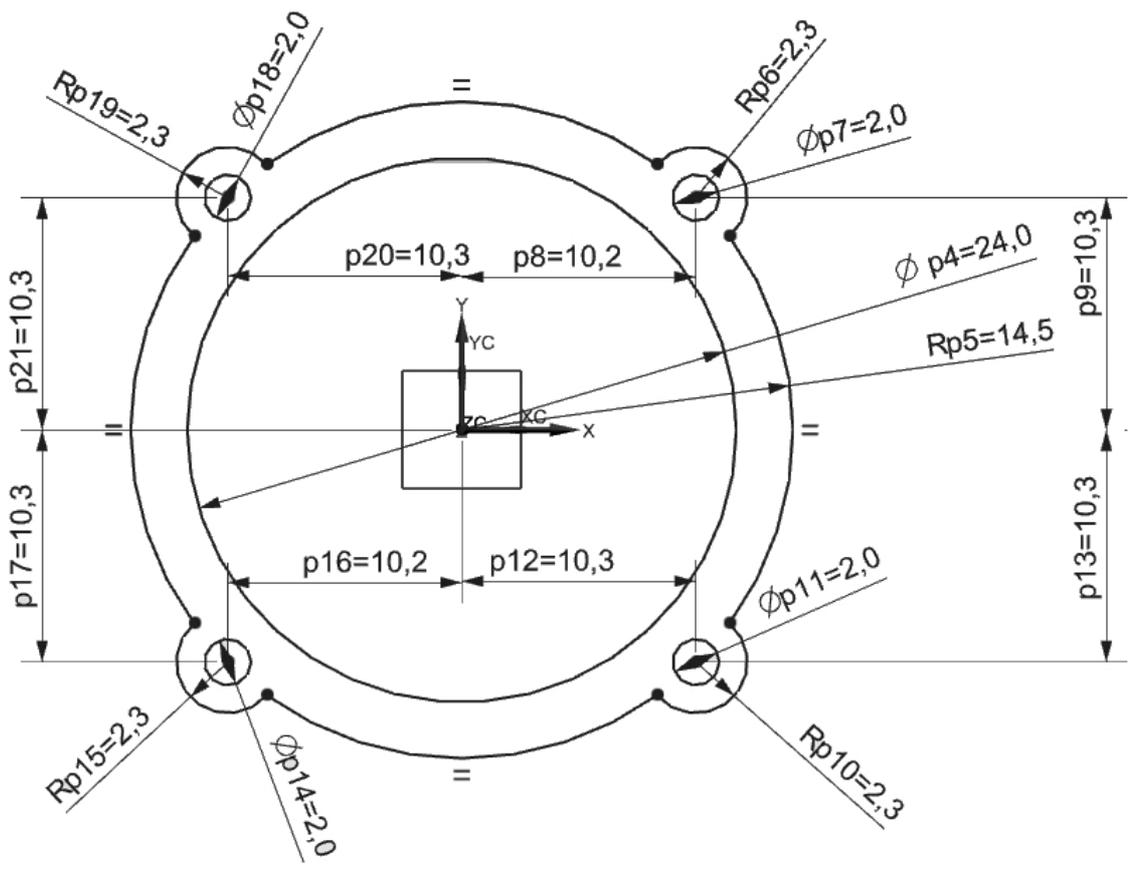


Рис. 2.7 - Эскиз  задней прокладки

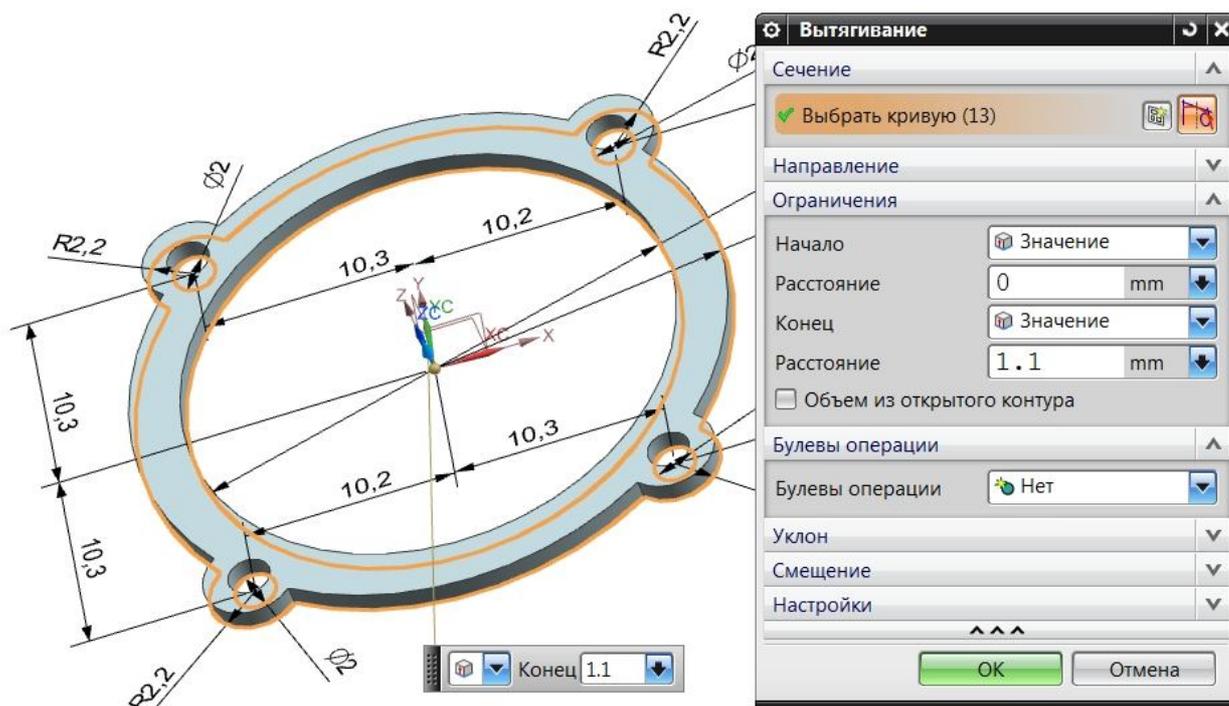


Рис. 2.8 - Создание геометрии задней прокладки методом вытягивания 

На рис. 2.8 показано использование на созданном эскизе  операции вытягивания . Все команды аналогичны применяемым при использовании операции вращения  за исключением того, что положение граничных плоскостей  задаётся не угловой координатой , а линейной , т.е. не в градусах, а в миллиметрах.

Рассмотрим совместное использование операций вращения  и вытягивания  для построения геометрической модели задней крышки (см. рис. 2.9). Для удобства понимания, используемые при создании эскизы  выделены синим цветом. Сначала вращением  создаётся основная цилиндрическая часть (см. рис. 2.9а), затем её передняя поверхность в виде сегмента окружности выступает плоскостью нового эскиза , который затем вытягивается , создавая фланцевую часть задней крышки (см. рис. 2.9б). Крепёжные отверстия на фланцевой части при таком методе построения выполняются внутри эскиза .

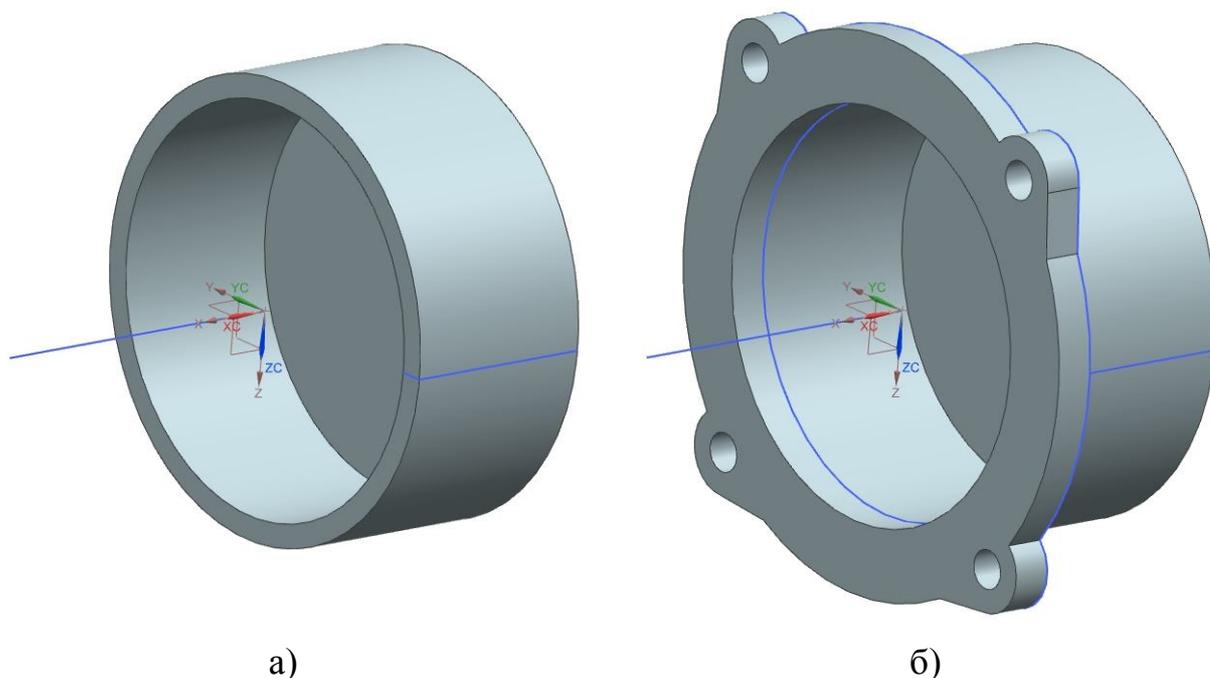


Рис. 2.9 - Создание геометрической модели задней крышки:

а) операция вращения ; б) операция вытягивания 

Сложнее в виртуальном моделировании деталь "Сопло" (см. рис. 2.10 - 2.13), на примере которой можно рассмотреть работу с массивами элементов . Массивы применяются для копирования однотипной геометрии моделях, например, создания ряда одинаковых бобышек  и отверстий (см. рис. 2.12) или создания второй половинки симметричной детали  за одну операцию.

Для создания зеркального массива  (симметрии или отражения) требуется указать элементы, которые будут копироваться и плоскость, относительно которой происходит копирование. В качестве плоскости может быть использована в т.ч. одна из граней тела, либо координатная плоскость  или одна из плоскостей системы координат .

Для создания массива копирования однотипной геометрии  существует несколько различных вариантов:

 - круговой массив. Создаёт несколько копий элемента относительно оси. Диалоговое окно задания параметров массива показано на рис. 2.12б. Выбрать элементы, которые будут копироваться можно с помощью команды



. Задание оси массива осуществляется аналогично заданию оси вращения операции . Далее задаётся количество элементов массива и их распределение по окружности: шаг между копиями или угол дуги на котором они равномерно распределяются. Возможно задать неравномерное распределение копий с помощью элемента "Список" в поле "Расстояние".

 - линейный массив. Создаёт массив вдоль одной или двух осей. В этом случае требуется задать направления массива, число элементов и их распределение.

 - массив вдоль. Имеет сходство с линейным массивом, однако здесь дополнительно задаётся направляющая кривая, вдоль которой, опять же на заданном расстоянии, будут размещаться элементы массива.

Рассмотренные варианты применяются наиболее часто. Однако, для более специфичных задач предусмотрены и другие варианты создания массивов:

 - массив по многоугольнику. Имеет сходство с круговым, однако здесь элементы располагаются относительно оси вращения не по окружности, а по рёбрам многоугольника.



- массив по спирали.

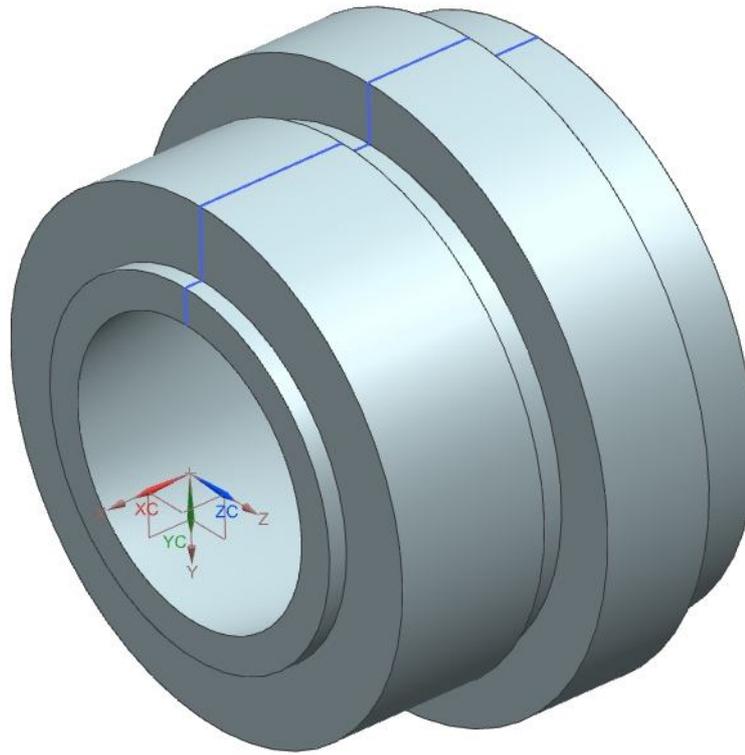


Рис. 2.10 - Операция вращения 

 - общий массив. Привязывает копии элементов к координатам точек в пространстве. Точки можно задать заранее в виде эскиза. Позволяет работать с таблицами.

 - массив ссылка. Использует шаблоны для размещения копий элемента.

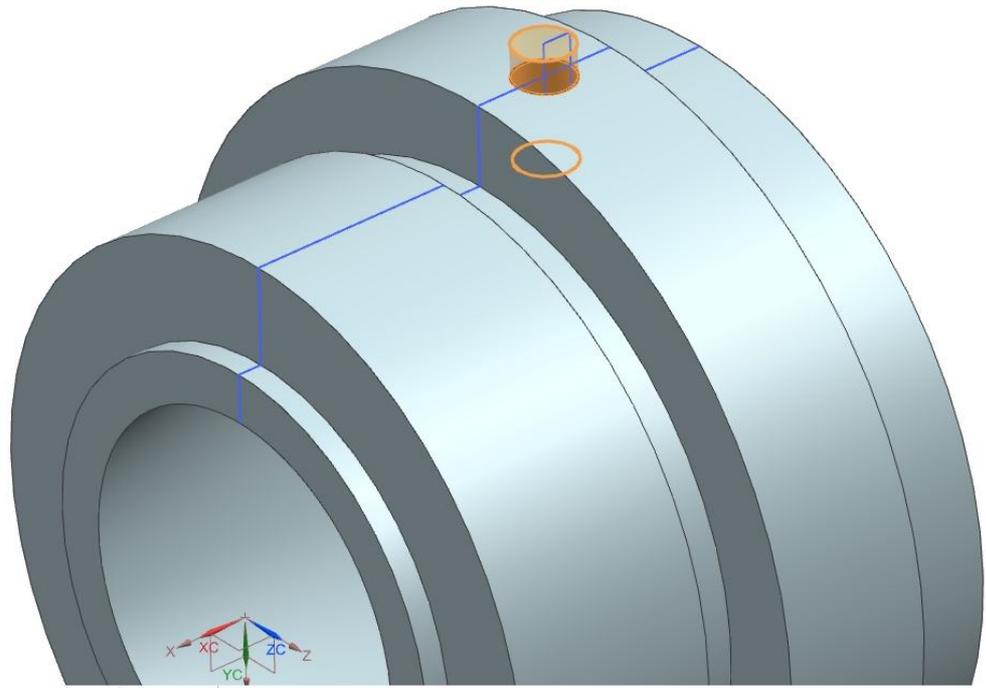
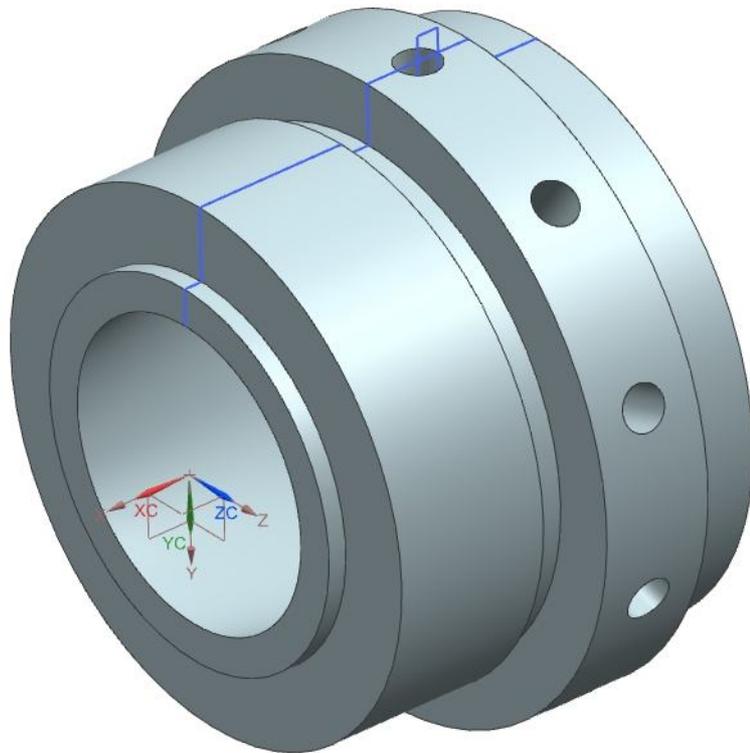
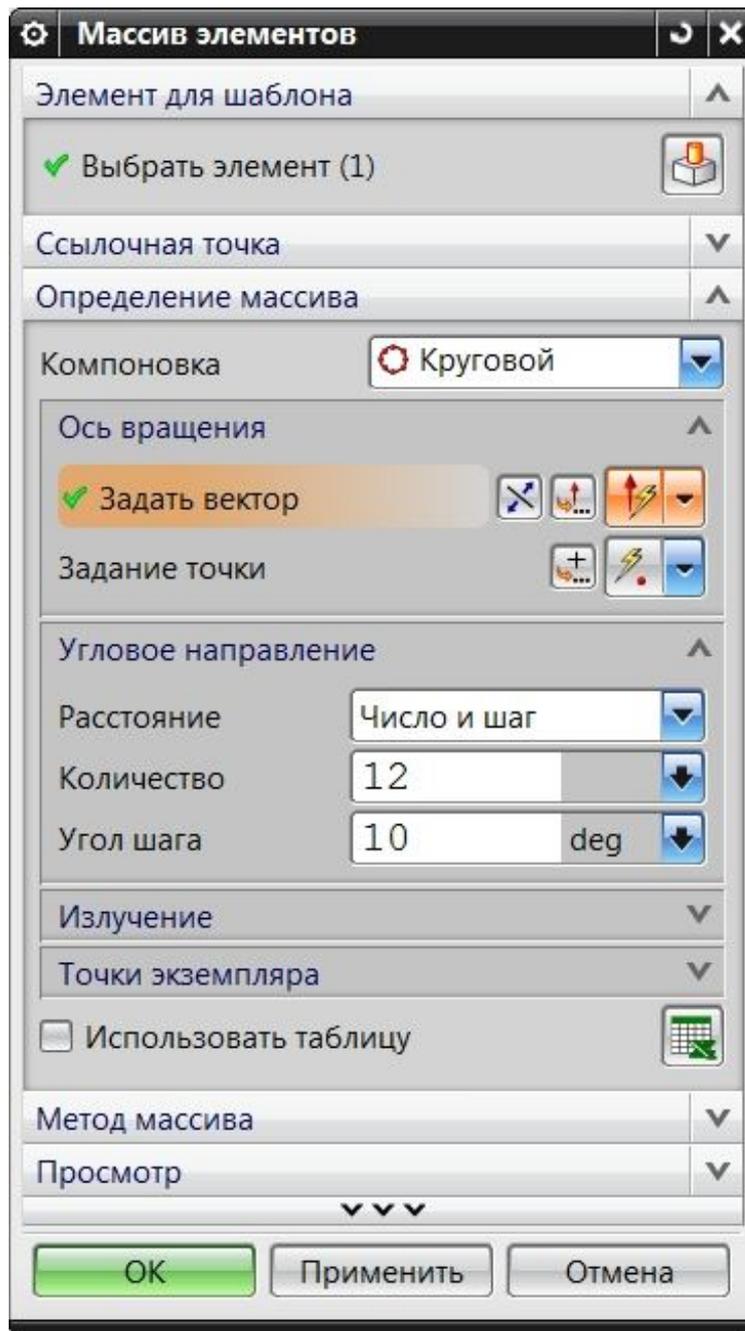


Рис. 2.11 - Операция вращения  с вычитанием 

Первым шагом создания сопла является получение основной геометрии с использованием операции вращения  (см. рис. 2.10).



a)



б)

Рис. 2.12 - Задание параметров кругового массива :

а) внешний вид массива; б) диалоговое окно задания параметров

Второй операцией, также с помощью вращения  создаётся одно отверстие (так называемое "мастер-отверстие" для кругового массива ). В качестве плоскости эскиза  выбирается одна из главных плоскостей  XY

(см. рис. 2.11). Чтобы геометрия, созданная операцией, вычиталась из геометрии тела, используем булеву операцию вычитание .

Далее, используя массив элементов  в круговой компоновке , создаём оставшиеся отверстия, равномерно распределяя их по окружности сопла. В качестве оси вращения выбираем ту же ось, что и в операции вращения  на первом шаге (ось симметрии сопла).

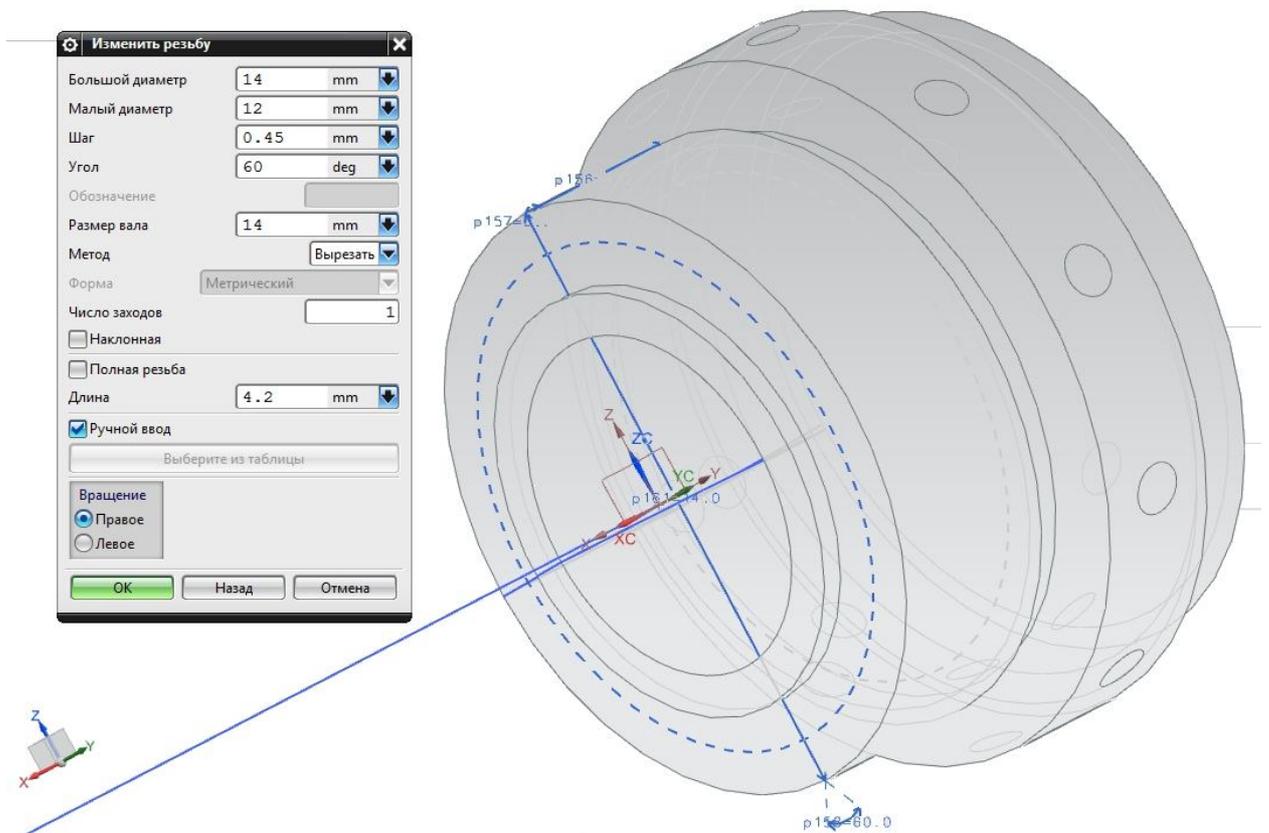


Рис. 2.13 - Создание резьбы  на модели

На последнем шаге моделирования на детали создаётся резьба  (см. рис. 2.13). Резьба  в NX бывает символическая (упрощённая, которая отображается прерывистой линией как на рис. 2.13) и детальная (которая натуралистично отображается на 3D-модели) и поддерживает множество определяющих параметров. Один из способов задания резьбы  через внутренний (малый) и наружный (большой) диаметры, шаг резьбы  и угол

витка показан на рис. 2.13. Для определения положения резьбы на детали требуется задать грань, на которую резьба  наносится, направление резьбы  и её длину.

Далее рассмотрим более сложную деталь "Игла", содержащая четыре операции, в т.ч. две не рассматриваемые ранее: заметание вдоль направляющей  и объединение тел . Первая операция вращения  (см. рис. 2.14) создаёт основной объём детали.

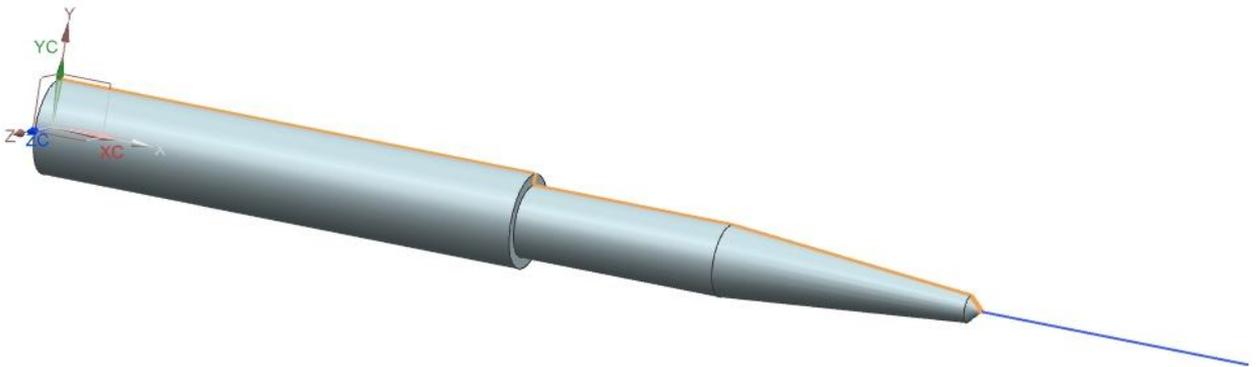


Рис. 2. 14 - Операция вращения 

Чтобы получить удобную в использовании изогнутую рукоять детали (см. рис. 2.15) применяется операция заметания вдоль направляющей , которая создаёт объёмную геометрию скольжением сечения (сечение, как правило, создаётся в виде эскиза ) вдоль кривой. Если сечение не замкнутое, то требуется дополнительно задать толщину стенки элемента, в противном случае будет создана поверхность, а не твёрдое тело. Для элемента  можно в диалоговом окне создания сразу же задать булевыми операциями взаимодействие с телом, созданным на первом шаге - объединение .

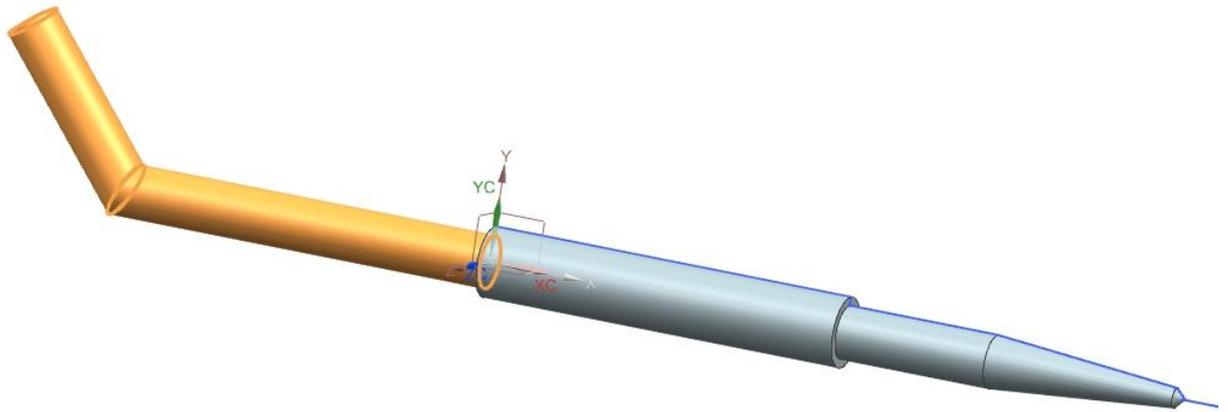


Рис. 2. 15 - Операция заметания вдоль направляющей с объединением

Третьим шагом операцией вращения на конце детали создается сфера. В качестве исходной плоскости для создания эскиза выбрана главная плоскость XY.

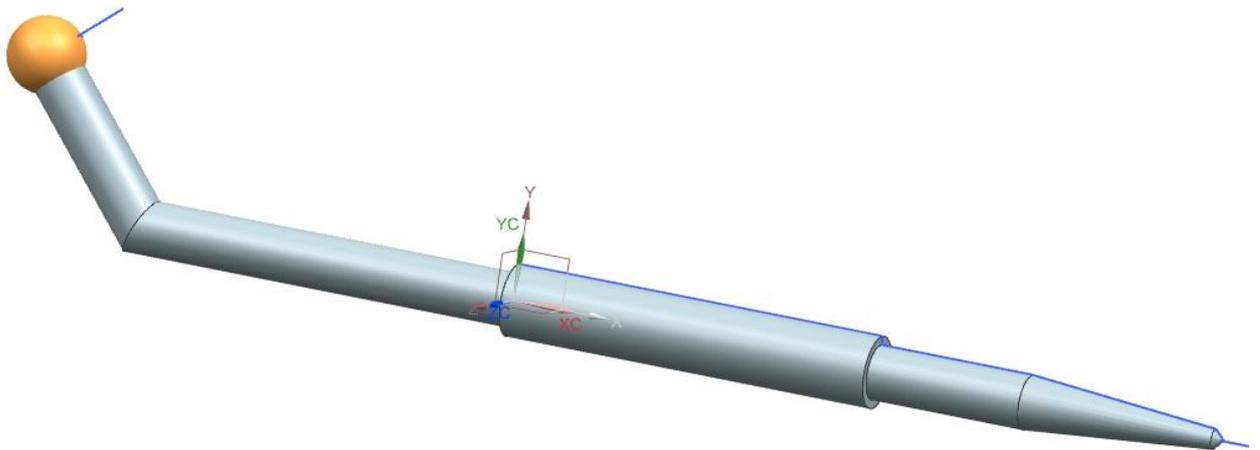


Рис. 2. 16 - Операция вращения

Если при использовании базовой операции не была задана булева операция (как на рис. 2.15) либо необходимо дополнительно задать булеву операцию на другие тела, применяется специальный инструмент на панели инструментов, поддерживающий те же операции: объединение, вычитание и пересечение тел, однако имеет своё диалоговое окно, в котором необходимо явно указать оба тела - главное и присоединяемое (вычитаемое) и является отдельной операцией в древе построения модели.

С помощью данной операции  есть возможность объединить созданную сферу и предыдущую геометрию в единое тело (см. рис. 2.17).

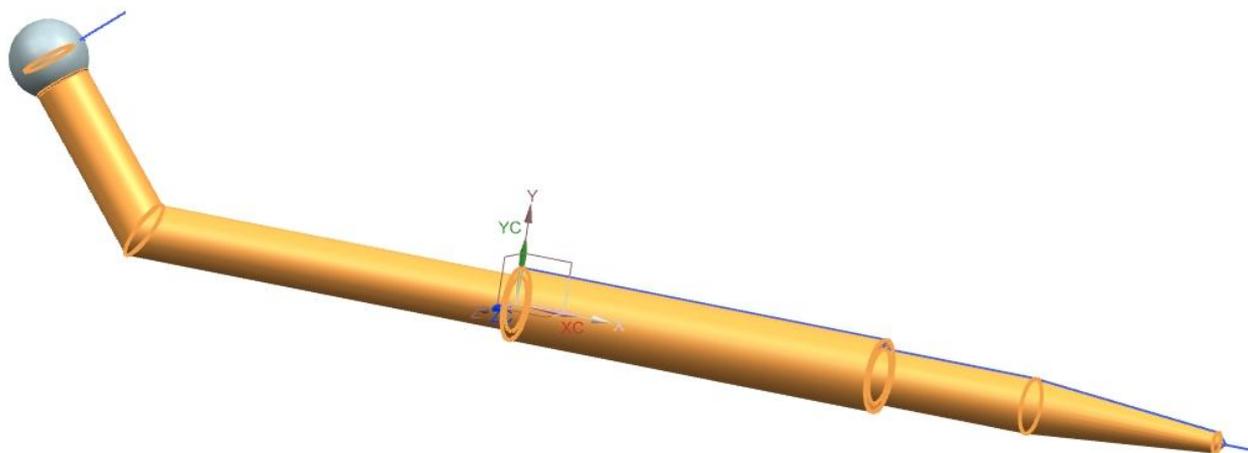


Рис. 2.17 - Операция объединения 

Резьба  на средней части иглы (см. рис. 2.18) выполнена тем же методом, что и на рассмотренной выше детали "Сопло" (см. рис. 2.13).

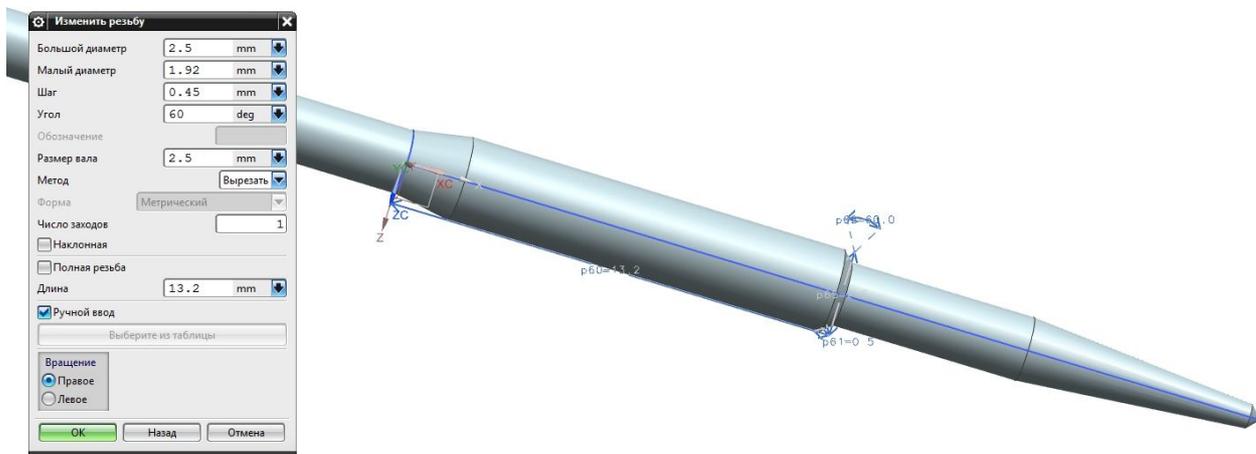


Рис. 2.18 - Создание резьбы  на модели

В модели иглы также присутствуют фаски  (на части с резьбой) и скругление ребра  на рукоятки (см. рис. 2.20). Для их добавления пользователю требуется выбрать соответствующий инструмент и в явном виде указать требуемые рёбра для выполнения операций, радиус скругления  либо величину и угол фаски .

Изучив основные операции, перейдём к созданию основных деталей кривошипно-шатунного механизма двигателя: поршню (см. рис. 2.21), шатуну (см. рис. 2.22-2.26) и коленчатому валу (см. рис. 2.27-2.39). А затем рассмотрим самую сложную деталь - "Картер". Остальные детали двигателя в силу схожести операций отдельно рассматриваться не будут. В работе приводится таблица состава изделия (см. табл. 2.1), где расписаны операции, применённые при создании тех или иных деталей двигателя, а также их количество и порядок. Используя данную таблицу можно подобрать пример выполнения любой детали двигателя из рассмотренных выше.

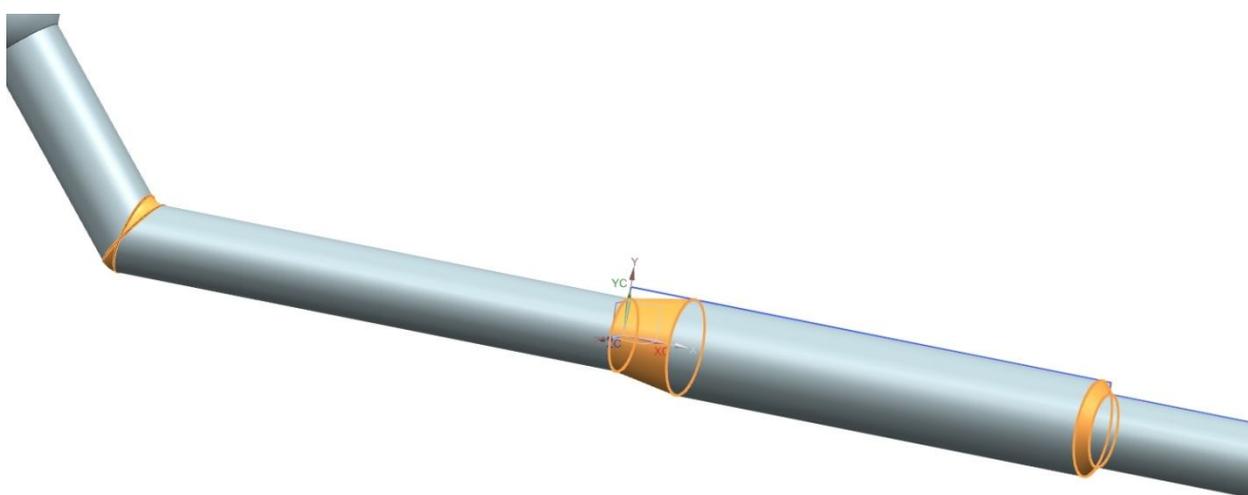
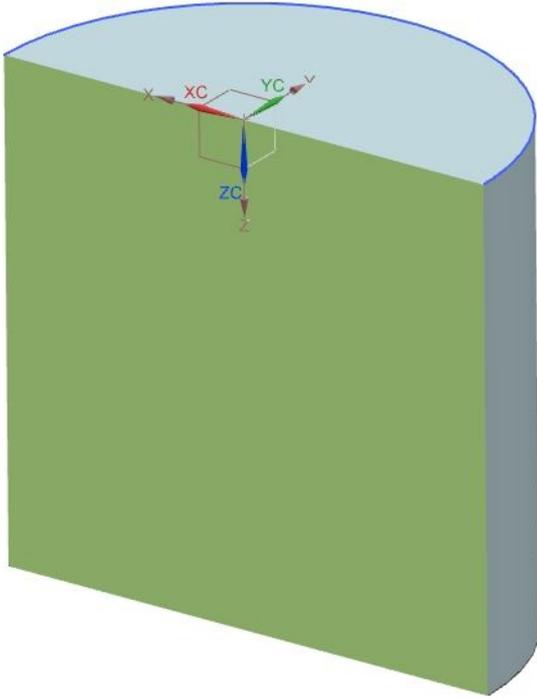
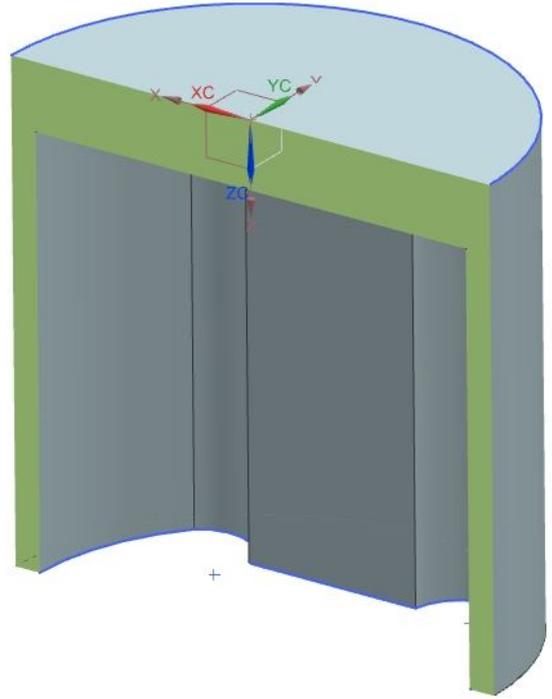


Рис. 2. 20 - Создание фасок  и скругления 

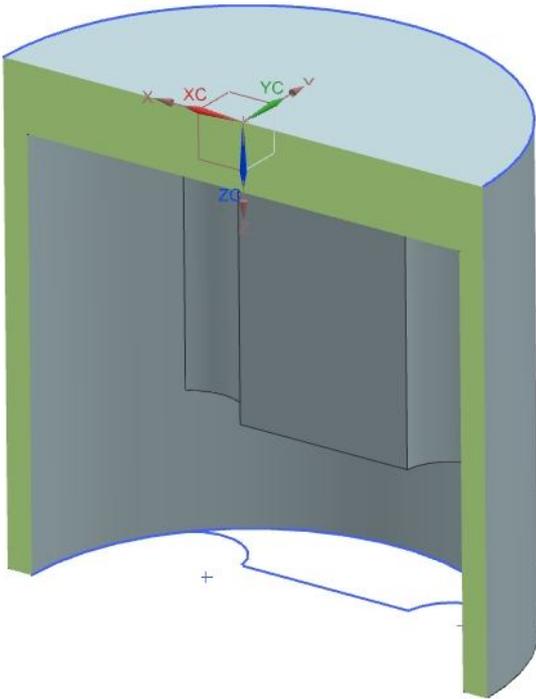
Поршень (см. рис. 2.21), в силу относительной простоты его геометрии, выполнен шестью операциями вытягивания . На первом шаге вытягиванием  эскиза  с окружностью создаётся цилиндрическая заготовка под поршень (см. рис. 2.21a). Выбор операции вытягивания  объясняется простотой наружной поверхности поршня, связанной с миниатюрностью двигателя и малым ресурсом работы. Если же поршень имеет канавки под поршневые кольца, конусность юбки и т.д., его рекомендуется выполнять операцией вращения .



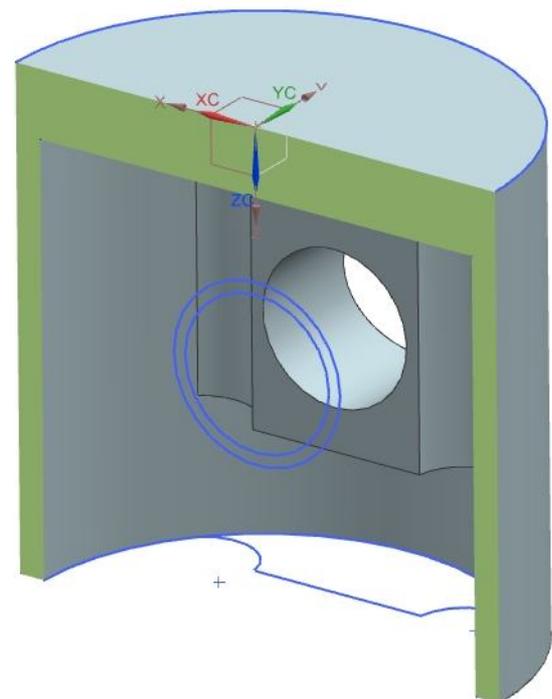
a)



б)



в)



г)

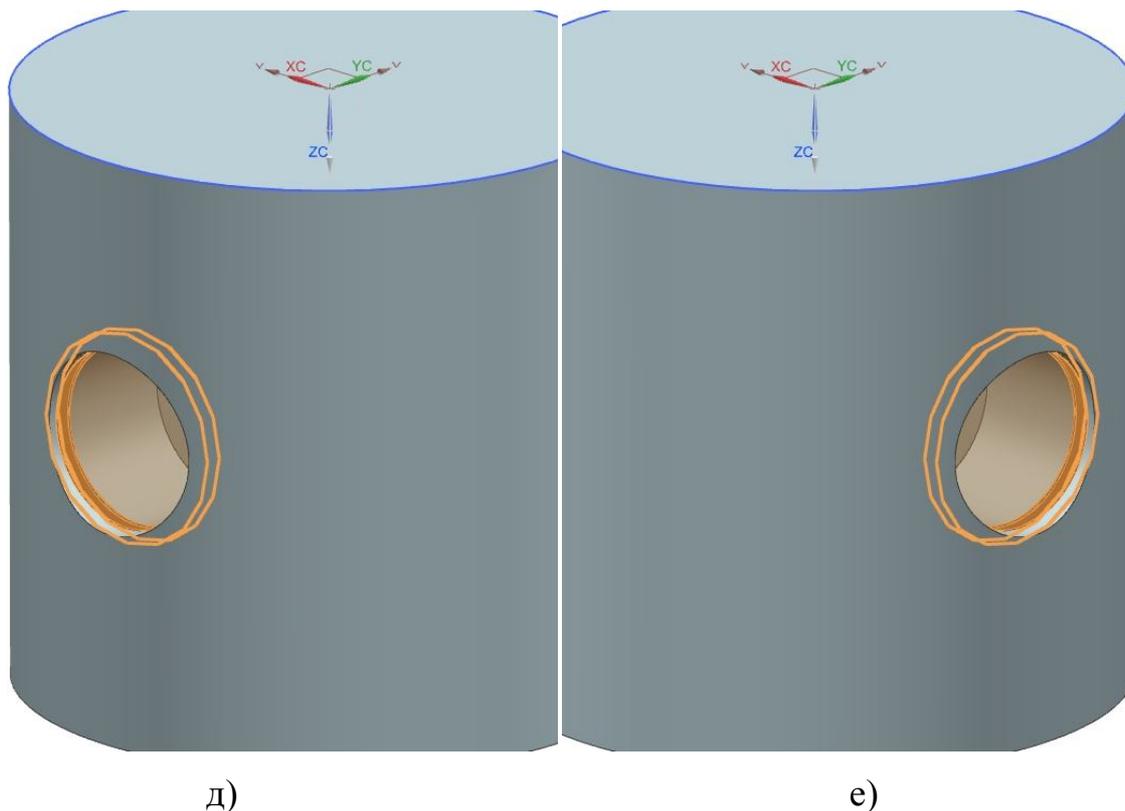


Рис. 2. 21 - Создание геометрии поршня

- а) Операция вытягивания  - цилиндрическая заготовка;
- б) Операция вытягивания  - внутренняя поверхность поршня;
- в) Операция вытягивания  - бобышка поршня;
- г) Операция вытягивания  - отверстие под поршневой палец;
- д) Операция вытягивания  - левая канавка под стопорное колечко;
- е) Операция вытягивания  - правая канавка под стопорное колечко;

Вторым шагом на нижней поверхности поршня создаётся фигурный эскиз , которым производится вырезание  внутренней полости поршня (см. рис. 2.21б).

На третьем шаге продолжается формирование внутренней области поршня. За счёт обрезания  исходной геометрии круговым эскизом  создаётся поршневая бобышка (см. рис. 2.21в).

На четвертом шаге создается отверстие под поршневой палец (см. рис. 2.21г).

Пятый и шестой шаги посвящены созданию канавок (см. рис. 2.21д,е) под стопорные кольца для поршневого пальца. Канавки на левой (см. рис. 2.21д) и правой (см. рис. 2.21е) части поршня одинаковы.

Для создания шатуна (см. рис. 2.22-2.26) использованы три операции вращения , операции вытягивания  и объединения .

На первом шаге операцией вращения  создается модель нижней головки шатуна (см. рис. 2.22).

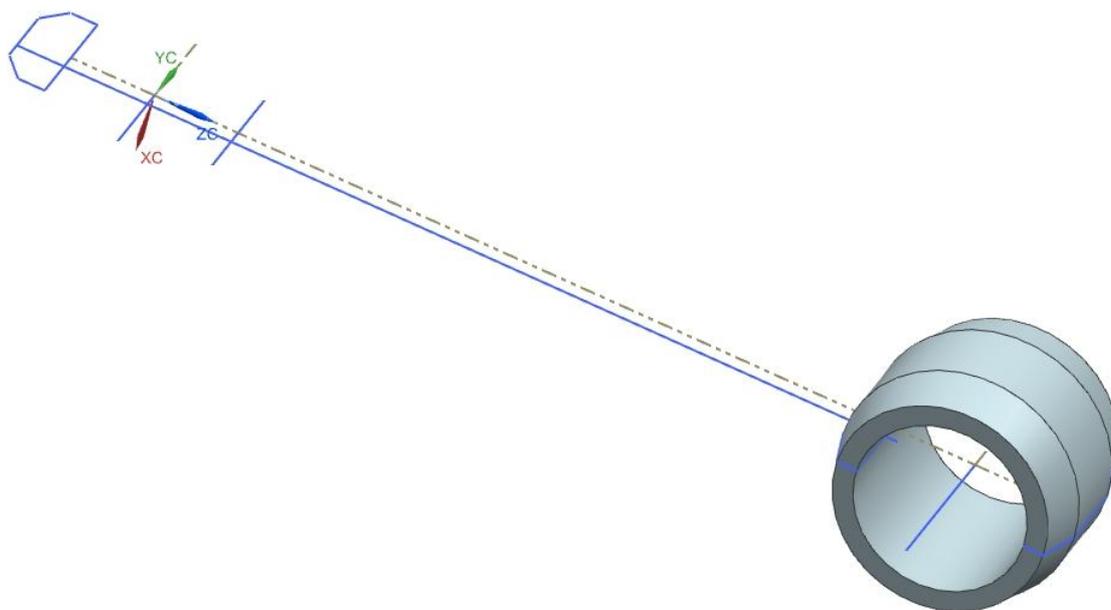


Рис. 2. 22 - Операция вращения  - нижняя головка шатуна

На втором шаге из того же самого эскиза , но с использованием другого контура со своей осью вращения, операцией  создается модель верхней головки шатуна (см. рис. 2.23).

На третьем шаге операцией вытягивания  из отдельного эскиза  создаётся стержень шатуна (см. рис. 2.24), который внутри диалогового окна операции вытягивания  объединяется с нижней головкой шатуна.

На четвёртом шаге вся созданная ранее геометрия объединяется , как показано на рис. 2.25.

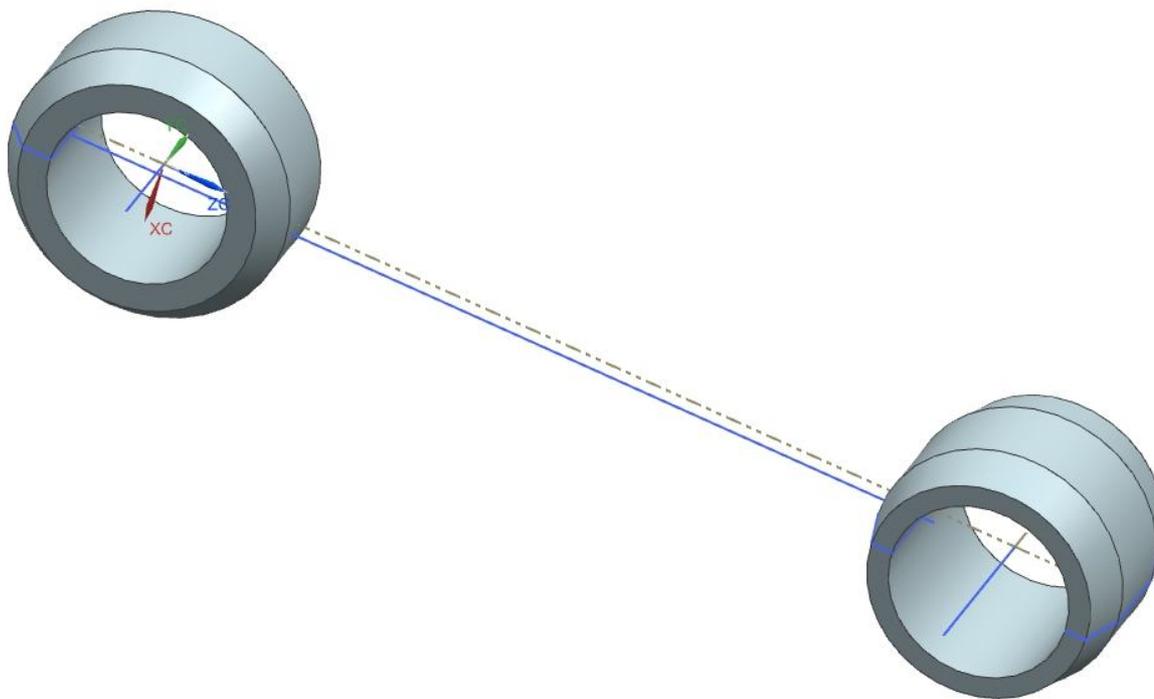


Рис. 2. 23 - Операция вращения  - верхняя головка шатуна

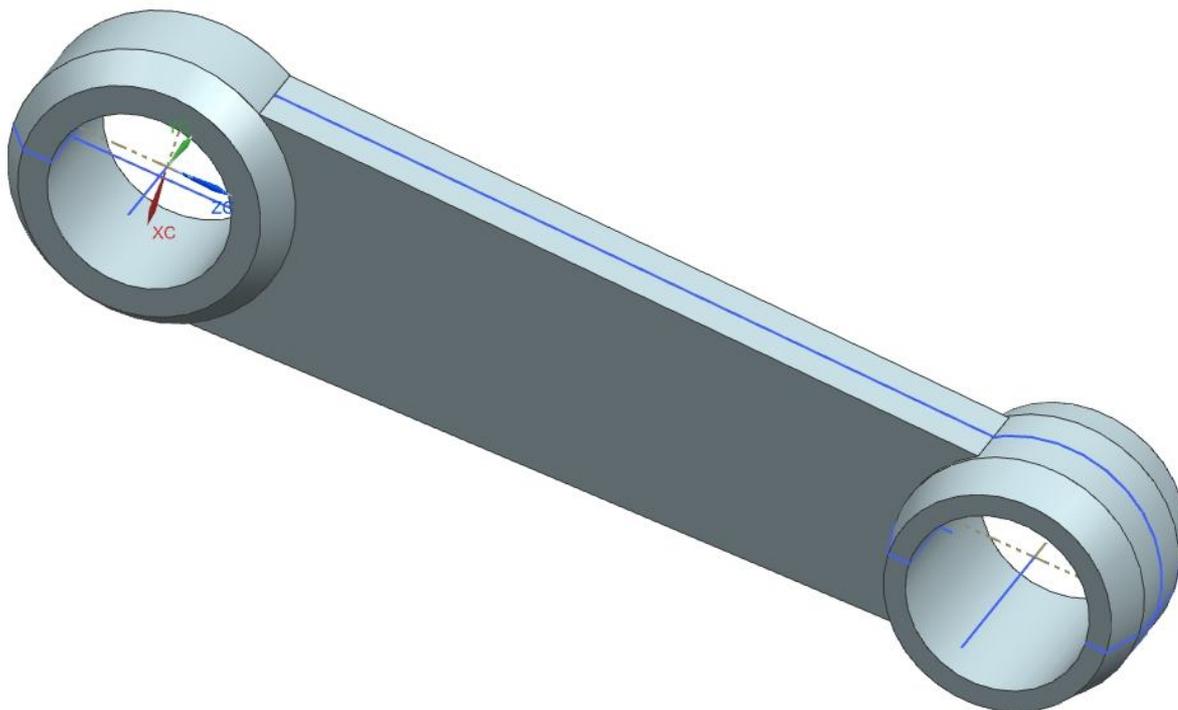


Рис. 2. 24 - Операция вытягивания 🏗️ - стержень шатуна

На шестом шаге в теле шатуна операцией вращения 🏗️ относительно оси, находящейся на пересечении плоскостей симметрии шатуна, создаётся отверстие для подачи смазки с параметром "Через всё" 🏗️ в сторону нижней головки шатуна и на определённое "Значение" 🏗️ в сторону верхней головки шатуна (см. рис. 2.26).

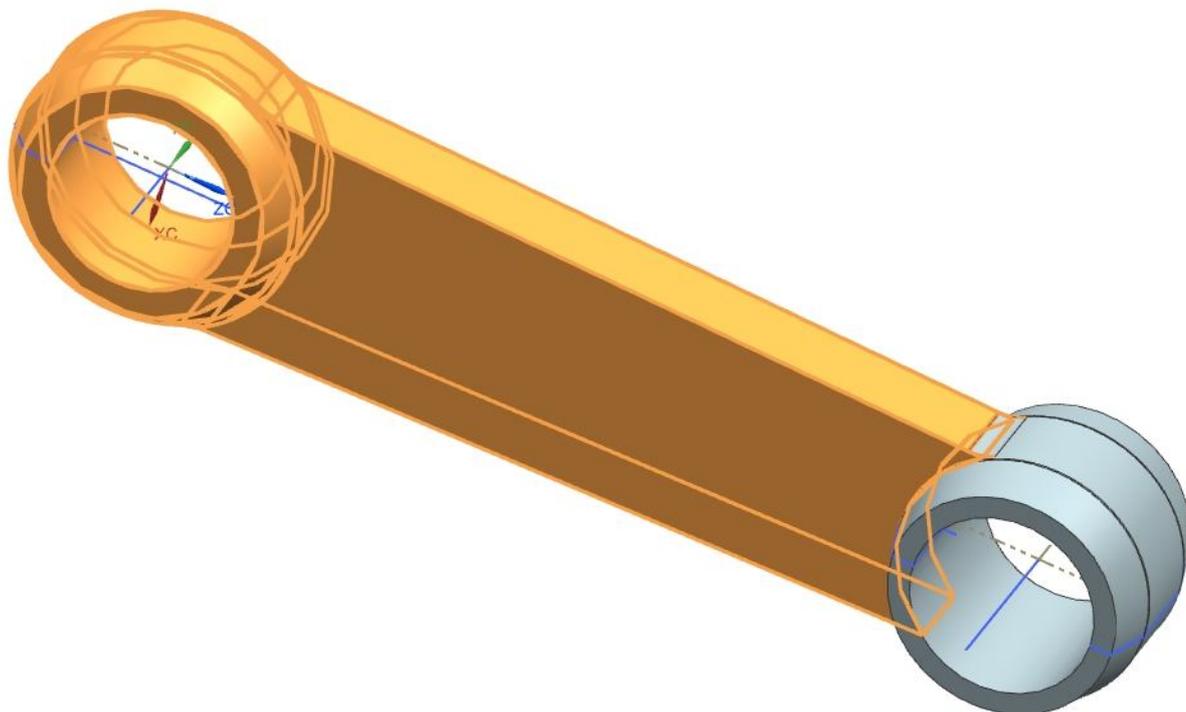


Рис. 2. 25 - Операция объединения 

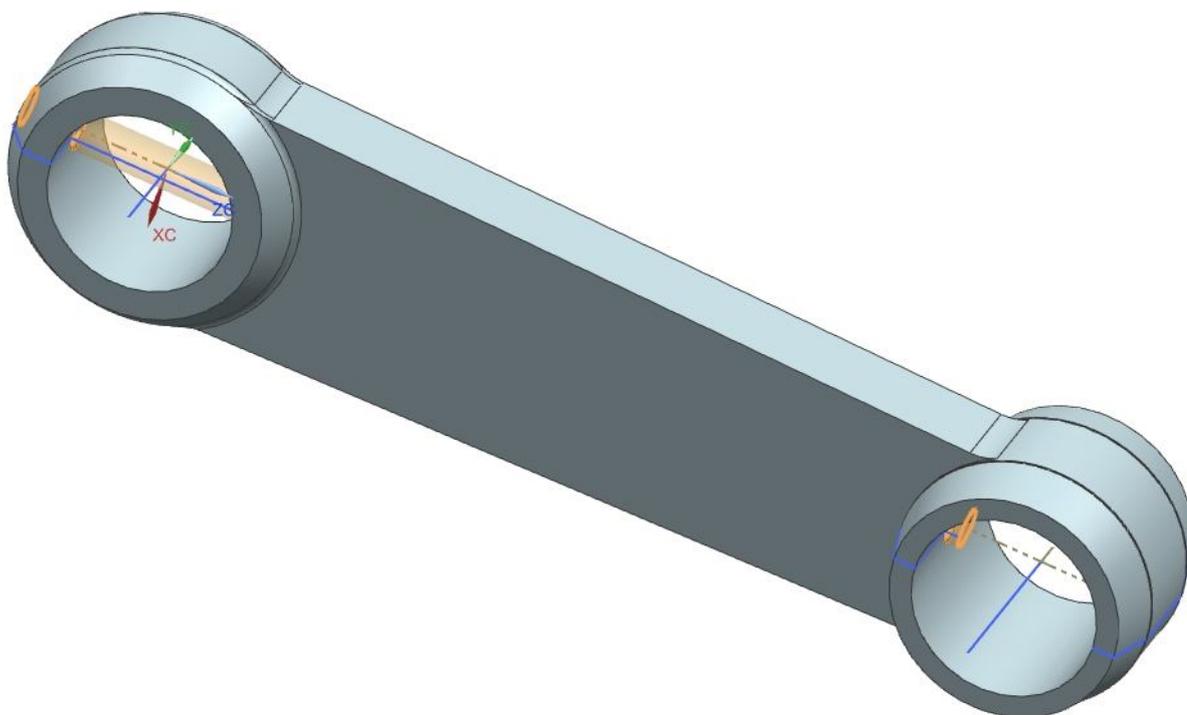


Рис. 2. 26 - Операция вращения  - отверстие для подачи смазки

Коленчатый вал двигателя, показанный на рис. 2.27, является довольно сложной деталью. Для его создания (см. табл. 2.1) использованы шесть операций (вращение  и вытягивание ) , резьба  , а также скругления  и фаски  .

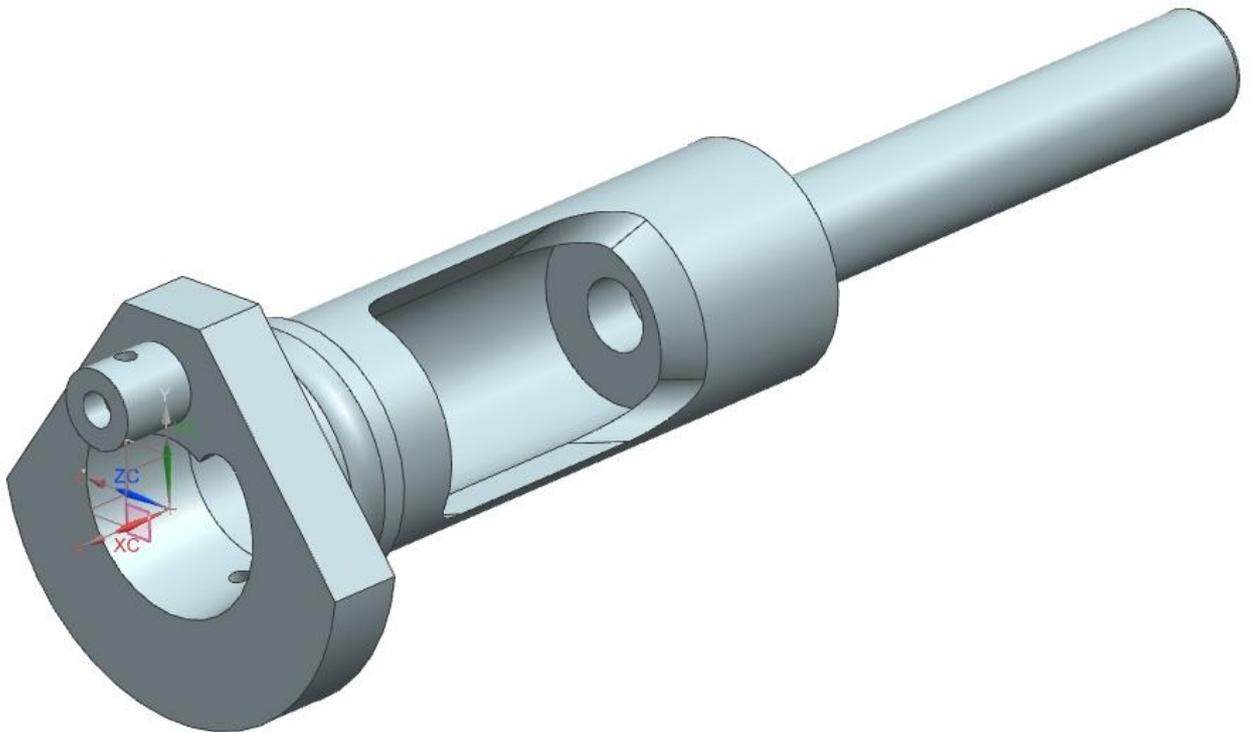


Рис. 2. 27 - Общий вид модели коленчатого вала

На первом шаге операцией вращения  создаётся основная геометрия коленчатого вала (см .рис. 2.28). Вращение осуществляется относительно оси X.

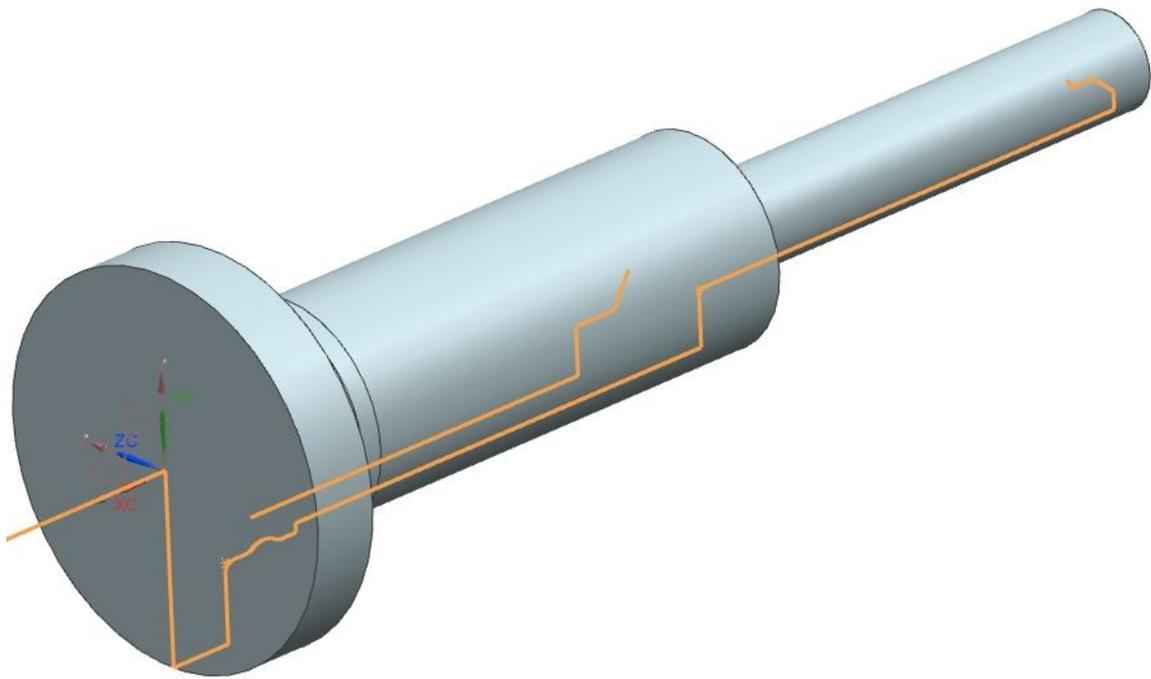


Рис. 2. 28 - Операция вращения  - основная геометрия коленчатого вала

На втором шаге, также операцией вращения , производится создание внутренней полости коленчатого вала (см. рис. 2.29). Следует отметить, что данное разделение необязательно - наружную и внутреннюю часть вала можно выполнить на одном эскизе  одной операцией . Поворот сечения также производится относительно оси X.

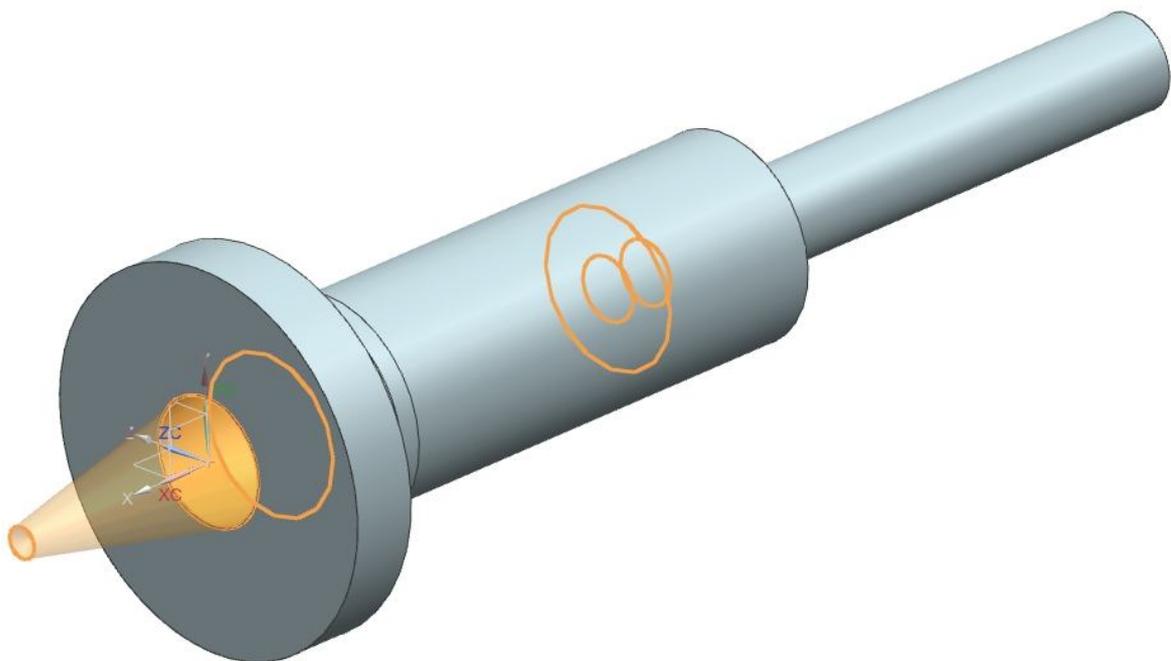


Рис. 2. 29 - Операция вращения  - внутренняя полость коленчатого вала

На третьем шаге, отдельной операцией вращения , производится создание паза в коленчатом валу, управляющем подачей воздуха в двигатель (см. рис. 2.30).

На четвёртом шаге операцией вращения  создаётся выступ для увеличения жёсткости вала в месте соединения с шатуном (см. рис. 2.31). Затем производится небольшая доработка вала добавлением дополнительных элементов геометрии, к которым обычно относят различные фаски, скругления, уклоны, отверстия и т.д., которые объединяет то, что для своего построения они не требуют наличия эскиза . В данном случае используется инструмент скругление граней  (создаёт скругления вдоль всей линии пересечения выбранных граней/поверхностей).

На пятом шаге операцией вытягивания  создаётся модель шатунной шейки (см. рис. 2.32). Затем также производится доработка с использованием инструментов скругление граней , фасок  и отверстий . В зависимости от выбора параметров отверстия, созданные инструментом  в древе построения  могут отображаться как простое отверстие , резьбовое отверстие  и реже используемые размер отверстия под сверление , свободное отверстие под винт  и серия отверстий . Для оценки изменений, вносимых в модель дополнительными элементами, они отдельно представлены на рис. 2.33 - 2.37.

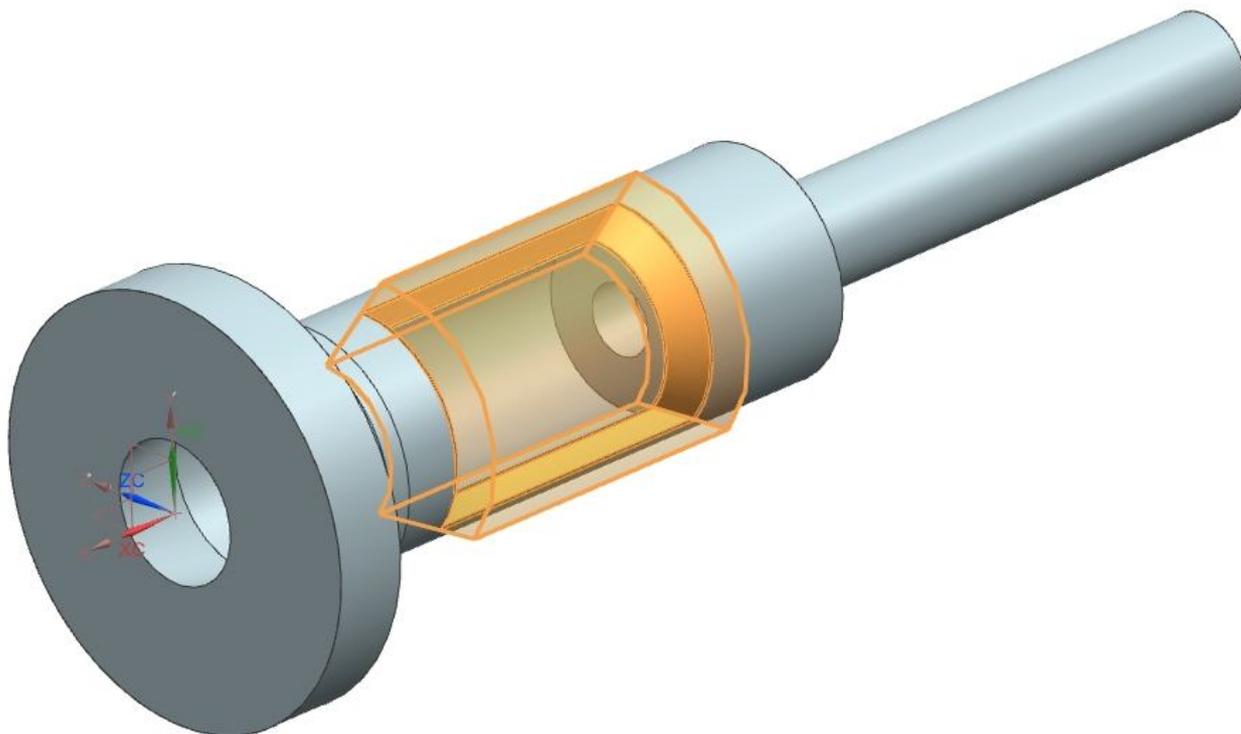


Рис. 2. 30 - Операция вращения  - паз на коленчатом валу

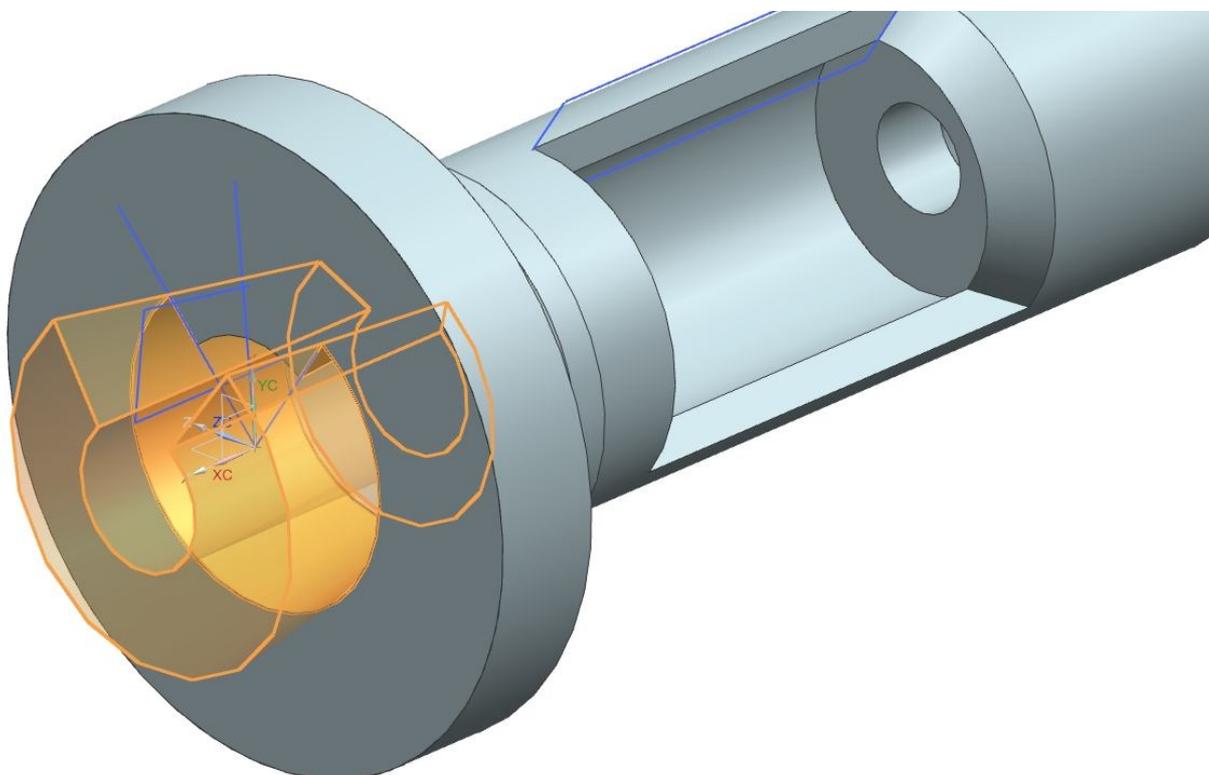


Рис. 2. 31 - Операция вращения  - выступ для увеличения жёсткости вала

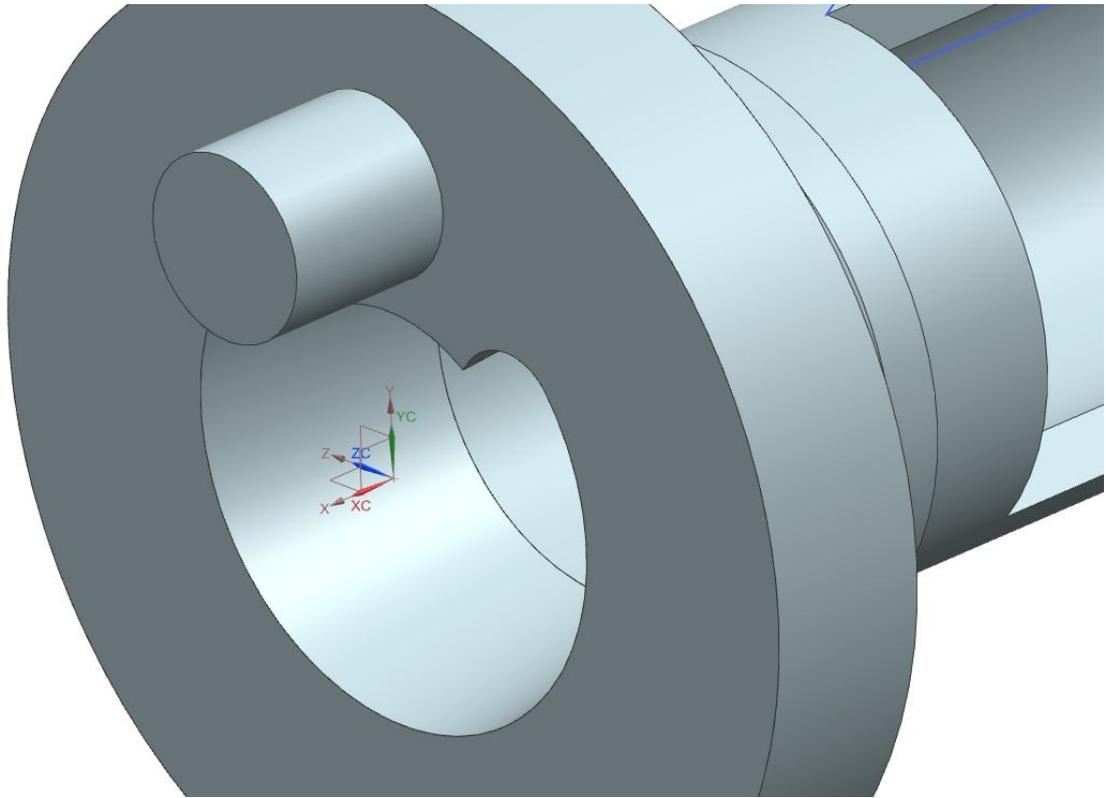


Рис. 2. 32 - Операция вытягивания 🏠 - шатунная шейка

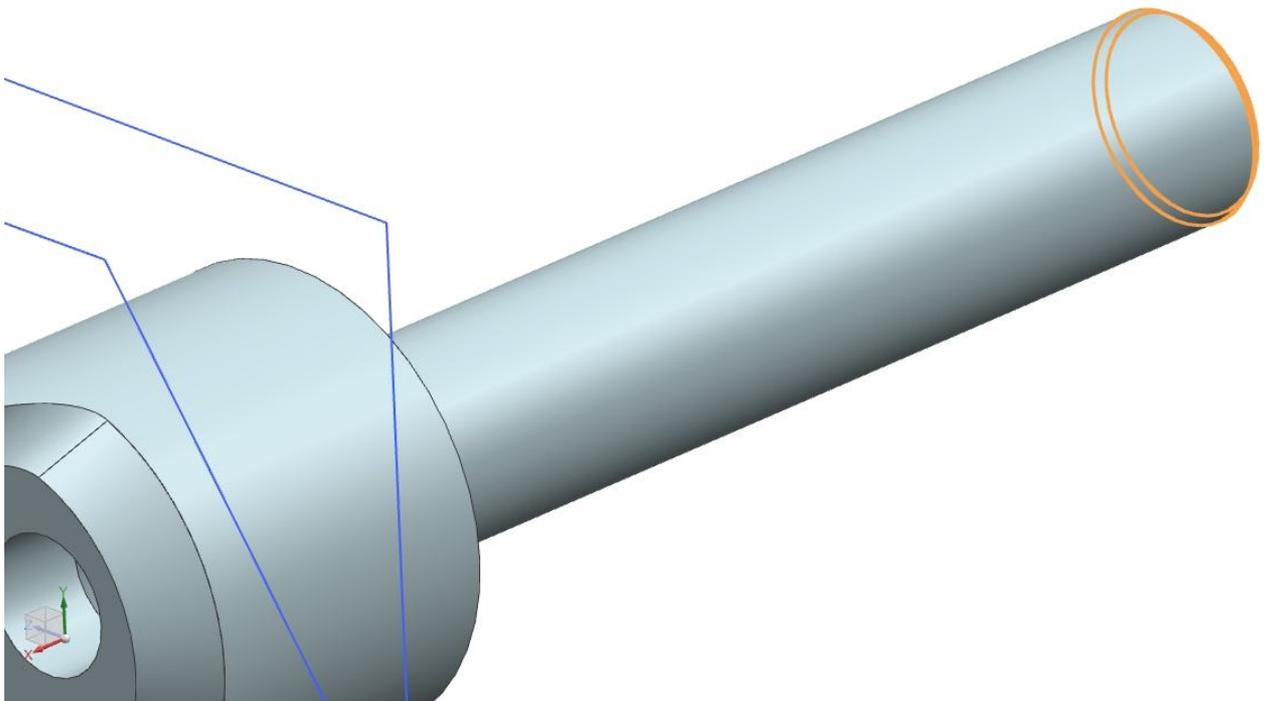


Рис. 2. 33 - Создание фаски 🏠 на конце коленчатого вала

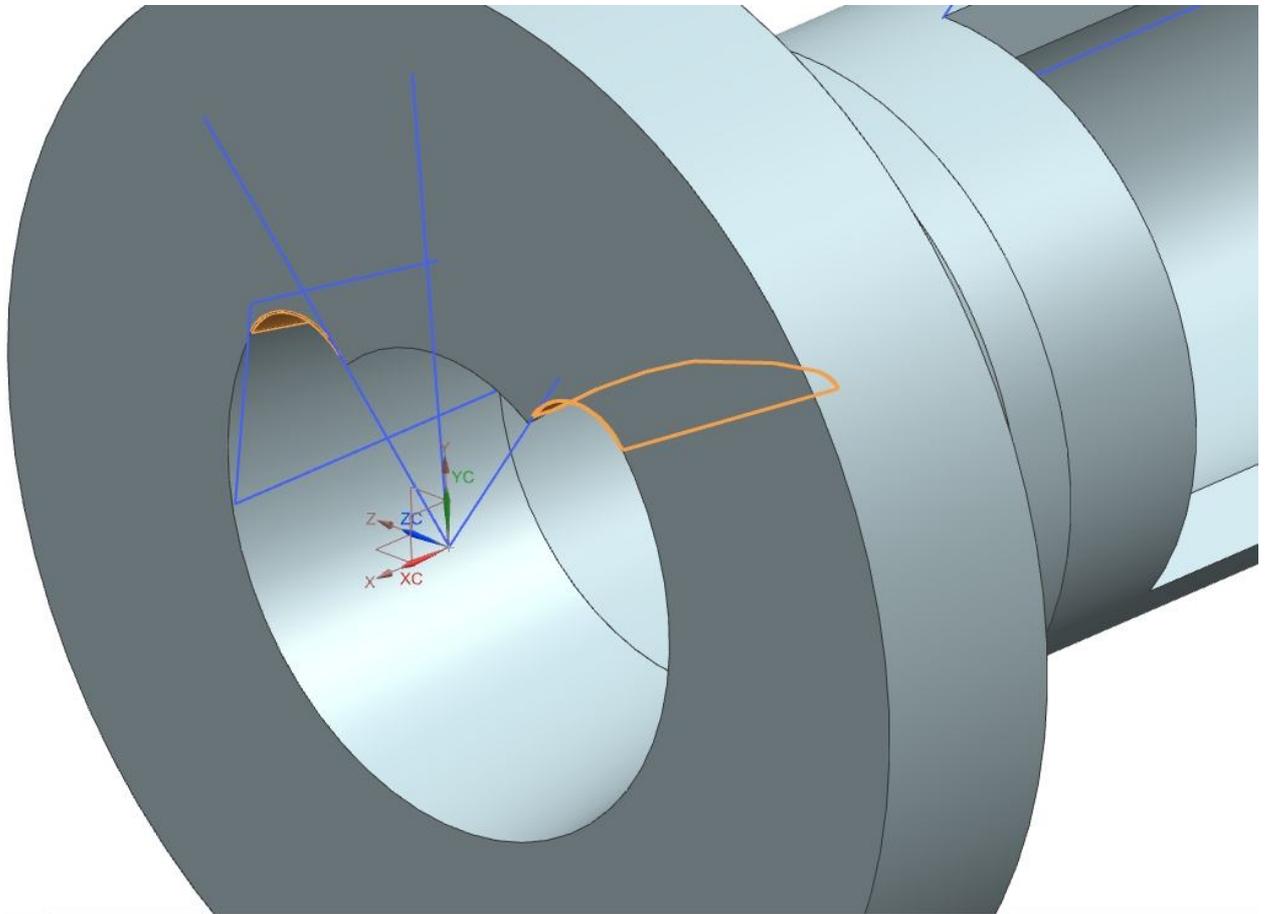


Рис. 2. 34 - Создание скруглений  в месте расположения шатунной шейки

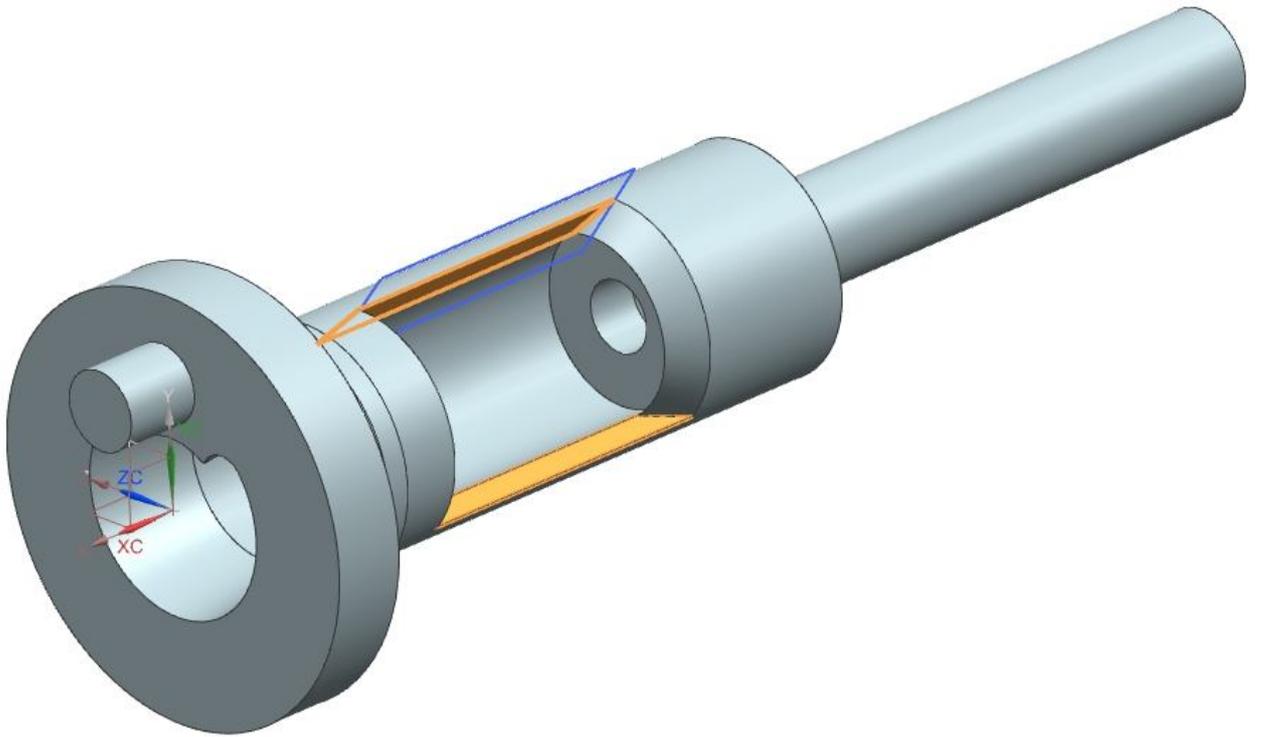


Рис. 2. 35 - Создание нужного угла наклона  боковых граней паза под забор воздуха

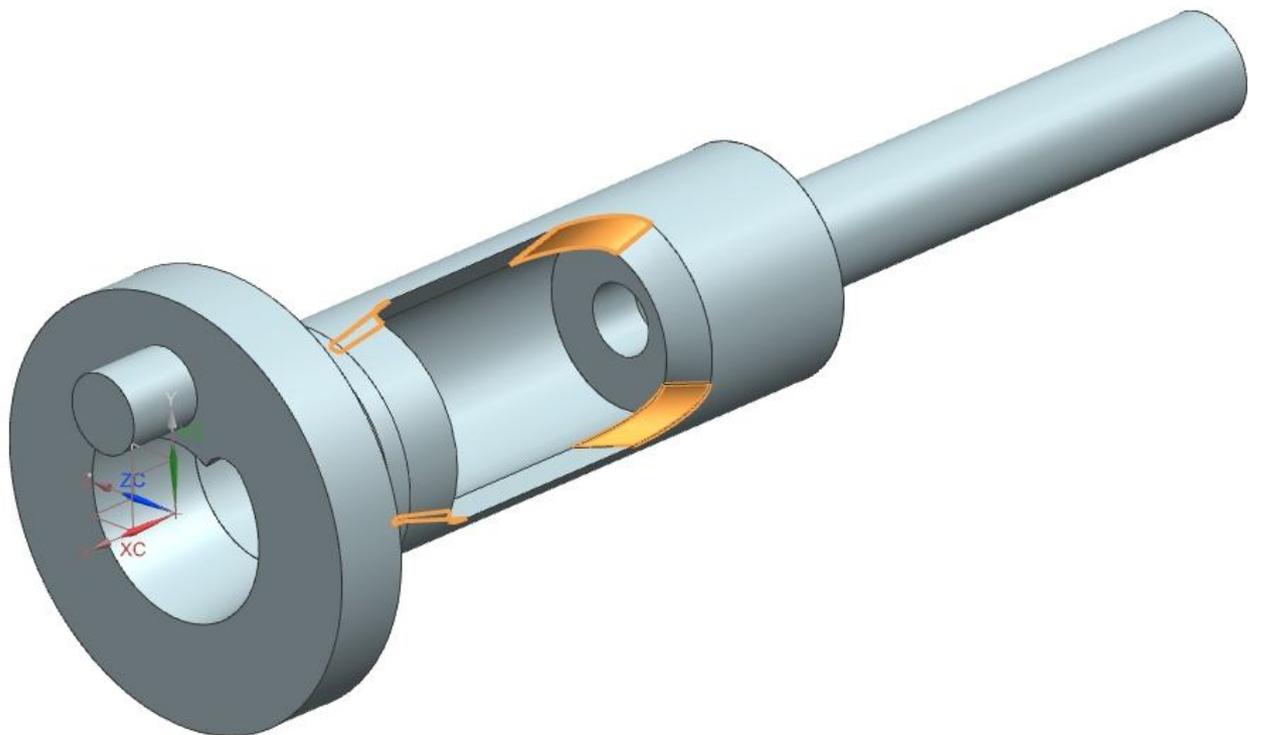


Рис. 2. 36 - Скругление  паза под забор воздуха

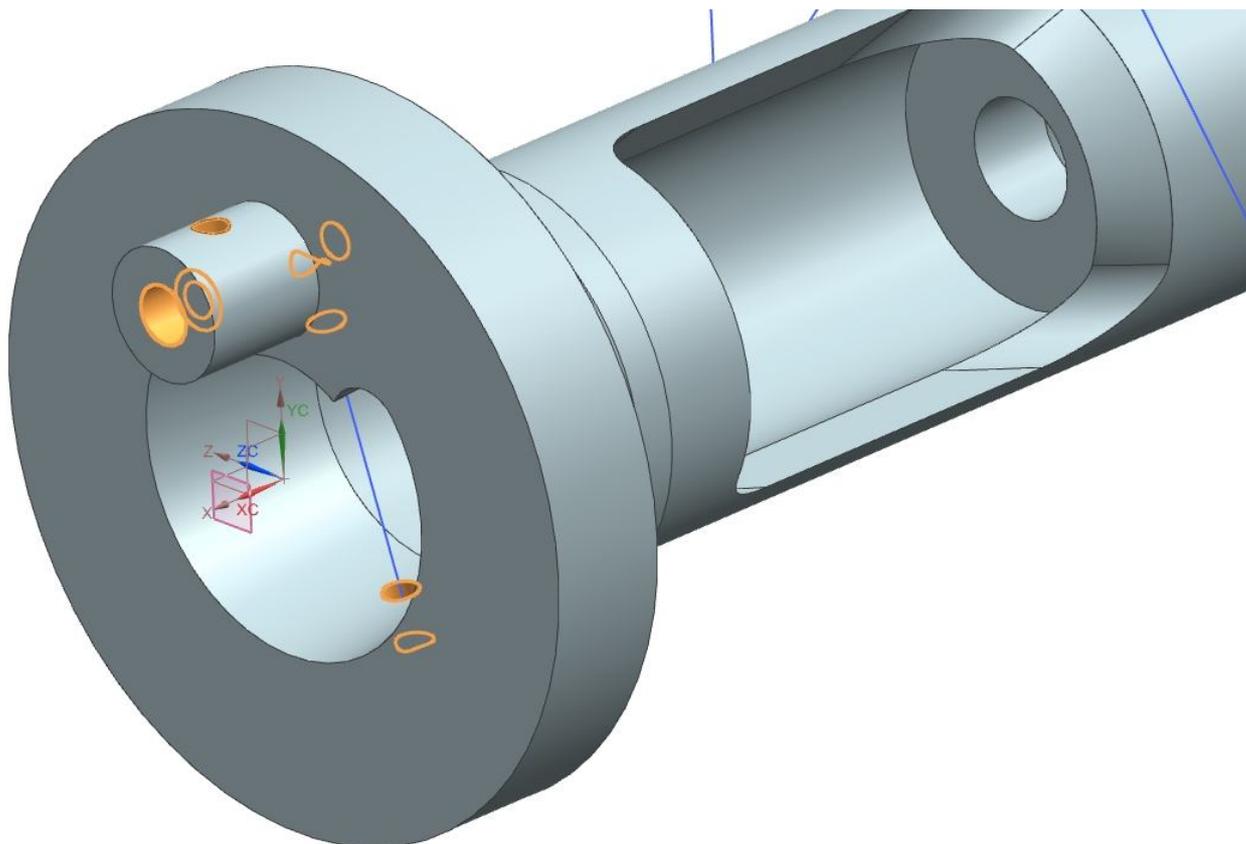


Рис. 2. 37 - Создание отверстий  для смазки нижней головки шатуна

На шестом шаге операции вытягивания  производится обрезка щеки коленчатого вала под нужную форму (см. рис. 2.38).

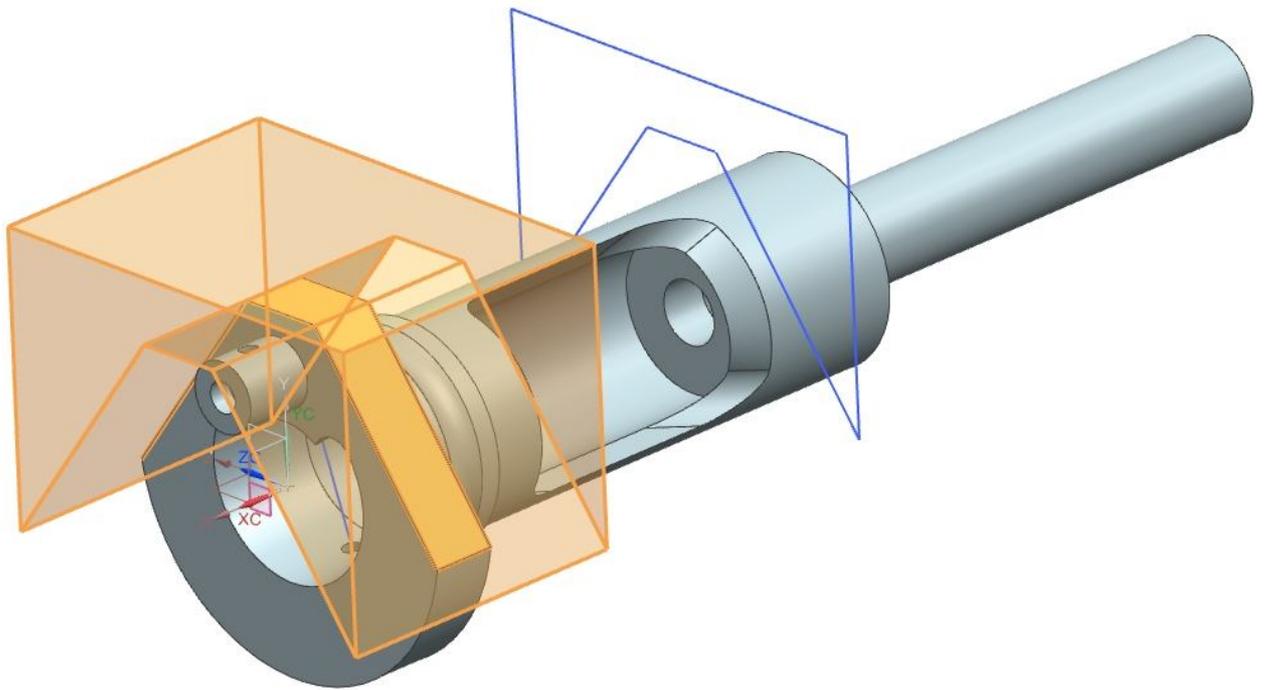


Рис. 2. 38 - Операция вытягивания  - щека коленчатого вала

<input checked="" type="checkbox"/> Базовая система координат (0)	<input checked="" type="checkbox"/> Скругление поверхностей (19)
<input checked="" type="checkbox"/> Эскиз (1) "SKETCH_000"	<input checked="" type="checkbox"/> Скругление поверхностей (20)
<input checked="" type="checkbox"/> Эскиз (2) "SKETCH_001"	<input checked="" type="checkbox"/> Скругление поверхностей (21)
<input checked="" type="checkbox"/> Эскиз (3) "SKETCH_003"	<input checked="" type="checkbox"/> Отверстие с цековкой (22)
<input checked="" type="checkbox"/> Вращение (4)	<input checked="" type="checkbox"/> Координатная плоскость (23)
<input checked="" type="checkbox"/> Вращение (5)	<input checked="" type="checkbox"/> Эскиз (24) "SKETCH_009"
<input checked="" type="checkbox"/> Эскиз (6) "SKETCH_002"	<input checked="" type="checkbox"/> Простое отверстие (25)
<input checked="" type="checkbox"/> Вращение (7)	<input checked="" type="checkbox"/> Эскиз (31) "SKETCH_012"
<input checked="" type="checkbox"/> Эскиз (8) "SKETCH_005"	<input checked="" type="checkbox"/> Вытягивание (32)
<input checked="" type="checkbox"/> Эскиз (9) "SKETCH_006"	<input checked="" type="checkbox"/> Координатная плоскость (33)
<input checked="" type="checkbox"/> Вращение (10)	<input checked="" type="checkbox"/> Эскиз (34) "SKETCH_004"
<input checked="" type="checkbox"/> Скругление поверхностей (11)	<input checked="" type="checkbox"/> Простое отверстие (35)
<input checked="" type="checkbox"/> Скругление поверхностей (12)	<input checked="" type="checkbox"/> Упрощенная резьба (36)
<input checked="" type="checkbox"/> Эскиз (13) "SKETCH_007"	<input checked="" type="checkbox"/> Фаска (37)
<input checked="" type="checkbox"/> Вытягивание (14)	
<input checked="" type="checkbox"/> Фаска (15)	
<input checked="" type="checkbox"/> Фаска (16)	
<input checked="" type="checkbox"/> Эскиз (17) "SKETCH_008"	
<input checked="" type="checkbox"/> Скругление поверхностей (18)	

Рис. 2. 39 - Древо построения  модели "Коленчатый вал"

Картер (см. рис. 2.71,2.72) является самой сложной в построении деталью данного двигателя и содержит около 150 только основных операций и 45 эскизов (для подробного анализа модели см. табл. 2.1). Рассмотрим процесс создания модели картера в среде NX. Для удобства поиска здесь и далее в фигурных скобках {} будет указан номер данной операции в древе построения модели "Картер" в среде NX, показанном на рис. 2.73.

**Первым шагом** создания геометрической модели картера является построение с использованием {2} операции вращения  заготовки под часть картера, находящуюся со стороны размещения воздушного винта (см. рис. 2.40).

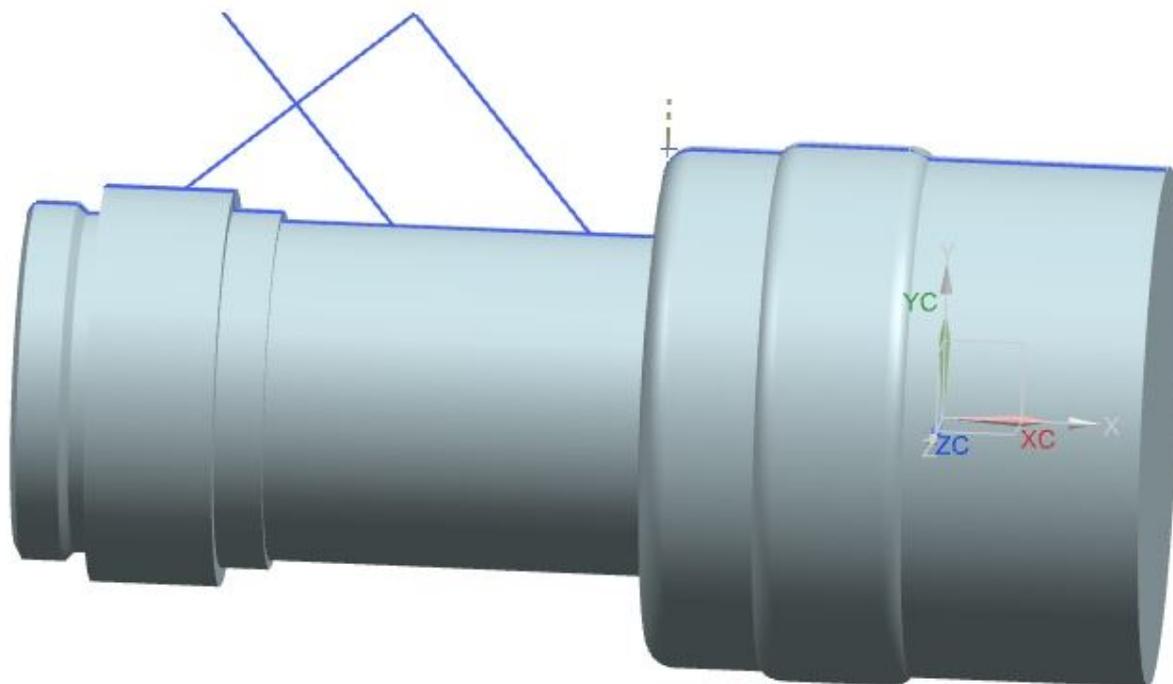


Рис. 2. 40 - Операция вращения  - заготовка под картер

**Вторым шагом** является создание с помощью операции вращения  заготовки под воздухозаборник {5}, изготовленный заодно с картером (см. рис. 2.41). Если посмотреть на древо построения модели  (рис. 2.73), то можно увидеть, что данной операции предшествуют две: создание координатной плоскости  {3} и проецирование кривой  {4}. В данном

случае на плоскость  $\{3\}$  переносится с помощью инструмента  часть эскиза  $\{1\}$ , выступающая на рис. 2.40. Данный подход выбран из-за удобства образмеривания элементов на одном эскизе  $\{1\}$ .

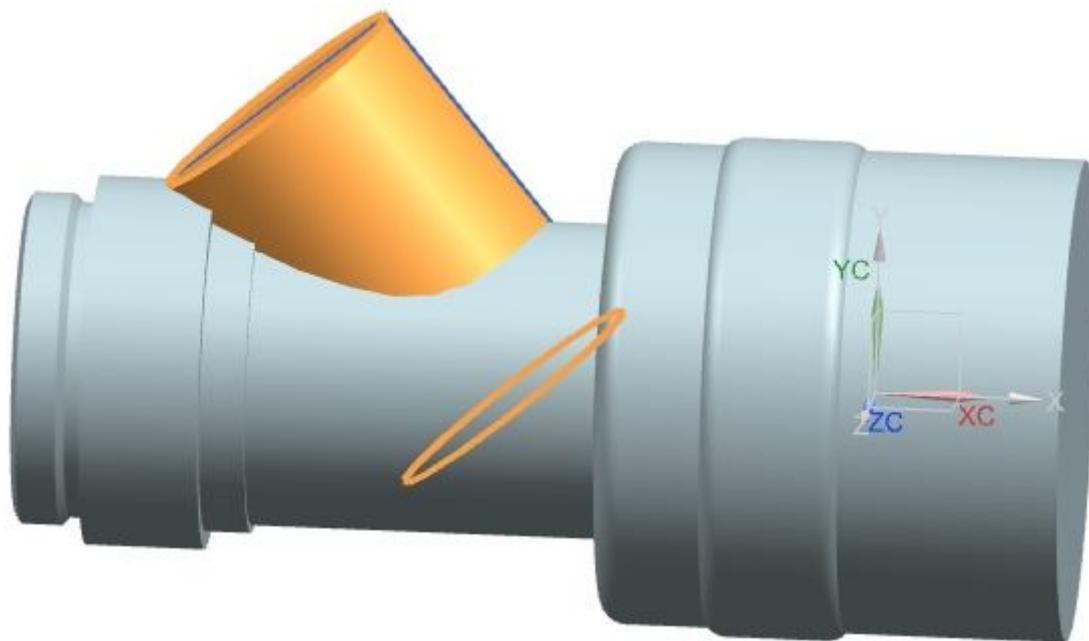


Рис. 2. 41 - Операция вращения  - заготовка под воздухозаборник

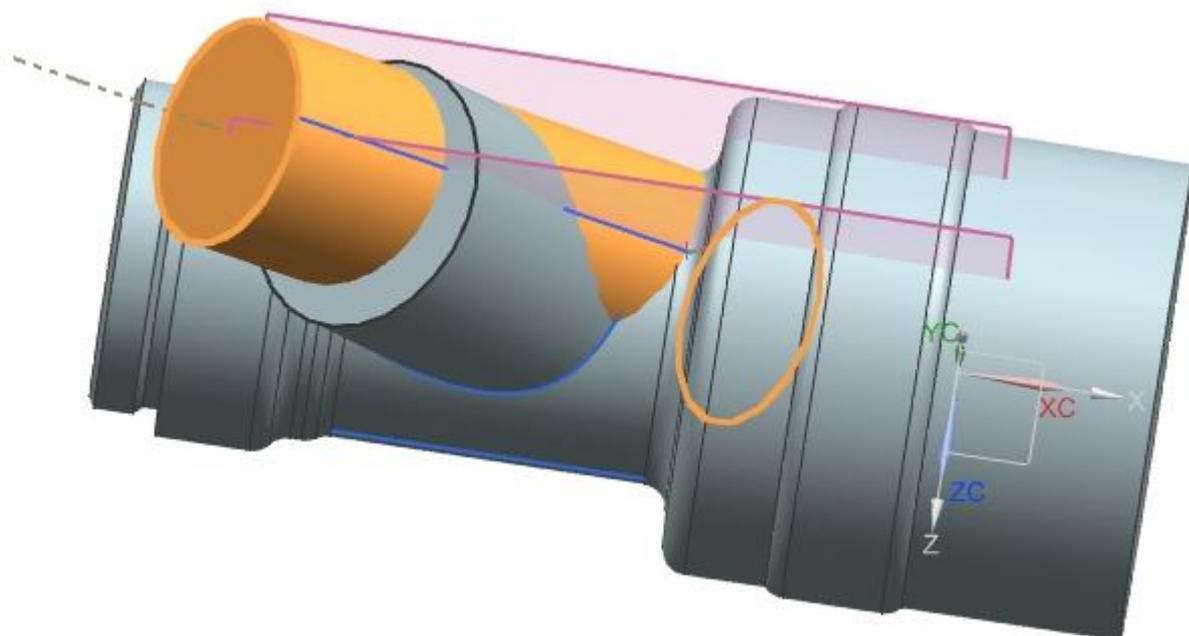


Рис. 2. 42 - Операция вращения  - заготовка под воздухозаборник

**Третьим шагом** является доработка воздухозаборника {15} с помощью операции вращения , как показано на рис. 2.42. До этого создаются две координатные плоскости : одна для эскиза , другая для обозначения границы создаваемой операцией геометрии, а также скругления  на созданной ранее геометрии.



Рис. 2. 42 - Операция обрезки тела  - заготовка под воздухозаборник

**Четвёртым шагом** {16} созданная ранее геометрия обрезается  с использованием в качестве плоскости отреза грани детали (см. рис. 2.42), а затем, на пятом шаге {17}, объединяется с созданной ранее геометрией командой  (см. рис. 2.43).

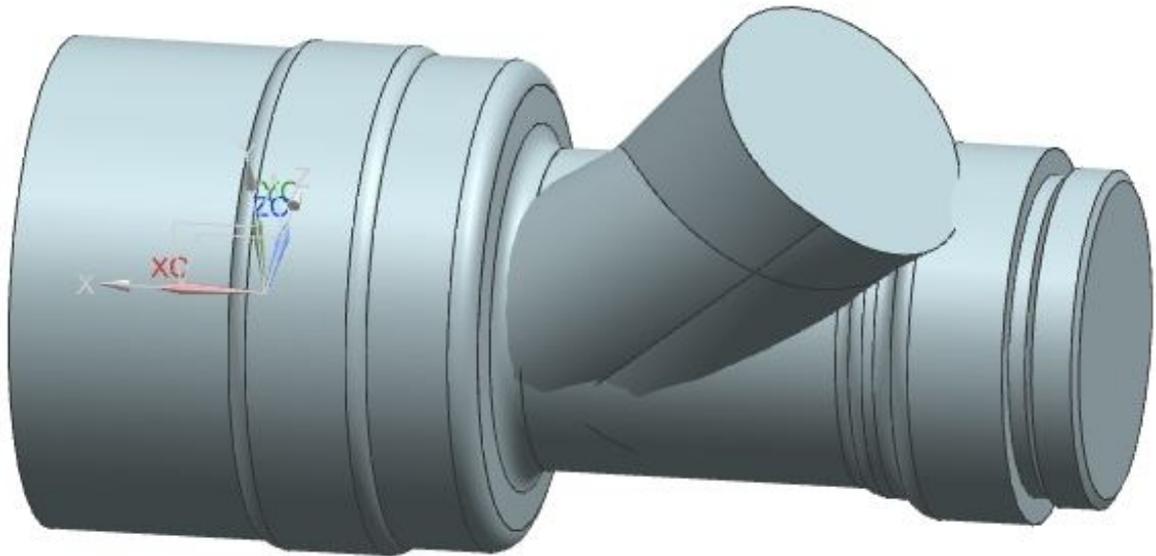


Рис. 2. 43 - Операция объединения тела  - заготовка под воздухозаборник

На **шестом шаге** {19} с помощью операции **заменить грань**  создаётся поверхность, совпадающая с выбранной на рис. 2.44 гранью, для того чтобы на седьмом шаге {20} обрезать созданной поверхностью геометрию воздухозаборника, используя операцию **обрезки тела**  как показано на рис. 2.45.

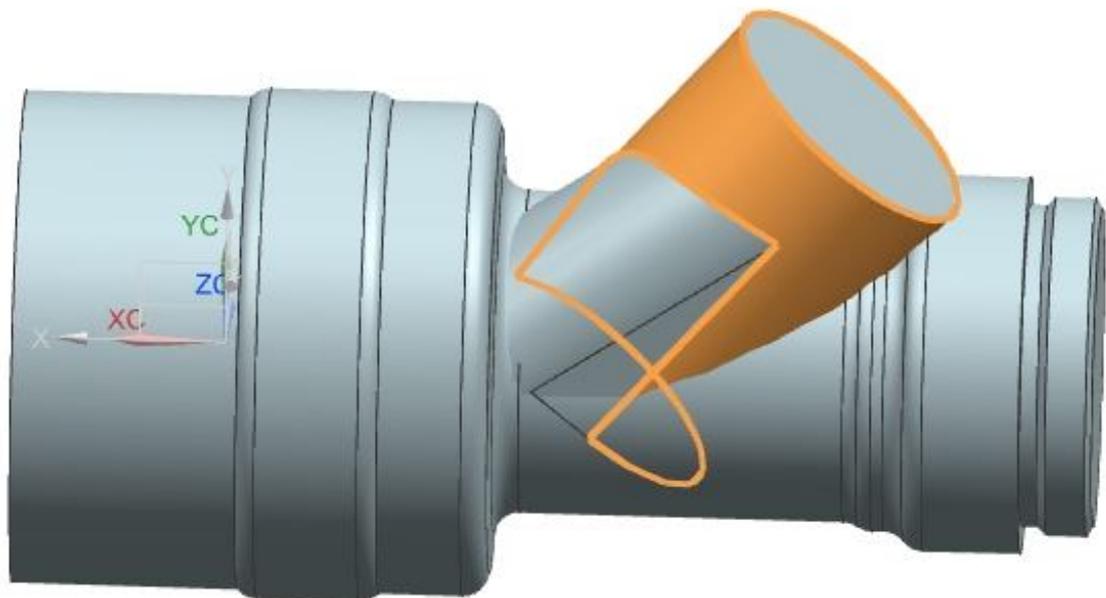


Рис. 2. 44 - Операция **заменить грань**  - заготовка под воздухозаборник

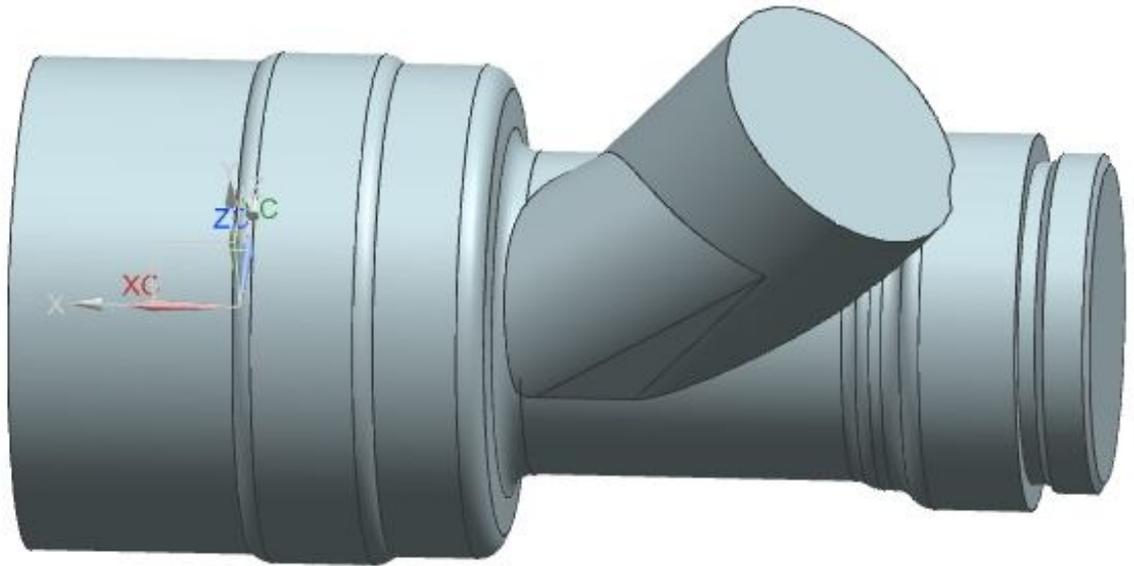


Рис. 2. 45 - Операция обрезки тела  - заготовка под воздухозаборник

**Восьмым шагом** с помощью операции вращения  создаётся элемент {24}, показанный на рис. 2.46. Затем с помощью операций заменить грань , обрезка тела , объединение тел , скругления  аналогично шагам с третьего по шестой происходит дальнейшее формирование геометрии, завершающееся на девятом шаге {31} объединением  созданной геометрии в единое тело (см. рис. 2.47).

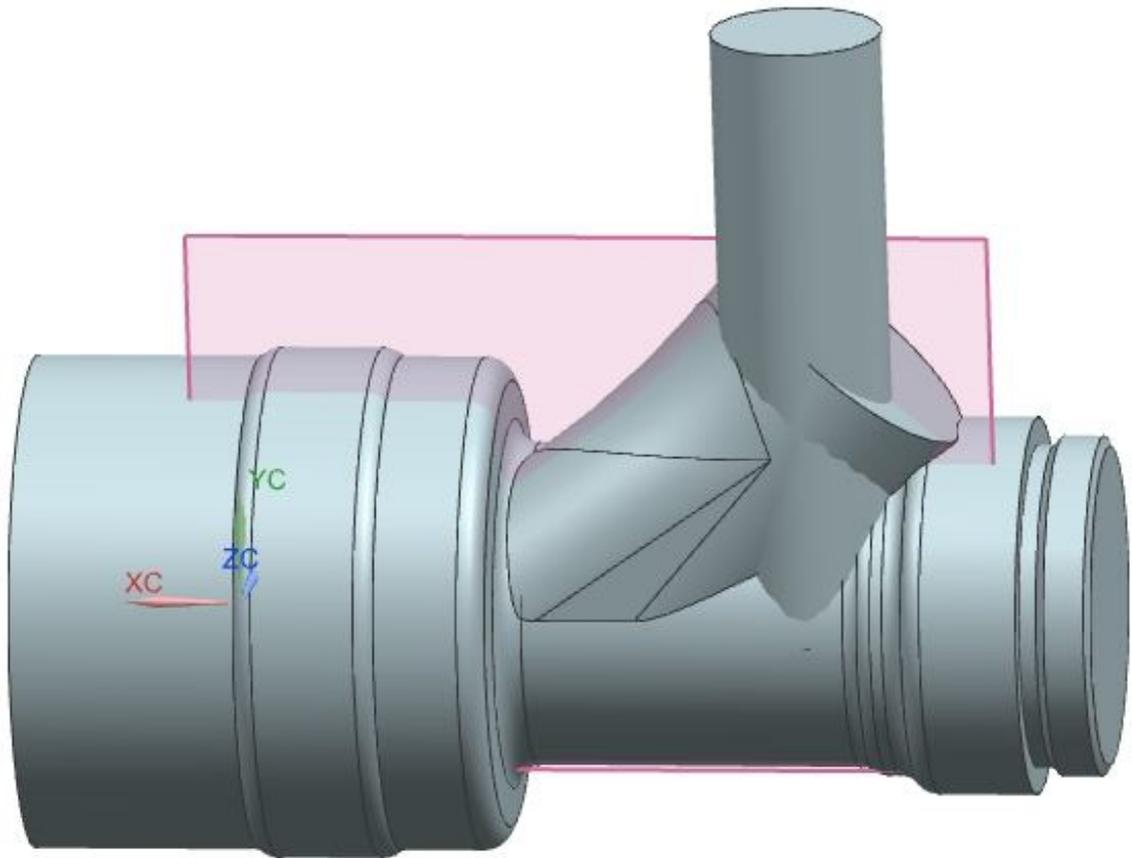


Рис. 2. 46 - Операция вращения  - заготовка под воздухозаборник

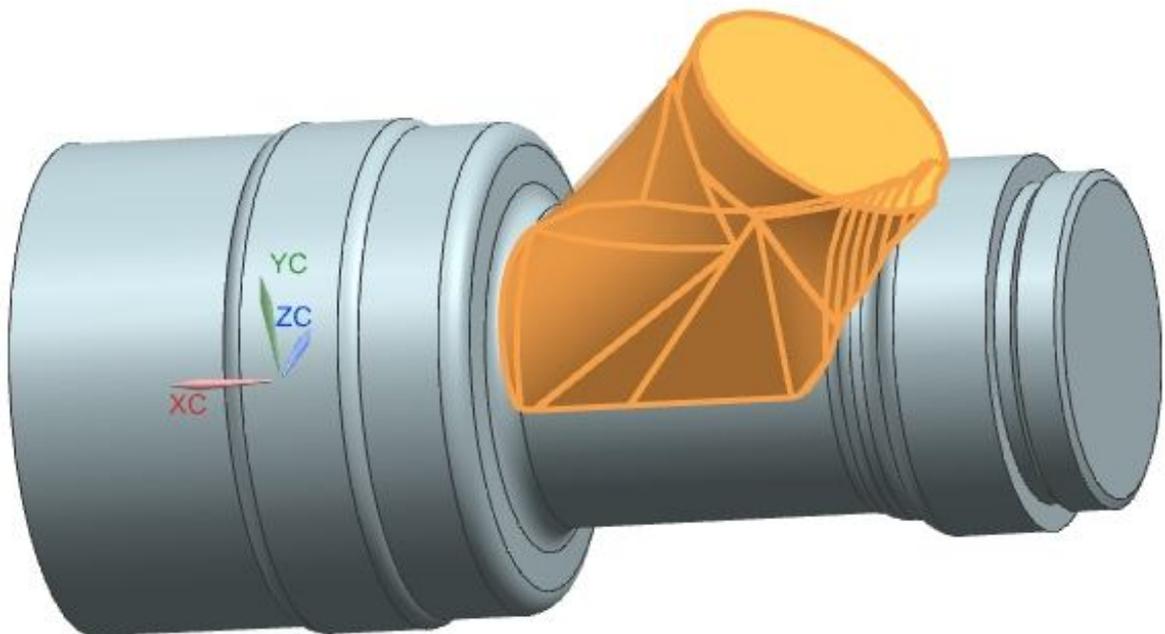


Рис. 2. 47 - Операция объединения  - заготовка под воздухозаборник

На **десятом шаге** {33} с помощью операции вращения  начинается создание цилиндра двигателя (см. рис. 2.48).

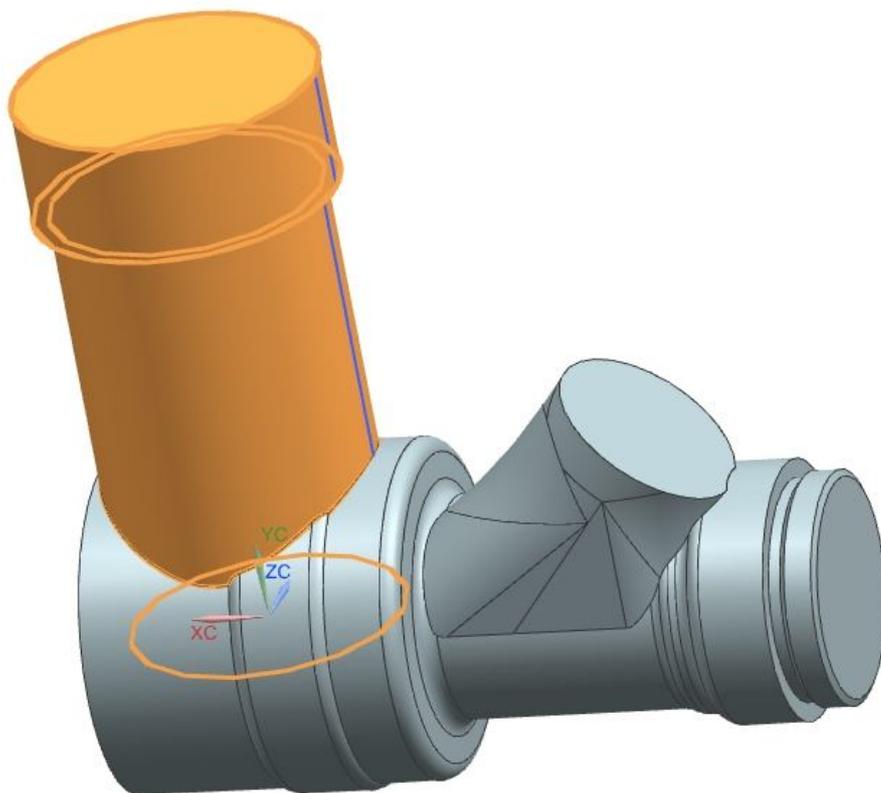


Рис. 2. 48 - Операция вращения  - заготовка под цилиндр двигателя

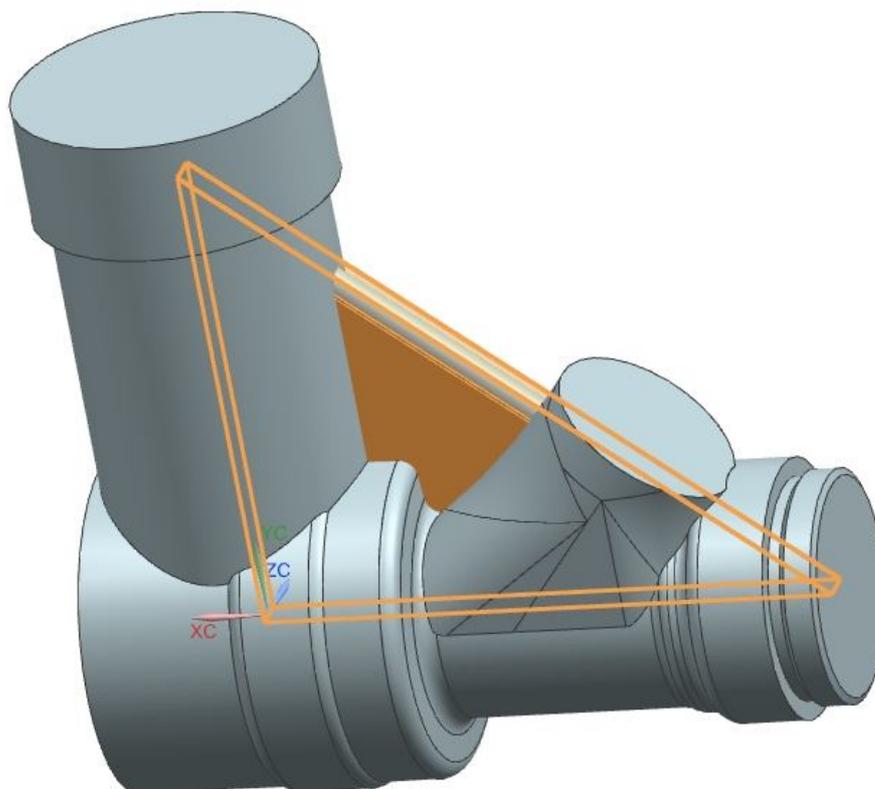


Рис. 2. 49 - Операция вращения  - заготовка под цилиндр двигателя

Затем на **одиннадцатом шаге** {34} создаётся заготовка под ребро жёсткости, которая дорабатывается операциями . Для задания уклона  на часть тела оно предварительно разделяется операцией , а затем по завершении всех операций редактирования все элементы объединяются  вместе и с созданной ранее геометрией.

На **двенадцатом шаге** {44} операцией вращения  создаётся заготовка под ребро охлаждения цилиндра (см. рис. 2.50).

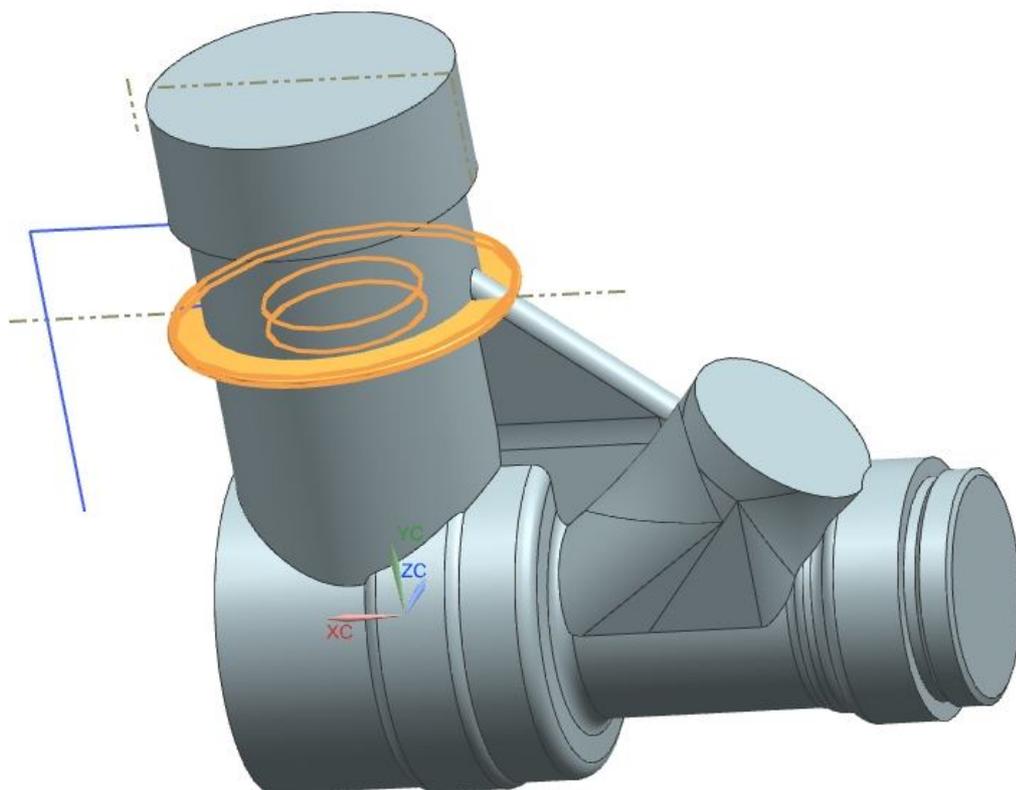


Рис. 2. 50 - Операция вращения  - заготовка под ребро охлаждения цилиндра

На **тринадцатом шаге** {45-47} с использованием массива геометрии  (со свойством перемещение  вдоль оси цилиндра) производится копирование созданного ребра на всю длину цилиндра с последующей обрезкой получившегося оребрения  в задней части (см. рис. 2.51).

На **четырнадцатом шаге** {49} операцией вращения  создаётся заготовка под выхлопной патрубок (см. рис. 2.52).

На **пятнадцатом шаге** {51-92} производится оребрение выхлопного патрубка. Каждое ребро создаётся одинаково. Используя элементы геометрии кривые пересечения  (создаёт кривую вдоль линии пересечения выбранных поверхностей или граней) и отрезки , создаётся вспомогательная геометрия, копируемая массивом геометрии . Затем, в силу сложной формы, используя элемент заметание  (создаёт тело заметанием (скольжением вдоль кривой) сечения по одной или нескольким

направляющим (кривым или отрезкам), используя различные опции, чтобы управлять формой вдоль направляющей) создаётся геометрия каждого ребра, поскольку из-за их уникальности использование массива не представляется возможным (см. рис. 2.53).

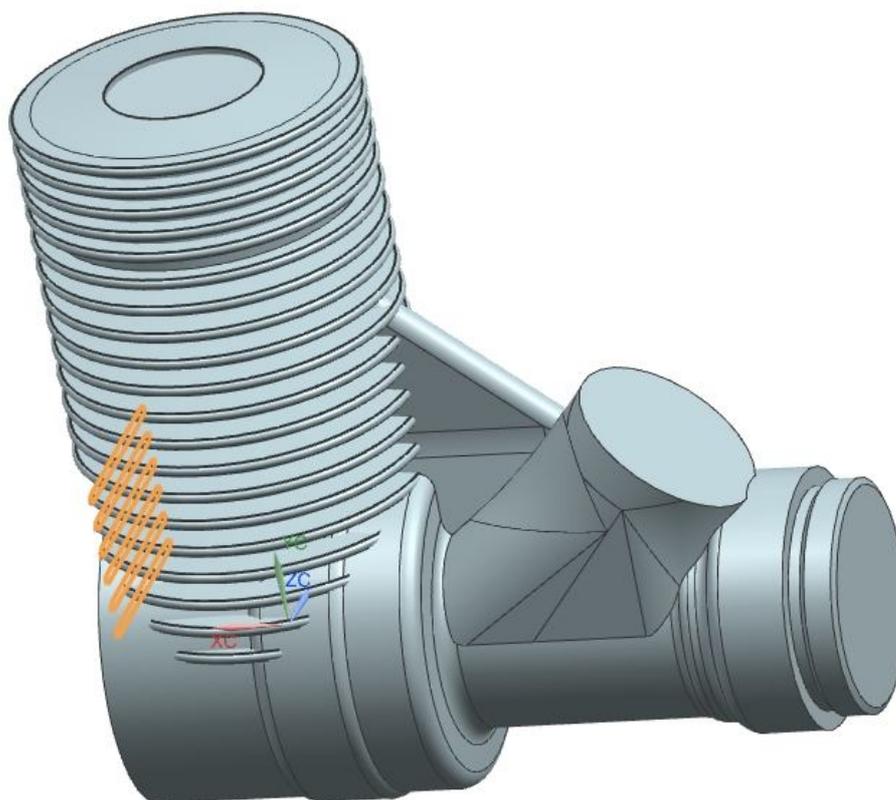


Рис. 2. 51 - Операция геометрический массив  - рёбра охлаждения цилиндра

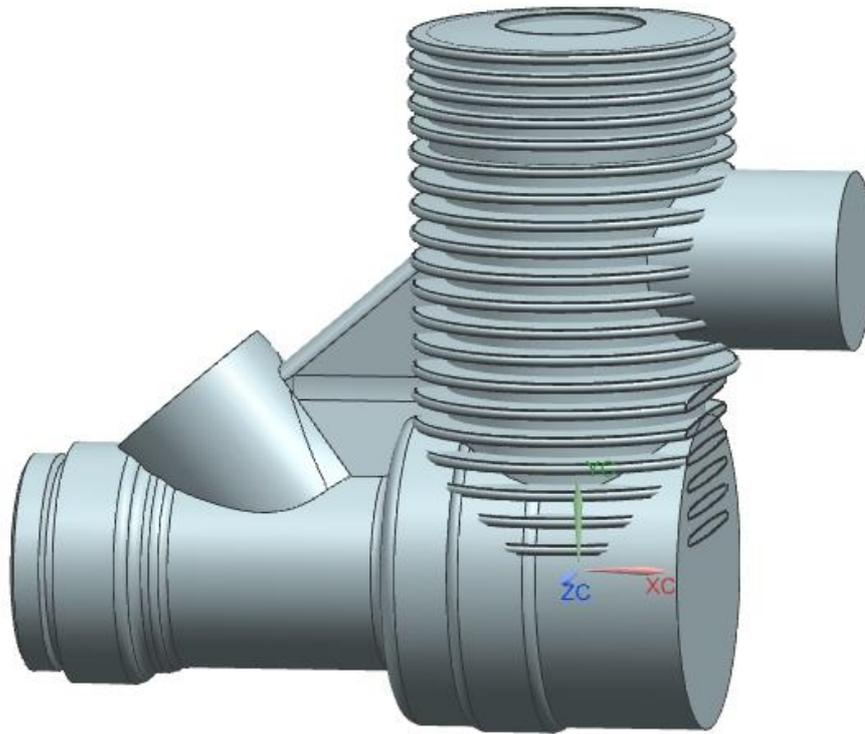


Рис. 2.52 - Операция вращения  - заготовка под выхлопной патрубком

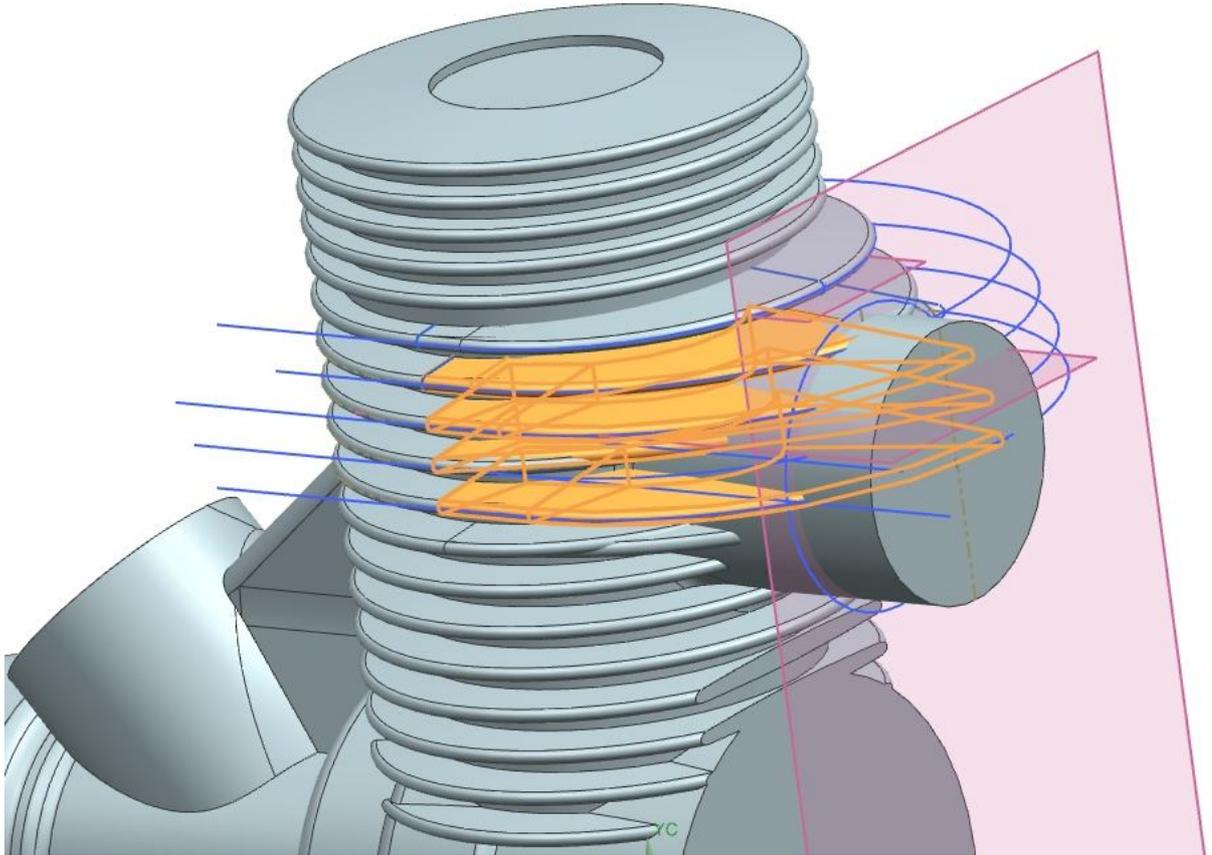


Рис. 2.53 - Операции заметания  и геометрии массива  -  
оробрение выхлопного патрубка

На **шестнадцатом шаге** {96} операцией вращения  создаются посадочные места на выхлопном патрубке под резонансную трубу (см. рис. 2.54). Сама резонансная труба создаётся поворотом  эскиза , где сложная аэродинамическая поверхность смоделирована сплайном , проходящим через точки  с заранее вычисленными координатами.

На **семнадцатом шаге** {97-109} с помощью операции вытягивания  создаётся присоединительный элемент на выхлопном патрубке (см. рис. 2.55), который затем копируется массивом геометрии  с использованием настройки "Зеркало"  относительно плоскости симметрии двигателя (XY). Также на этом шаге производится придание более реалистичной формы оробрению за счёт операций скругления ребра  и скругление граней .

(создаёт скругления вдоль всей линии пересечения выбранных граней/поверхностей). Напоминаем, что подробнее об основных операциях моделирования в среде NX и их опциях можно узнать в [1].

На **восемнадцатом шаге** {109-121} с помощью чередования цепочек вытягивание  + обрезка тела , с последующим объединением  создаётся геометрия прилива под иглу (см. рис. 2.18). На последнем этапе в приливе делается отверстие инструментом  (см. рис. 2.56).

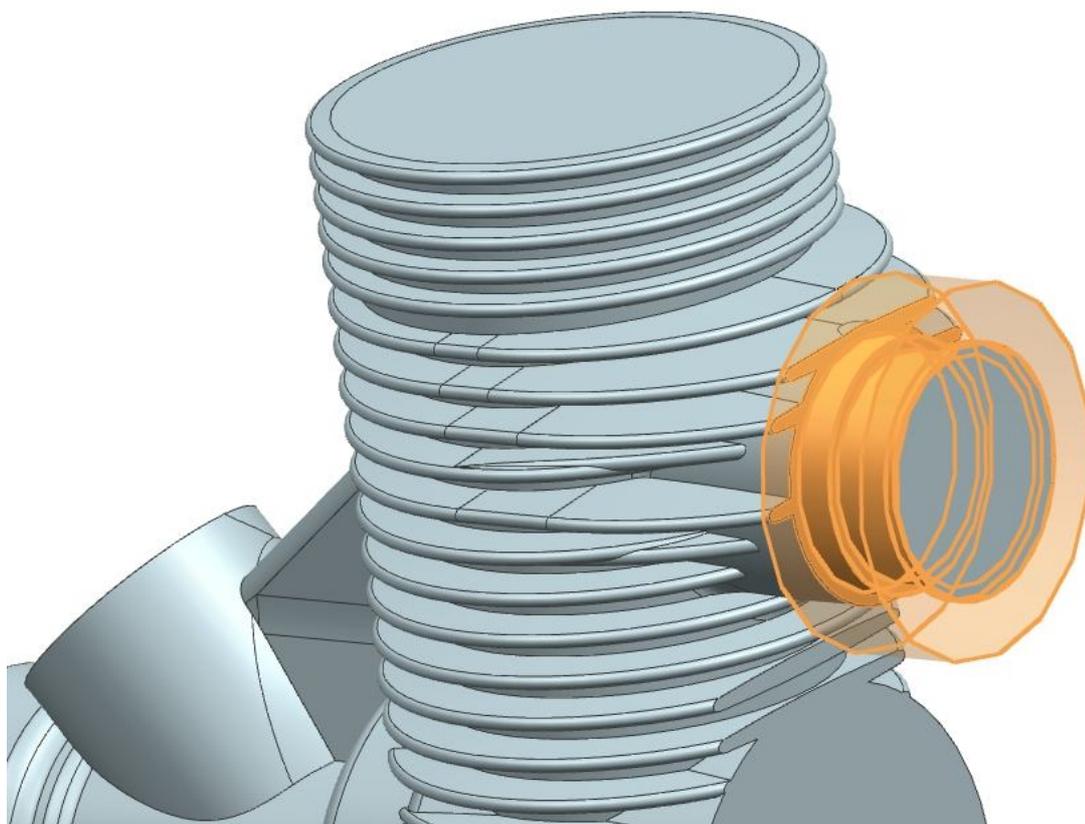


Рис. 2.54 - Операция вращения  - заготовка под выхлопной патрубок

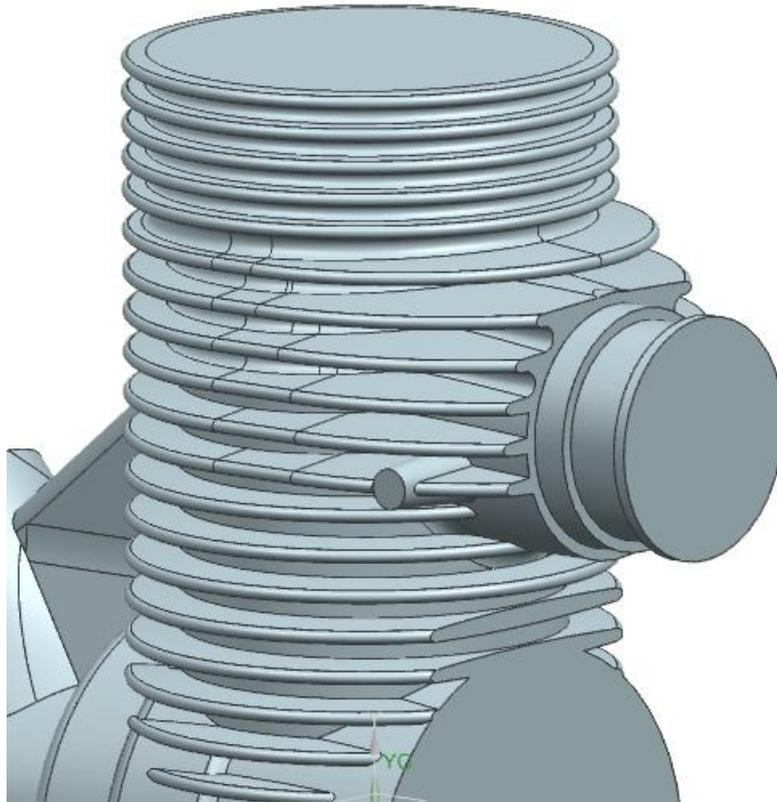


Рис. 2.55 - Операции вытягивания 🏠, скругления ребра 📦 и грани 📄 - оребрение цилиндра и выхлопной патрубков

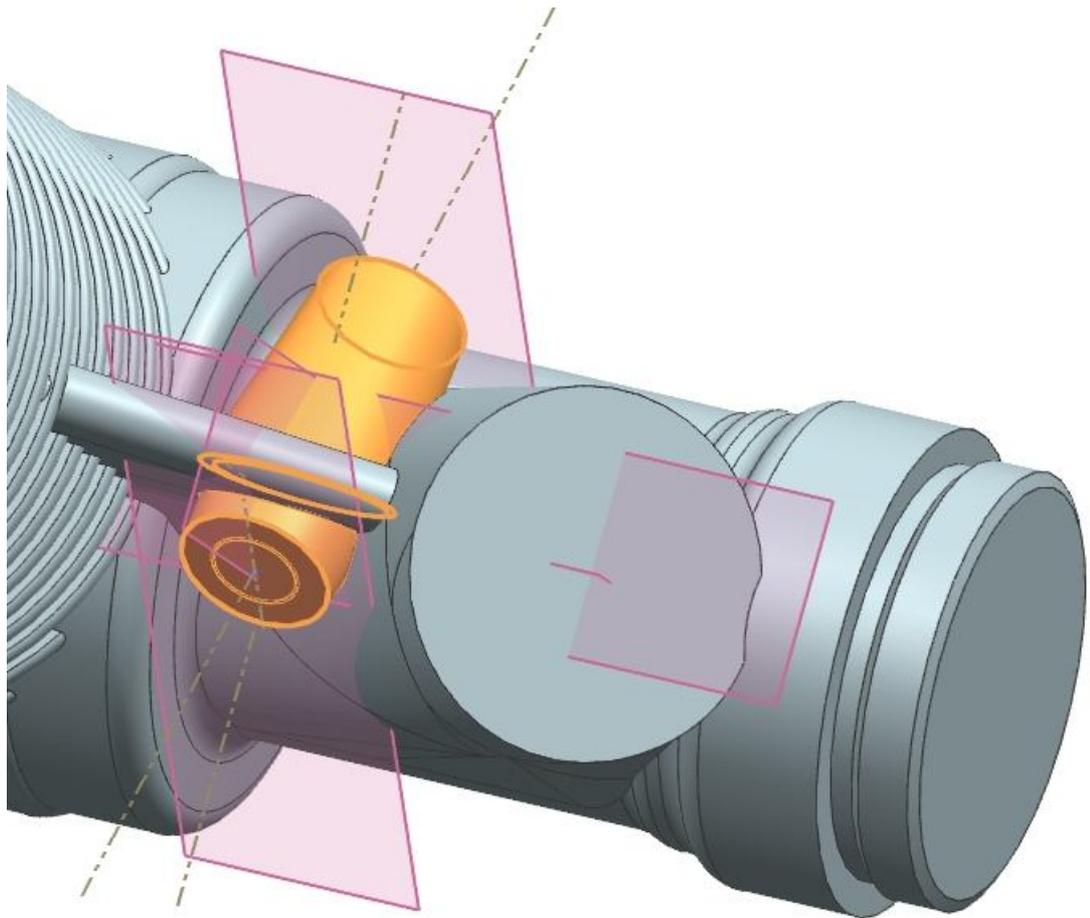


Рис. 2.56 - Операции вытягивания , обрезки тела  и объединения  -  
создание прилива под иглу

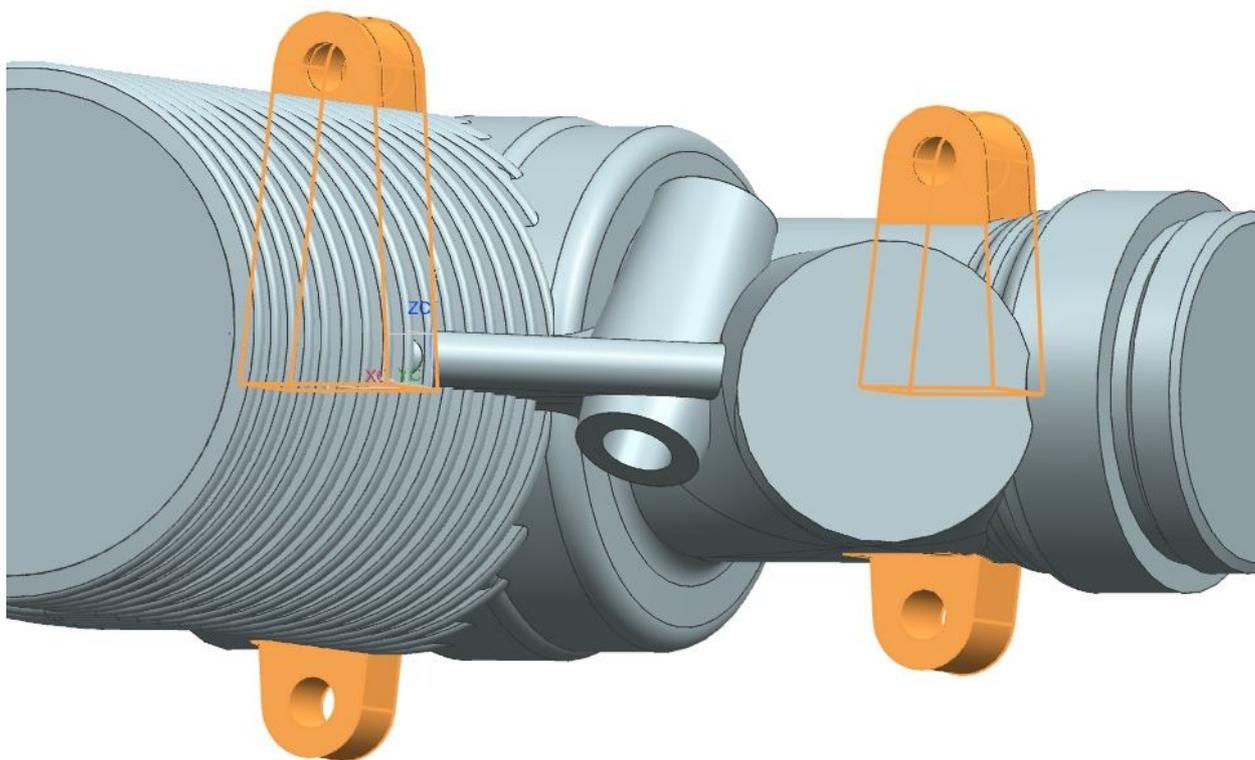


Рис. 2.57 - Операции вытягивания , массива геометрии , объединения  и вычитания  - проушины для крепления двигателя к летательному аппарату

На **девятнадцатом шаге** {122-138} создаются четыре проушины под закрепление двигателя в корпусе. Сложность создания данных элементов (потребовавшая большое количество операций в древе) объясняется тем, что проушины находятся в разных плоскостях (смещение 0,5 мм). Основная геометрия каждой проушины создаётся с помощью операции вытягивания , затем симметрично копируется относительно плоскости симметрии двигателя XY операцией массив геометрии , и дорабатывается операциями вытягивание , объединение  и вычитание  (см. рис. 2.57).

На **двадцатом шаге** {139-152} к созданным ранее проушинам добавляются рёбра жёсткости. Для их создания также, как и самих проушин используются комбинация операций вытягивание  и массив геометрии . Для придания нужной формы в местах соединения с созданной ранее геометрией используется инструмент обрезка тела  поверхностью,

создаваемой для каждого случая инструментом заменить грань  из близлежащей грани детали. В комбинации вновь созданная геометрия соединяется с ранее созданной операцией объединения  (см. рис. 2.58).

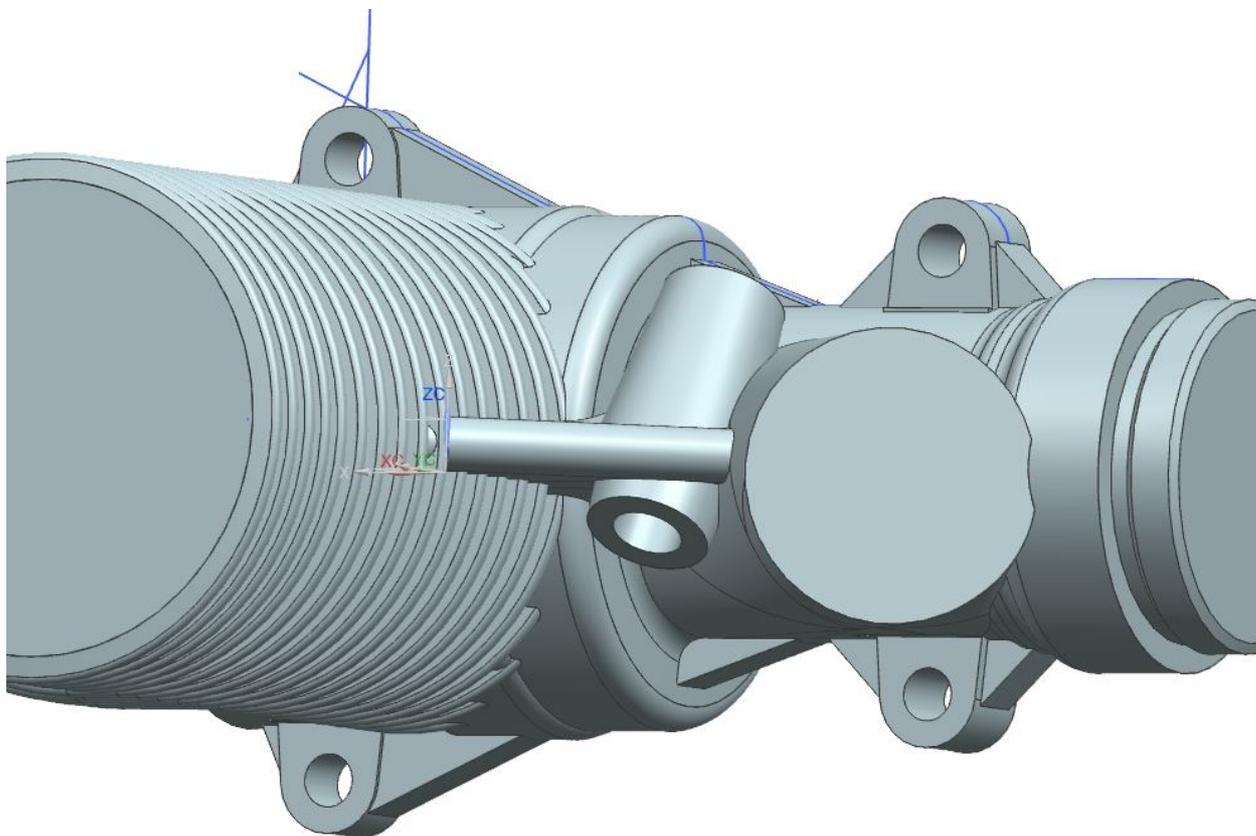


Рис. 2.58 - Операции вытягивания , массива геометрии , замены грани  и объединения  - рёбра жёсткости проушин

На **двадцать первом шаге** {153} созданные выше рёбра жёсткости скругляются по наружным кромкам инструментом скругления ребра . Рисунок 2.59 демонстрирует, как сильно скругления влияют на внешний вид модели.

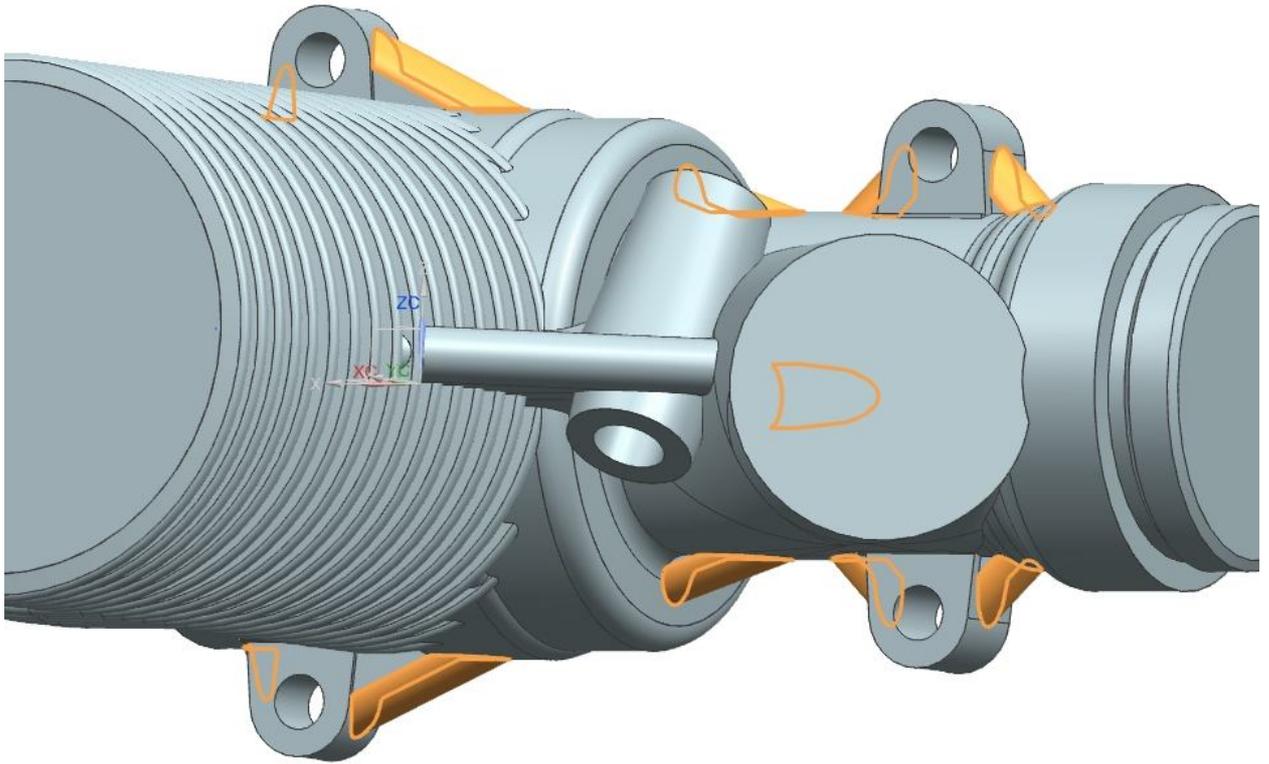


Рис. 2.59 - Операции скругления ребра  - рёбра жёсткости проушин

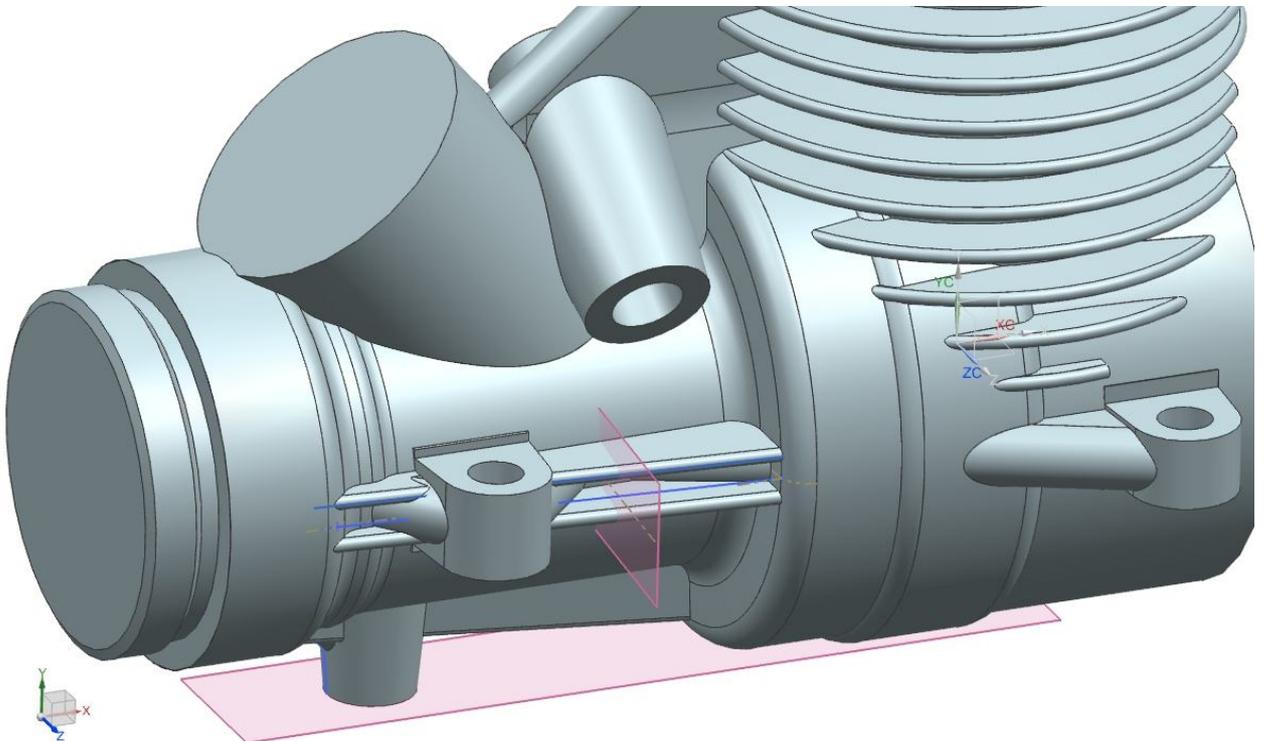


Рис. 2.60 - Операции вытягивания , массива геометрии , замены грани   
и объединения  - рёбра жёсткости проушин

На **двадцать втором шаге** {154-170} продолжается создание рёбер в зонах проушин и добавляются рёбра в нижней части картера (см. рис. 2.60). Порядок операций тот же, что и на предыдущем шаге, однако для избавления от нежелательных поверхностей (например, когда одна грань в результате операций создания оказывается состоящей из нескольких поверхностей) используется инструмент удалить грань  с панели синхронного моделирования, который "заращивает" пространство удаляемой грани, аппроксимируя соседние.

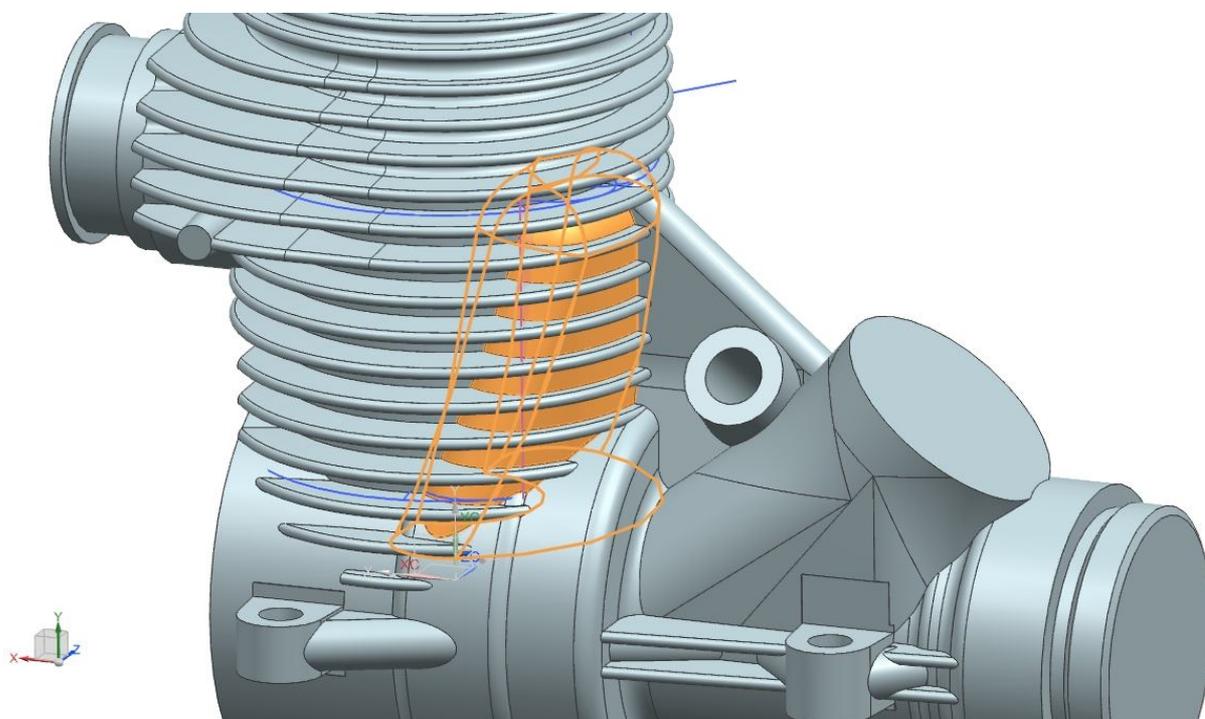


Рис. 2.61 - Операции создание объёма по кривым , смещение поверхности , обрезка и расширение , сшивка  и объединение  - передний прилив картера

На **двадцать третьем шаге** {171-195} начинается формирование приливов на поверхности картера, в которых впоследствии должны быть размещены каналы газообмена, обеспечивающие подвод готовой смеси в цилиндр и отвод отработанных газов из него. Построение таких элементов

напоминает работу скульптора по мрамору: сначала высекается большая глыба (основная геометрия), затем крупным резцом ей придаётся нужная форма и наконец на последнем шаге создаются мелкие детали.

Для построения прилива, показанного на рис. 2.61, базовой операцией является создание объёма по кривым , которая создаёт тело по нескольким сечениям, форма которых соответствует сетке кривых. В данном случае используются три сечения, каждое из которых выполнено в отдельном эскизе : одно внизу, одно наверху и одно в средней части геометрии прилива. Самым сложным здесь является обеспечить сопряжение со сложной оребрённой геометрией цилиндра. Для этой задачи сначала операцией смещение поверхности  из граней прилива создаётся набор поверхностей, которые затем используются для удлинения этих граней до плавного сопряжения с геометрией операцией  (обрезает или расширяет набор граней по расстоянию, как использовано в данной модели, или до пересечения с другим набором граней). Затем производится обрезка тела  созданной координатной плоскостью , добавление скругления рёбер прилива и производится сшивка  (комбинация твёрдых тел, сшитая по общим граням) всей геометрии прилива в одно целое с последующим объединением с ранее созданной геометрией операцией объединение .

На **двадцать четвёртом шаге** {196-208} аналогичным образом формируется геометрия приливов на боковой части картера. Отличиями является то, что для расширения граней прилива для сопряжения с нижней частью картера используется инструмент смещение области  (смещает набор граней от их текущего расположения и настраивает скругления смежных граней) с указанием расстояния в 15,5 мм (это расстояние от плоскости  нижнего эскиза  прилива до оси двигателя X), а для копирования геометрии прилива на симметричную часть двигателя используется массив геометрии  с настройкой "Зеркало"  (см. рис. 2.62).

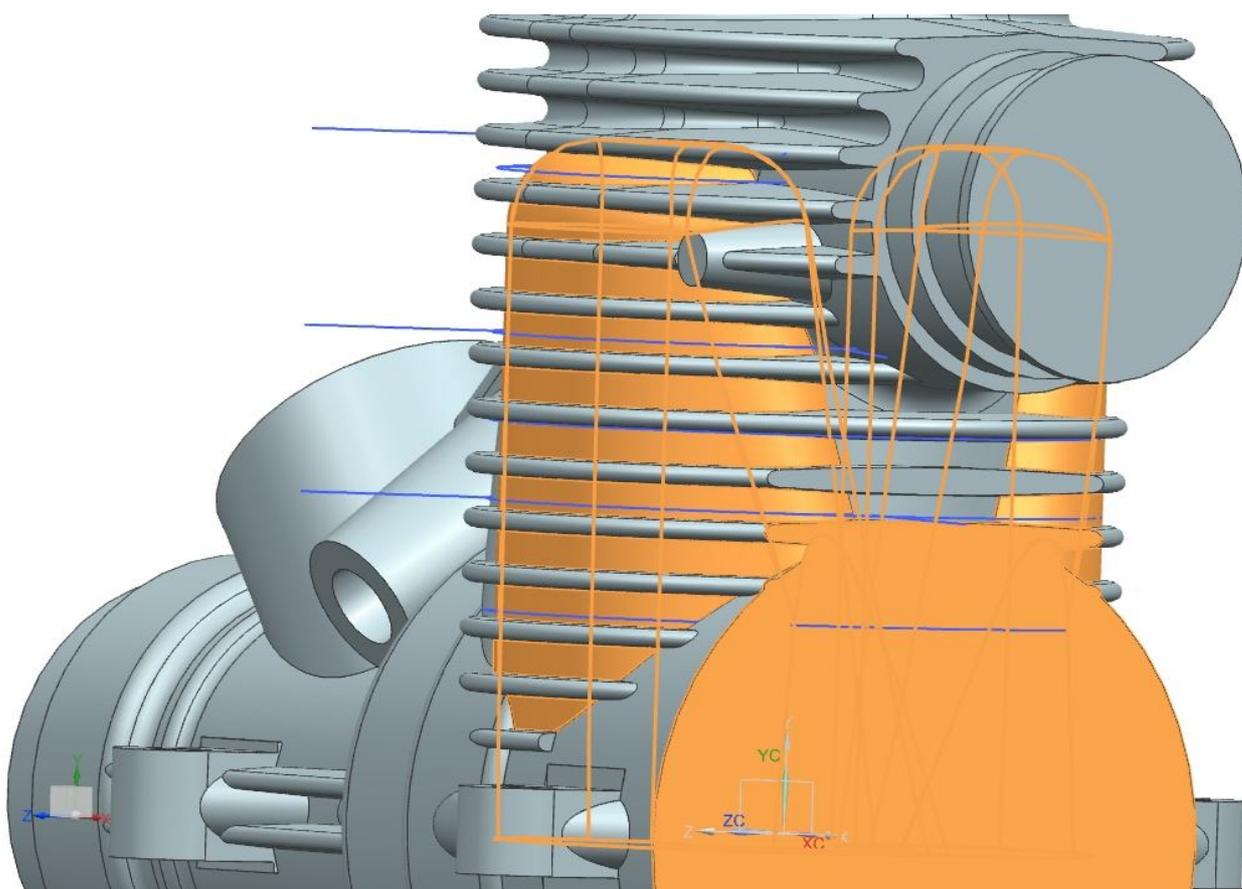


Рис. 2.62 - Операции создание объёма по кривым , смещение области , массив геометрии  и объединение  - боковые приливы картера

На **двадцать пятом шаге** {209-212} производится добавление на задней части картера геометрии для соединения с задней крышкой (см. рис. 2.9). Основной операцией этого шага является вытягивание  с последующим скруглением рёбер  и объединением  с основной геометрией картера (см. рис. 2.63). На этом заканчивается формирование внешней геометрии картера и создание его внутренней части.

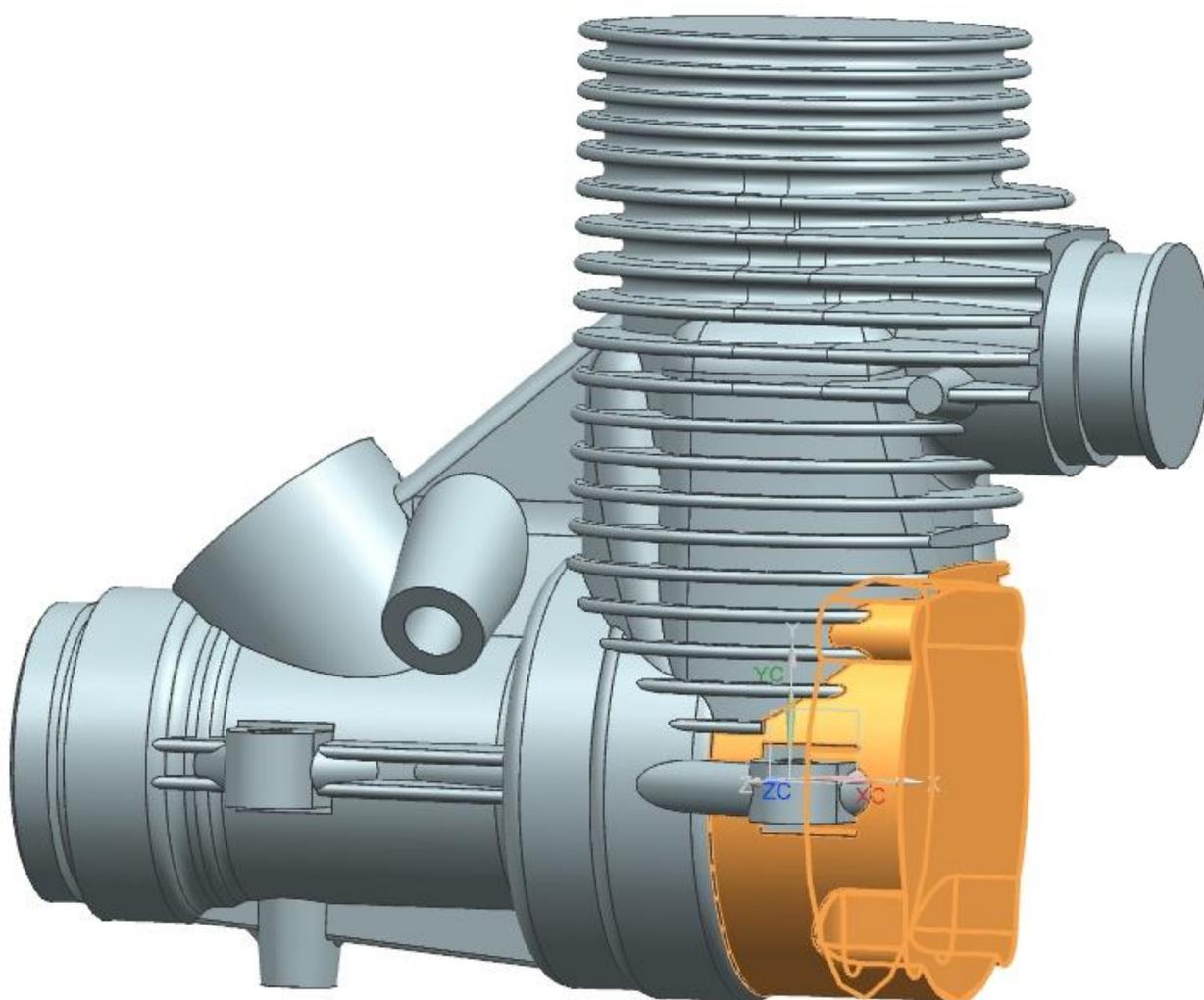


Рис. 2.63 - Операции вытягивания , скругления рёбер  и объединения  - развитая часть картера под присоединение задней крышки

На **двадцать шестом шаге** {213-221} операциями вращения  с настройкой вычитание  и отверстие  с настройкой простое отверстие  создаются цилиндрические пустоты в картере под коленчатый вал (см. рис. 2.27) и гильзу с поршнем (2.21). Для лучшего понимания на рис. 2.64 показан разрез картера по плоскости симметрии XY (см. рис. 2.64).

На **двадцать седьмом шаге** {222-259} происходит формирование выпускного тракта двигателя от цилиндра до входа в резонансную трубу (см. рис. 2.65). Основной объём удаляется операцией вращения , затем с

помощью координатных плоскостей , проекционных кривых  и кривых пересечения , используя операцию заметание , создаются плавные обводы выпускного канала и удаляется лишняя геометрия. Окончательная форма задаётся с использованием операций смещения поверхности , обрезка и расширение , сшивка  и обрезка тела  с последующим объединением . Также здесь используется операция обрезка поверхности  (обрезает часть листового тела, используя кривые, грани или координатную плоскость) для редактирования граней. Вообще, при доработке элементов сложной плавной формы иногда рациональнее создавать замкнутый объём из поверхностей, а затем заполнять его материалом, например, с помощью операции по кривым .

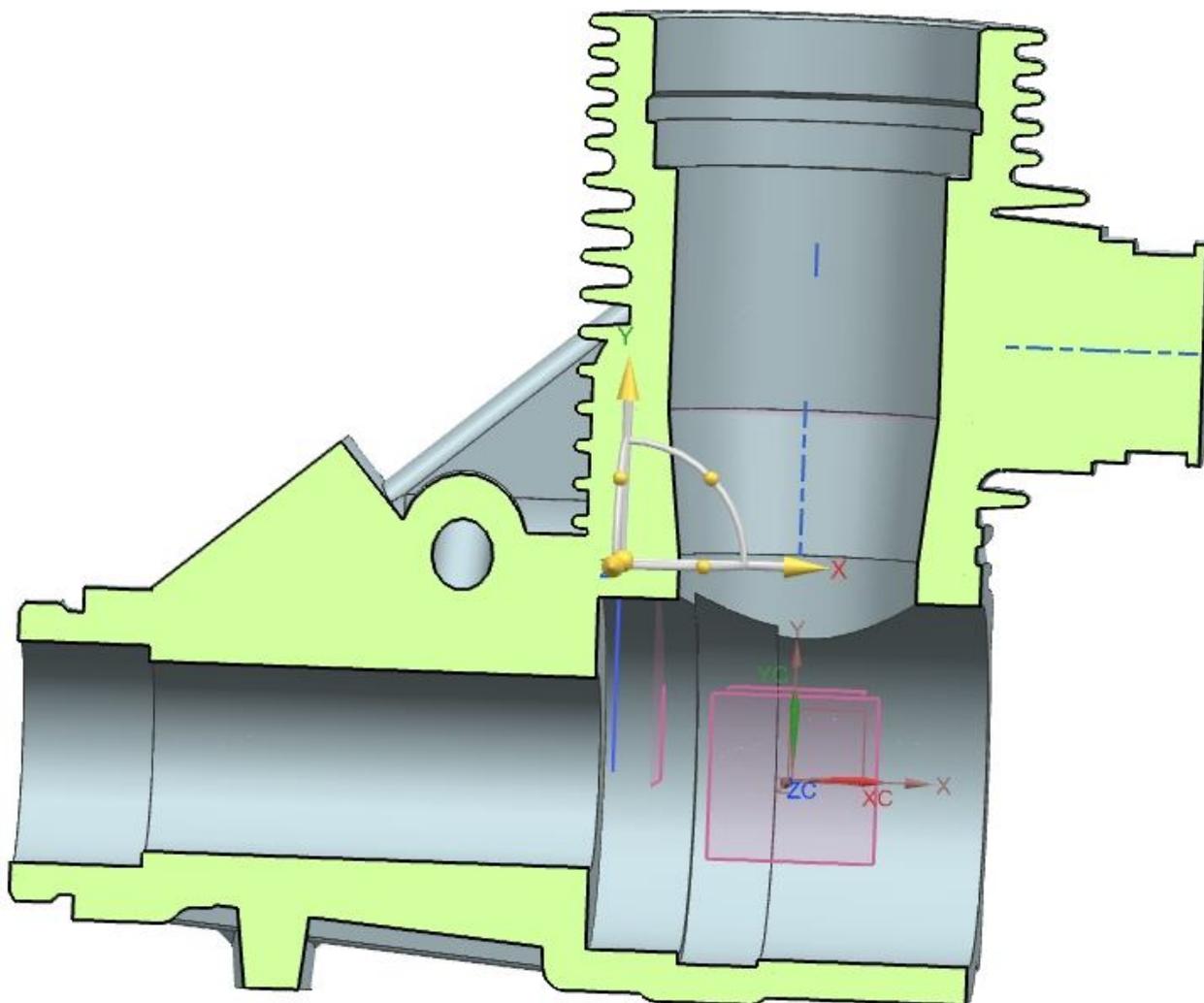


Рис. 2.64 - Операции вращения  и отверстия  - цилиндрические пустоты в картере

На **двадцать восьмом шаге** {260-280} происходит формирование внутренней поверхности бокового канала (см. рис. 2.66). Данная операция производится аналогично предыдущему шагу. В качестве основной операции выступает вращение . Для создания симметричного канала с другой стороны цилиндра используется операция геометрии массива . Затем созданная геометрия вычитается из геометрии картера .

На **двадцать девятом шаге** {281-322} аналогично создаётся геометрия переднего впускного канала (см. рис. 2.66), причём основной также выступает операция вращения , доработка производится операцией

смещение области , обрезка тела  и т.д. Особенностью является создание сопряжения между полостями цилиндра области размещения коленчатого вала. Для создания нижней части паза главной выступает операция вытягивания , некоторая доработка производится инструментами вращение , смещение области , удаление грани , замена грани  и прочими элементами, перечисленными в древе построения модели (см. рис. 2.73)

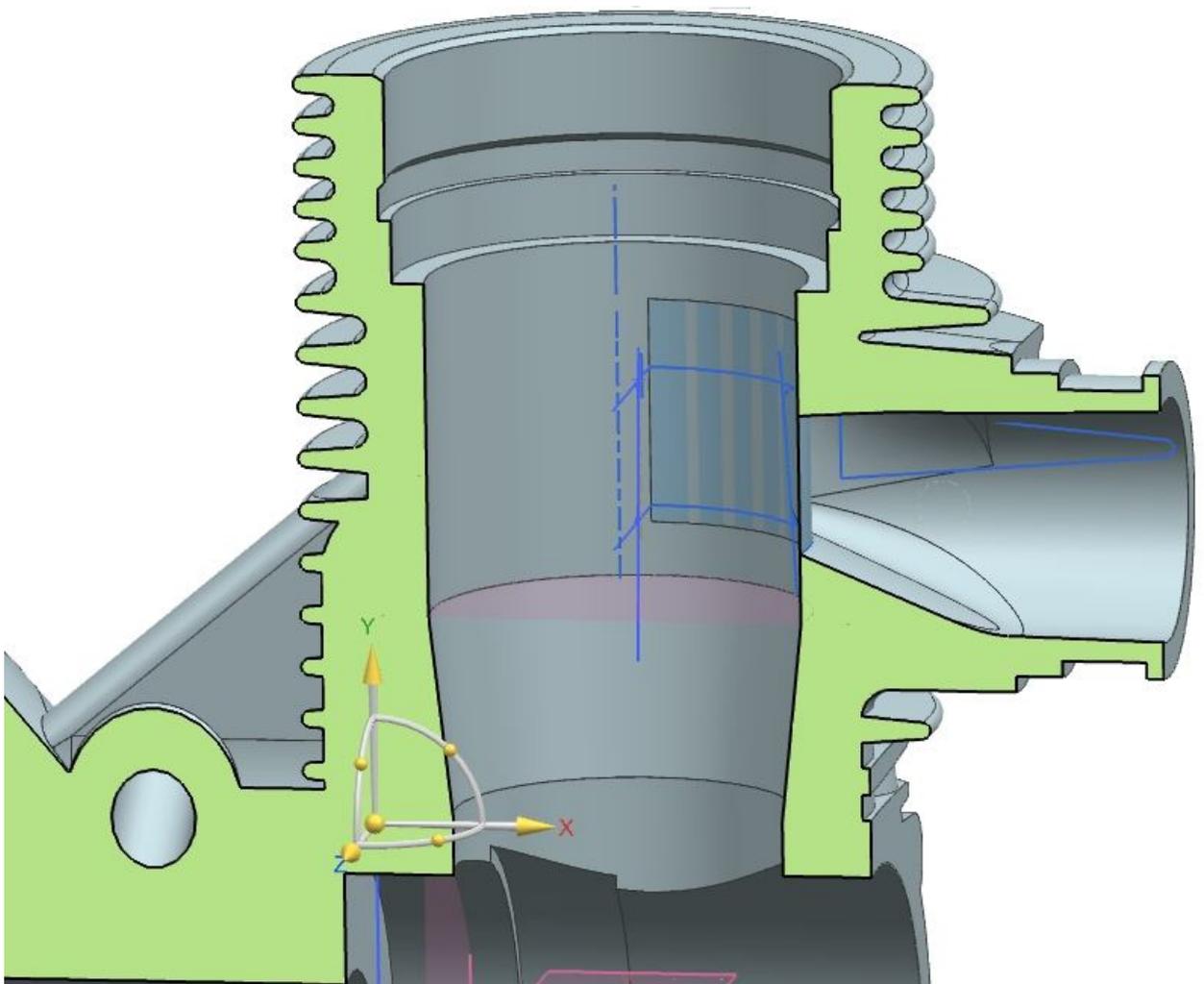


Рис. 2.65 - Операции вращения , заметания , обрезки и расширения , сшивки , обрезки тела , объединения  - выпускной тракт двигателя

На **тридцатом шаге** {323-351} производится формирование канала воздухозаборника (см. рис. 2.68). Основными операциями являются вращение  и обрезка тела . Причём для операций вращения  используются разные булевы операции: нет  {324}, пересечение  {325}, нет  {327}, вычитание  {330}, нет  {331, 338}, как и для операций вытягивания : вычитание  {350} и объединение  {351}, что позволяет гибко применять эти инструменты для обеспечения заданной формы тела, не увеличивая древо построения . Наличие в рамках одной детали нескольких тел (созданных использованием булевой операции нет ), позволяет сначала сформировать геометрию отдельного элемента, а затем целиком присоединить этот элемент к модели.

На **тридцать первом шаге** {352-354} операцией вращения  с параметром вычитание  создаётся и операцией заменить грань  обрезается с наружной стороны посадочное место (см. рис. 2.69) под деталь сопло (см. рис. 2.13), созданную ранее.

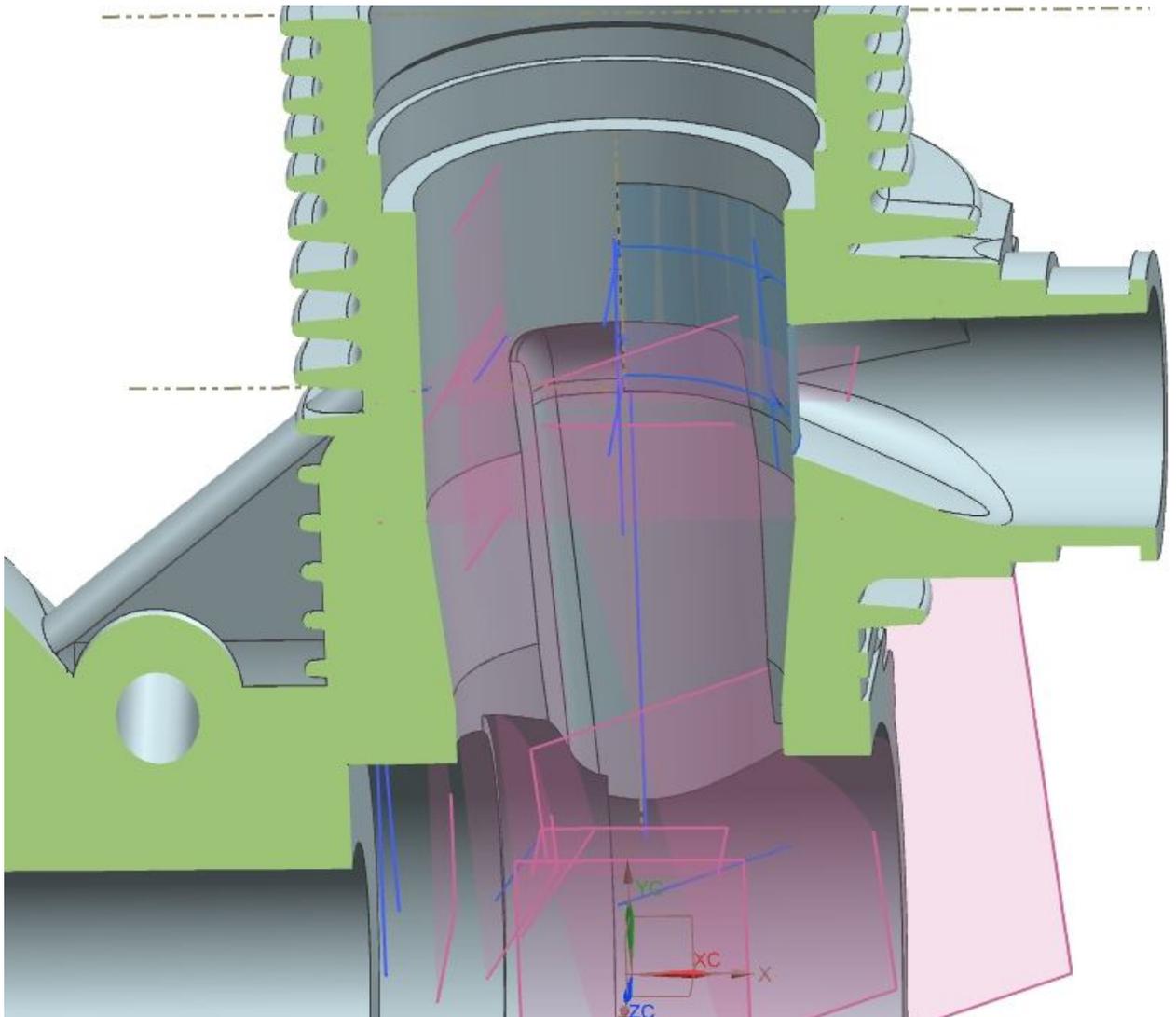


Рис. 2.66 - Операции вращения , обрезки тела , вычитания  - впускной тракт двигателя

На **тридцать втором шаге** {355-373} производится окончательная доработка модели картера, заключающаяся в добавлении мелких элементов, как это показано на рис. 2.70. Для этого использованы операции вращения  (для создания канала от воздухозаборника к игле), вытягивания , отверстий , скругления рёбер , фаски  и операции с гранями: удаление , смещение области , линейный размер  (перемещает набор граней и добавляет размеры).

Окончательный вид модели картера представлен на рисунках 2.71 и 2.72, а древо построения модели  на рисунке 2.73.

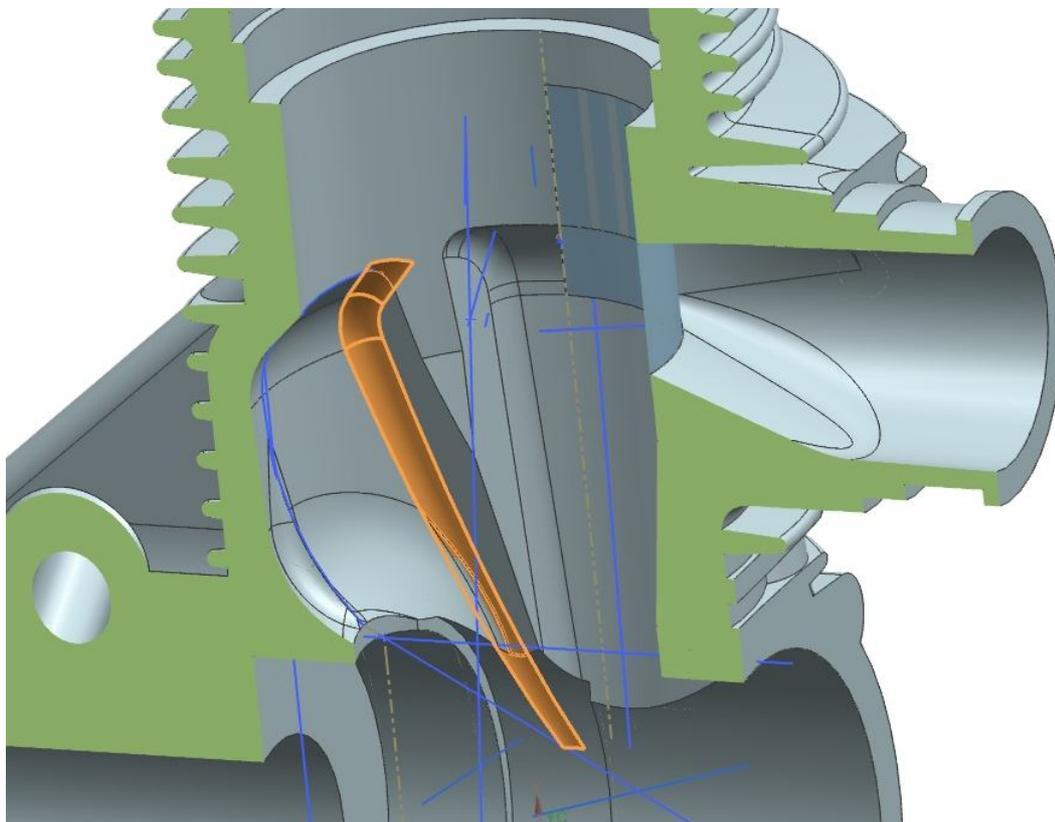


Рис. 2.67 - Операции вращения , вытягивания , операций с гранями (, , ),  
обрезки тела , объединения  - впускной тракт двигателя

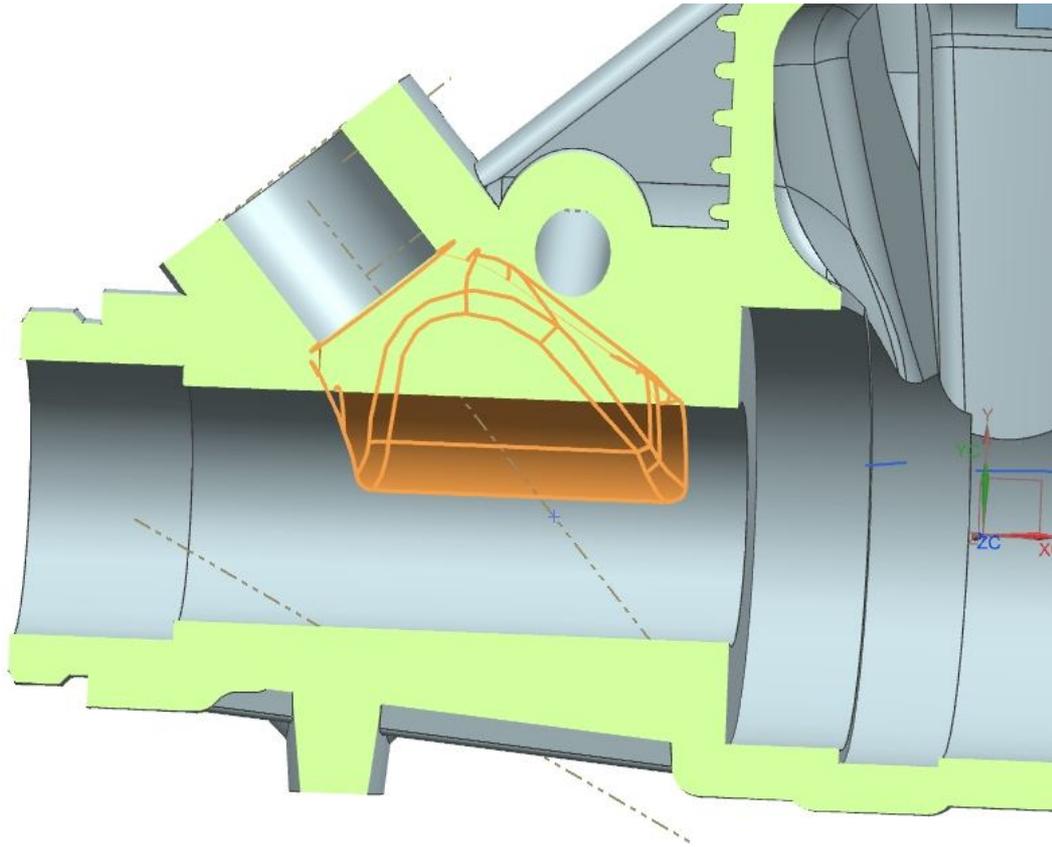


Рис. 2.68 - Операции вращения , вытягивания , геометрия массива, обрезки тела , объединения  и вычитания  - внутренняя поверхность воздухозаборника

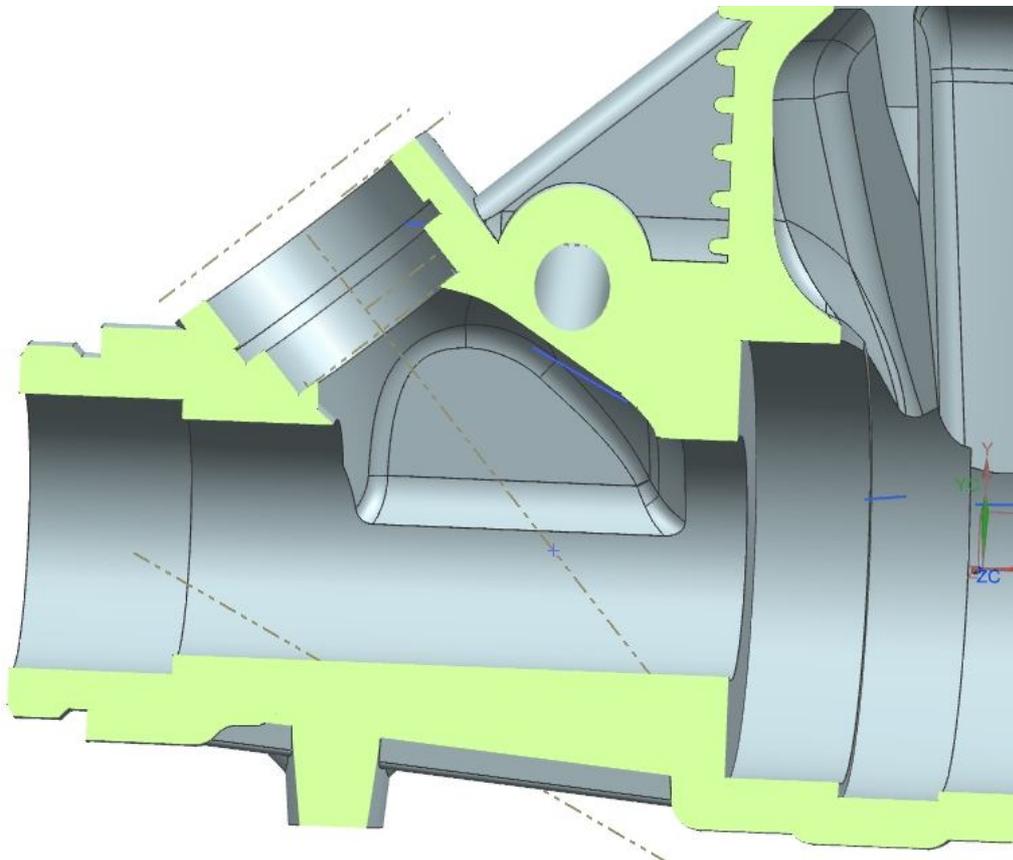


Рис. 2.69 - Операции вращения  и замены грани  -  
создание посадочного места под сопло

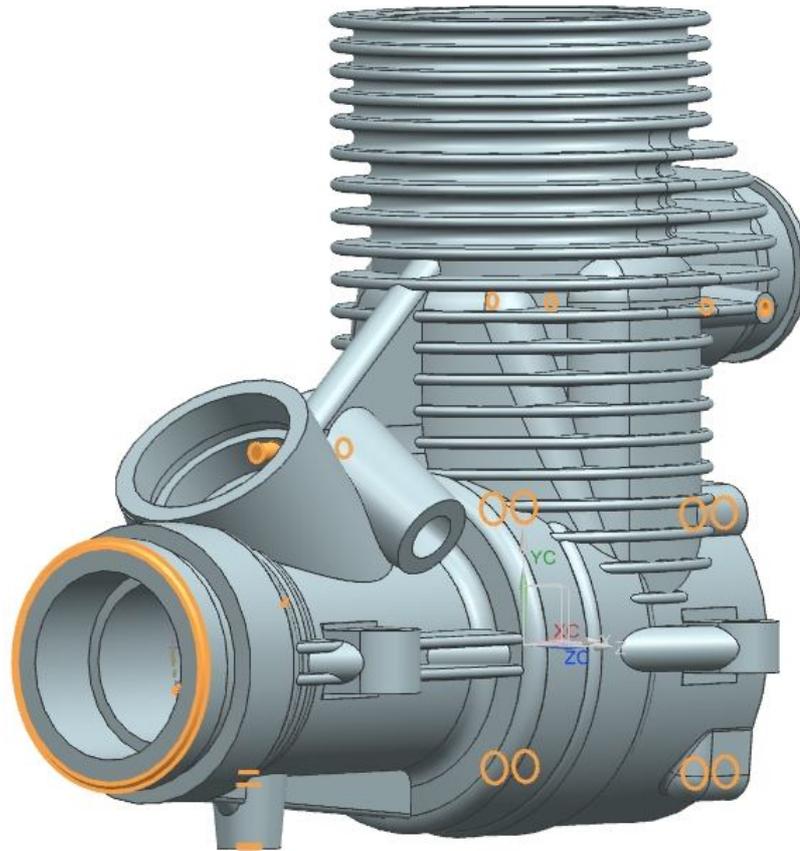


Рис. 2.70 - Операции вращения , вытягивания , скругления рёбер , фаски  и  
операции с гранями (, , ) - доработка модели картера

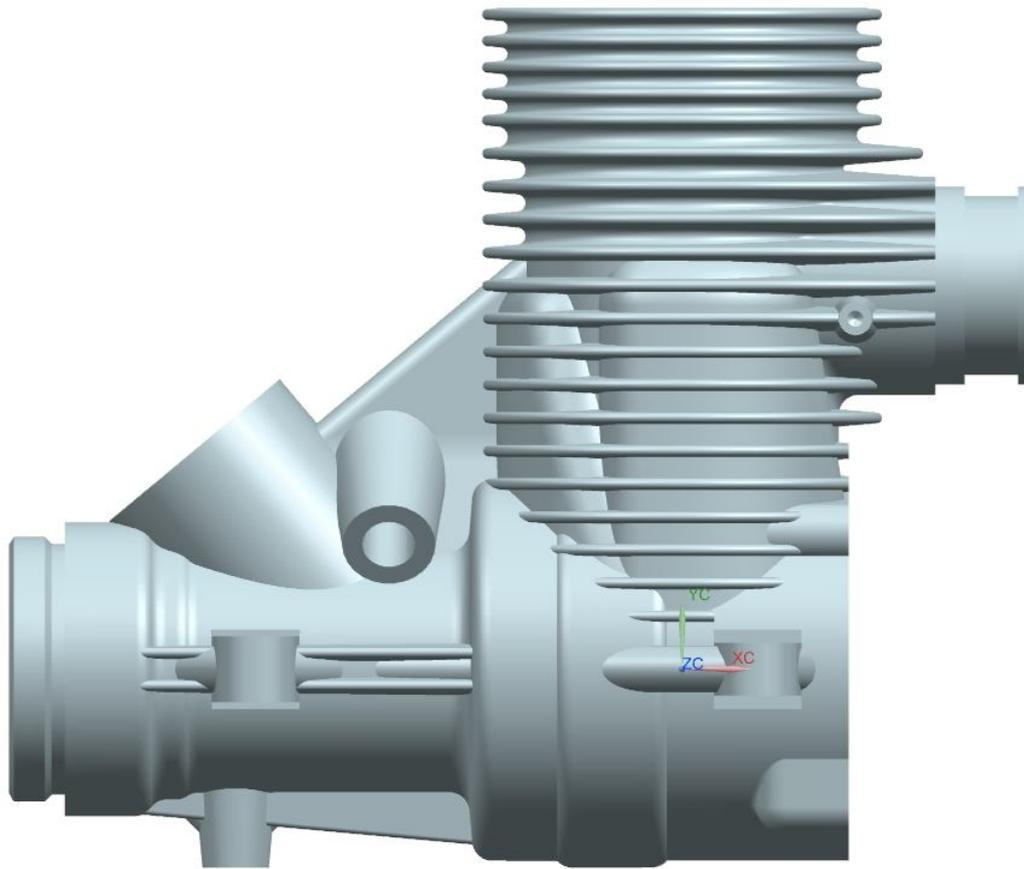


Рис. 2.71 - Модель картера - вид спереди

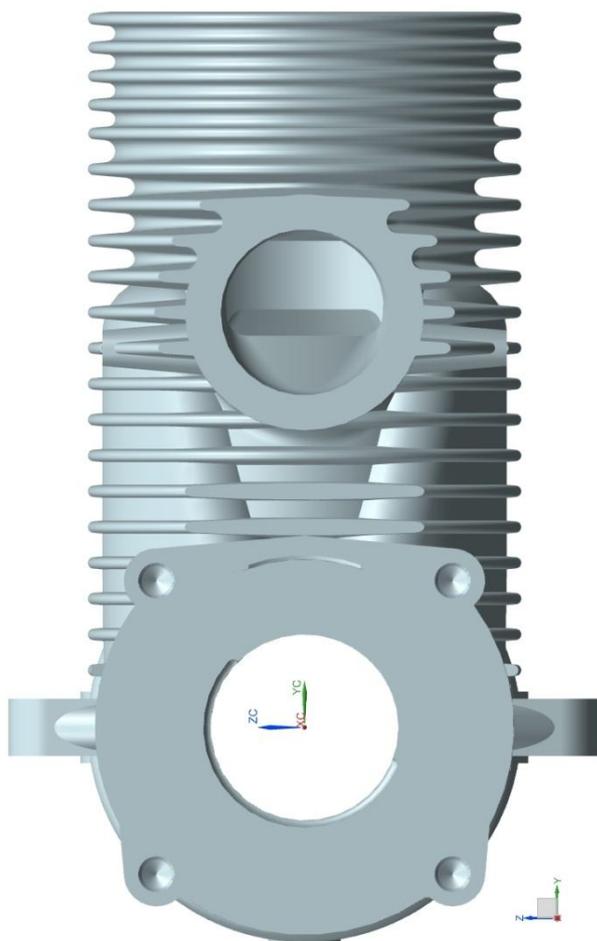


Рис. 2.72 - Модель картера - вид сбоку

<input checked="" type="checkbox"/>  Базовая система координат (0)
<input checked="" type="checkbox"/>  Эскиз (1) "SKETCH_000"
<input checked="" type="checkbox"/>  Вращение (2)
<input checked="" type="checkbox"/>  Координатная плоскость (3)
<input checked="" type="checkbox"/>  Проецированная кривая (4)
<input checked="" type="checkbox"/>  Вращение (5)
<input checked="" type="checkbox"/>  Скругление ребра (6)
<input checked="" type="checkbox"/>  Скругление ребра (7)
<input checked="" type="checkbox"/>  Скругление ребра (8)
<input checked="" type="checkbox"/>  Скругление ребра (9)
<input checked="" type="checkbox"/>  Кривые пересечения (10)
<input checked="" type="checkbox"/>  Кривые пересечения (11)
<input checked="" type="checkbox"/>  Координатная плоскость (12)
<input checked="" type="checkbox"/>  Координатная плоскость (13)
<input checked="" type="checkbox"/>  Эскиз (14) "SKETCH_002"
<input checked="" type="checkbox"/>  Вращение (15)
<input checked="" type="checkbox"/>  Обрезка тела (16)
<input checked="" type="checkbox"/>  Объединение (17)
<input checked="" type="checkbox"/>  Скругление ребра (18)
<input checked="" type="checkbox"/>  Заменить грань (19)
<input checked="" type="checkbox"/>  Обрезка тела (20)

<input checked="" type="checkbox"/>  Скругление ребра (21)
<input checked="" type="checkbox"/>  Эскиз (22) "SKETCH_001"
<input checked="" type="checkbox"/>  Координатная плоскость (23)
<input checked="" type="checkbox"/>  Вращение (24)
<input checked="" type="checkbox"/>  Обрезка тела (25)
<input checked="" type="checkbox"/>  Объединение (26)
<input checked="" type="checkbox"/>  Заменить грань (27)
<input checked="" type="checkbox"/>  Скругление ребра (28)
<input checked="" type="checkbox"/>  Обрезка тела (29)
<input checked="" type="checkbox"/>  Скругление ребра (30)
<input checked="" type="checkbox"/>  Объединение (31)
<input checked="" type="checkbox"/>  Эскиз (32) "SKETCH_004"
<input checked="" type="checkbox"/>  Вращение (33)
<input checked="" type="checkbox"/>  Вытягивание (34)
<input checked="" type="checkbox"/>  Скругление ребра (35)
<input checked="" type="checkbox"/>  Кривые пересечения (36)
<input checked="" type="checkbox"/>  Координатная плоскость (37)
<input checked="" type="checkbox"/>  Разделить тело (38)
<input checked="" type="checkbox"/>  Уклон (39)
<input checked="" type="checkbox"/>  Объединение (40)
<input checked="" type="checkbox"/>  Скругление ребра (41)

<input checked="" type="checkbox"/>  Объединение (42)
<input checked="" type="checkbox"/>  Эскиз (43) "SKETCH_006"
<input checked="" type="checkbox"/>  Вращение (44)
<input checked="" type="checkbox"/>  Геометрия массива (45)
<input checked="" type="checkbox"/>  Геометрия массива (46)
<input checked="" type="checkbox"/>  Геометрия массива (47)
<input checked="" type="checkbox"/>  Обрезка тела (48)
<input checked="" type="checkbox"/>  Вращение (49)
<input checked="" type="checkbox"/>  Скругление ребра (50)
<input checked="" type="checkbox"/>  Координатная плоскость (51)
<input checked="" type="checkbox"/>  Эскиз (52) "SKETCH_007"
<input checked="" type="checkbox"/>  Эскиз (53) "SKETCH_008"
<input checked="" type="checkbox"/>  Кривые пересечения (54)
<input checked="" type="checkbox"/>  Координатная плоскость (55)
<input checked="" type="checkbox"/>  Эскиз (56) "SKETCH_009"
<input checked="" type="checkbox"/>  Отрезок (57)
<input checked="" type="checkbox"/>  Отрезок (58)
<input checked="" type="checkbox"/>  Отрезок (59)
<input checked="" type="checkbox"/>  Геометрия массива (60)
<input checked="" type="checkbox"/>  Заметание (61)
<input checked="" type="checkbox"/>  Координатная плоскость (62)

<input checked="" type="checkbox"/>  Эскиз (63) "SKETCH_010"
<input checked="" type="checkbox"/>  Геометрия массива (64)
<input checked="" type="checkbox"/>  Кривые пересечения (65)
<input checked="" type="checkbox"/>  Отрезок (66)
<input checked="" type="checkbox"/>  Отрезок (67)
<input checked="" type="checkbox"/>  Заметание (68)
<input checked="" type="checkbox"/>  Координатная плоскость (69)
<input checked="" type="checkbox"/>  Эскиз (70) "SKETCH_011"
<input checked="" type="checkbox"/>  Геометрия массива (71)
<input checked="" type="checkbox"/>  Кривые пересечения (72)
<input checked="" type="checkbox"/>  Геометрия массива (73)
<input checked="" type="checkbox"/>  Отрезок (74)
<input checked="" type="checkbox"/>  Отрезок (75)
<input checked="" type="checkbox"/>  Заметание (76)
<input checked="" type="checkbox"/>  Координатная плоскость (77)
<input checked="" type="checkbox"/>  Эскиз (78) "SKETCH_012"
<input checked="" type="checkbox"/>  Кривые пересечения (79)
<input checked="" type="checkbox"/>  Отрезок (80)
<input checked="" type="checkbox"/>  Отрезок (81)
<input checked="" type="checkbox"/>  Геометрия массива (82)
<input checked="" type="checkbox"/>  Заметание (83)

-  Обрезка тела (84)
-  Геометрия массива (85)
-  Координатная плоскость (86)
-  Эскиз (87) "SKETCH\_013"
-  Геометрия массива (88)
-  Кривые пересечения (89)
-  Отрезок (90)
-  Отрезок (91)
-  Заметание (92)
-  Объединение (93)
-  Обрезка тела (94)
-  Объединение (95)
-  Вращение (96)
-  Координатная плоскость (97)
-  Эскиз (98) "SKETCH\_015"
-  Вытягивание (99)
-  Геометрия массива (100)
-  Вытягивание (101)
-  Вытягивание (102)
-  Объединение (103)
-  Скругление ребра (104)

-  Скругление ребра (105)
-  Скругление поверхностей (106)
-  Скругление поверхностей (107)
-  Скругление поверхностей (108)
-  Скругление поверхностей (109)
-  Координатная плоскость (110)
-  Координатная плоскость (111)
-  Координатная плоскость (112)
-  Эскиз (113) "SKETCH\_016"
-  Координатная плоскость (114)
-  Координатная плоскость (115)
-  Вытягивание (116)
-  Обрезка тела (117)
-  Вытягивание (118)
-  Обрезка тела (119)
-  Объединение (120)
-  Простое отверстие (121)
-  Вытягивание (122)
-  Вытягивание (123)
-  Геометрия массива (124)
-  Геометрия массива (125)

-  Вычитание (126)
-  Объединение (127)
-  Смещение области (128)
-  Вычитание (129)
-  Вычитание (130)
-  Вычитание (131)
-  Объединение (132)
-  Вытягивание (133)
-  Вытягивание (134)
-  Геометрия массива (135)
-  Геометрия массива (136)
-  Объединение (137)
-  Вычитание (138)
-  Заменить грань (139)
-  Заменить грань (140)
-  Эскиз (141) "SKETCH\_023"
-  Вытягивание (142)
-  Обрезка тела (143)
-  Геометрия массива (144)
-  Объединение (145)
-  Эскиз (146) "SKETCH\_024"

-  Вытягивание (147)
-  Геометрия массива (148)
-  Объединение (149)
-  Вытягивание (150)
-  Геометрия массива (151)
-  Объединение (152)
-  Скругление ребра (153)
-  Эскиз (154) "SKETCH\_026"
-  Геометрия массива (155)
-  Координатная плоскость (156)
-  Вытягивание (157)
-  Обрезка тела (158)
-  Геометрия массива (159)
-  Геометрия массива (160)
-  Геометрия массива (161)
-  Удалить грань (162)
-  Удалить грань (163)
-  Объединение (164)
-  Координатная плоскость (165)
-  Вытягивание (166)
-  Эскиз (167) "SKETCH\_029"

<input checked="" type="checkbox"/>  Вытягивание (168)
<input checked="" type="checkbox"/>  Скругление ребра (169)
<input checked="" type="checkbox"/>  Объединение (170)
<input checked="" type="checkbox"/>  Координатная плоскость (171)
<input checked="" type="checkbox"/>  Эскиз (172) "SKETCH_030"
<input checked="" type="checkbox"/>  Координатная плоскость (173)
<input checked="" type="checkbox"/>  Координатная плоскость (174)
<input checked="" type="checkbox"/>  Эскиз (175) "SKETCH_032"
<input checked="" type="checkbox"/>  Координатная плоскость (176)
<input checked="" type="checkbox"/>  Эскиз (177) "SKETCH_031"
<input checked="" type="checkbox"/>  Эскиз (178) "SKETCH_033"
<input checked="" type="checkbox"/>  По кривым (179)
<input checked="" type="checkbox"/>  Смещение поверхности (180)
<input checked="" type="checkbox"/>  Смещение поверхности (181)
<input checked="" type="checkbox"/>  Смещение поверхности (182)
<input checked="" type="checkbox"/>  Смещение поверхности (183)
<input checked="" type="checkbox"/>  Обрезка и расширение (184)
<input checked="" type="checkbox"/>  Обрезка и расширение (185)
<input checked="" type="checkbox"/>  Обрезка и расширение (186)
<input checked="" type="checkbox"/>  Обрезка и расширение (187)
<input checked="" type="checkbox"/>  Координатная плоскость (188)
<input checked="" type="checkbox"/>  Обрезка тела (189)
<input checked="" type="checkbox"/>  Ограниченная плоскость (190)
<input checked="" type="checkbox"/>  Ограниченная плоскость (191)
<input checked="" type="checkbox"/>  Сшивка (192)
<input checked="" type="checkbox"/>  Скругление ребра (193)
<input checked="" type="checkbox"/>  Скругление ребра (194)
<input checked="" type="checkbox"/>  Объединение (195)
<input checked="" type="checkbox"/>  Координатная плоскость (196)
<input checked="" type="checkbox"/>  Эскиз (197) "SKETCH_034"
<input checked="" type="checkbox"/>  Координатная плоскость (198)
<input checked="" type="checkbox"/>  Эскиз (199) "SKETCH_035"
<input checked="" type="checkbox"/>  Координатная плоскость (200)
<input checked="" type="checkbox"/>  Эскиз (201) "SKETCH_036"
<input checked="" type="checkbox"/>  По кривым (202)
<input checked="" type="checkbox"/>  Скругление ребра (203)
<input checked="" type="checkbox"/>  Скругление ребра (204)
<input checked="" type="checkbox"/>  Смещение области (205)
<input checked="" type="checkbox"/>  Обрезка тела (206)
<input checked="" type="checkbox"/>  Геометрия массива (207)
<input checked="" type="checkbox"/>  Объединение (208)
<input checked="" type="checkbox"/>  Вытягивание (209)

<input checked="" type="checkbox"/>  Скругление ребра (210)
<input checked="" type="checkbox"/>  Объединение (211)
<input checked="" type="checkbox"/>  Скругление ребра (212)
<input checked="" type="checkbox"/>  Простое отверстие (213)
<input checked="" type="checkbox"/>  Вращение (214)
<input checked="" type="checkbox"/>  Простое отверстие (215)
<input checked="" type="checkbox"/>  Вращение (216)
<input checked="" type="checkbox"/>  Координатная плоскость (217)
<input checked="" type="checkbox"/>  Вращение (218)
<input checked="" type="checkbox"/>  Скругление ребра (219)
<input checked="" type="checkbox"/>  Заменить грань (220)
<input checked="" type="checkbox"/>  Заменить грань (221)
<input checked="" type="checkbox"/>  Эскиз (222) "SKETCH_041"
<input checked="" type="checkbox"/>  Эскиз (223) "SKETCH_042"
<input checked="" type="checkbox"/>  Проецированная кривая (224)
<input checked="" type="checkbox"/>  Эскиз (225) "SKETCH_043"
<input checked="" type="checkbox"/>  Вращение (226)
<input checked="" type="checkbox"/>  Координатная плоскость (227)
<input checked="" type="checkbox"/>  Координатная плоскость (228)
<input checked="" type="checkbox"/>  Разделить тело (229)
<input checked="" type="checkbox"/>  Координатная плоскость (230)
<input checked="" type="checkbox"/>  Обрезка тела (231)
<input checked="" type="checkbox"/>  Объединение (232)
<input checked="" type="checkbox"/>  Заметание (233)
<input checked="" type="checkbox"/>  Обрезка и расширение (234)
<input checked="" type="checkbox"/>  Обрезка тела (235)
<input checked="" type="checkbox"/>  Кривые пересечения (236)
<input checked="" type="checkbox"/>  Эскиз (237) "SKETCH_044"
<input checked="" type="checkbox"/>  Проецированная кривая (238)
<input checked="" type="checkbox"/>  Удалить грань (239)
<input checked="" type="checkbox"/>  Заметание (240)
<input checked="" type="checkbox"/>  Обрезка и расширение (241)
<input checked="" type="checkbox"/>  Обрезка тела (242)
<input checked="" type="checkbox"/>  Заметание (243)
<input checked="" type="checkbox"/>  Обрезка и расширение (244)
<input checked="" type="checkbox"/>  Вытягивание (245)
<input checked="" type="checkbox"/>  Смещение поверхности (246)
<input checked="" type="checkbox"/>  Смещение поверхности (247)
<input checked="" type="checkbox"/>  Обрезка поверхности (248)
<input checked="" type="checkbox"/>  Обрезка тела (249)
<input checked="" type="checkbox"/>  Обрезка тела (250)
<input checked="" type="checkbox"/>  Обрезка тела (251)

Сшивка (252)	
Вытягивание (253)	
Обрезка тела (254)	
Объединение (255)	
Скругление ребра (256)	
Скругление ребра (257)	
Вычитание (258)	
Скругление ребра (259)	
Эскиз (260) "SKETCH_045"	
Вращение (261)	
Скругление ребра (262)	
Координатная плоскость (263)	
Эскиз (264) "SKETCH_046"	
Координатная плоскость (265)	
Обрезка тела (266)	
Проецированная кривая (267)	
Координатная плоскость (268)	
Обрезка тела (269)	
Эскиз (270) "SKETCH_047"	
Координатная плоскость (271)	
Обрезка тела (272)	
Эскиз (273) "SKETCH_048"	
Проецированная кривая (274)	
Координатная плоскость (275)	
Координатная плоскость (276)	
Обрезка тела (277)	
Скругление ребра (278)	
Геометрия массива (279)	
Вычитание (280)	
Эскиз (281) "SKETCH_049"	
Вращение (282)	
Скругление ребра (283)	
Координатная плоскость (284)	
Обрезка тела (285)	
Эскиз (286) "SKETCH_050"	
Проецированная кривая (287)	
Координатная плоскость (288)	
Координатная плоскость (289)	
Обрезка тела (290)	
Координатная плоскость (291)	
Координатная плоскость (292)	
Координатная плоскость (293)	

Эскиз (294) "SKETCH_051"
Координатная плоскость (295)
Смещение области (296)
Геометрия массива (297)
Обрезка тела (298)
Обрезка тела (299)
Эскиз (300) "SKETCH_052"
Координатная плоскость (301)
Обрезка тела (302)
Геометрия массива (303)
Обрезка тела (304)
Скругление ребра (305)
Вытягивание (306)
Вычитание (307)
Эскиз (308) "SKETCH_054"
Вращение (309)
Вытягивание (310)
Объединение (311)
Удалить грань (312)
Заменить грань (313)
Скругление ребра (314)
Скругление ребра (315)
Эскиз (316) "SKETCH_056"
Вытягивание (317)
Смещение области (318)
Обрезка тела (319)
Объединение (320)
Скругление ребра (321)
Скругление ребра (322)
Эскиз (323) "SKETCH_057"
Вращение (324)
Вращение (325)
Удалить грань (326)
Вращение (327)
Обрезка и расширение (328)
Обрезка тела (329)
Вращение (330)
Вращение (331)
Эскиз (332) "SKETCH_058"
Обрезка тела (333)
Обрезка тела (334)
Обрезка тела (335)

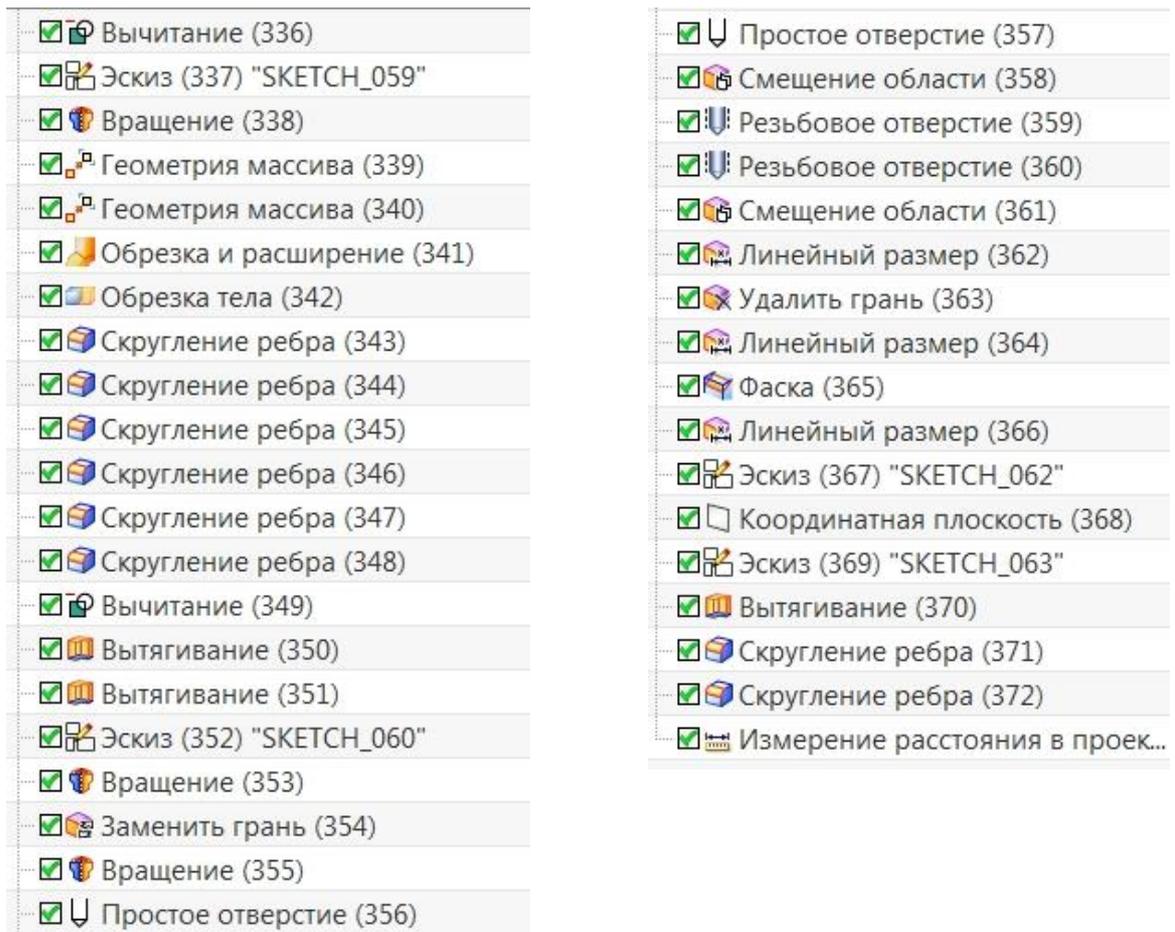
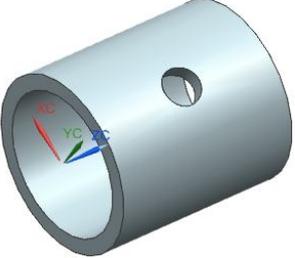
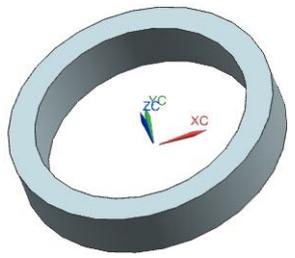
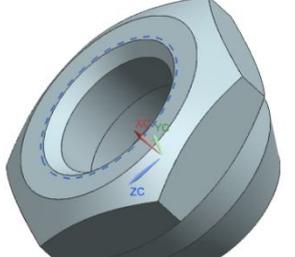
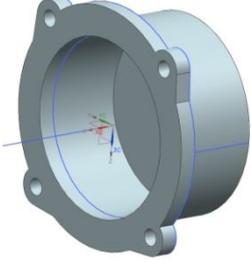
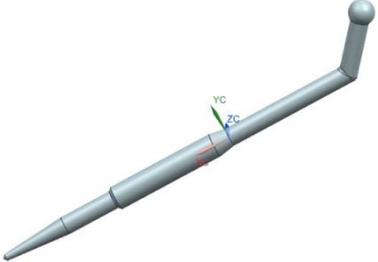


Рис. 2.73 - Древо построения картера

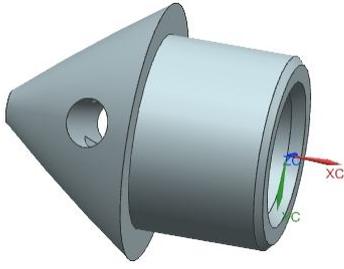
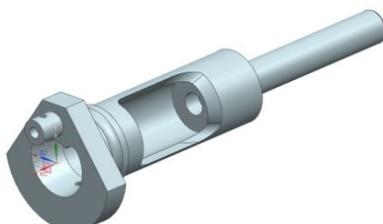
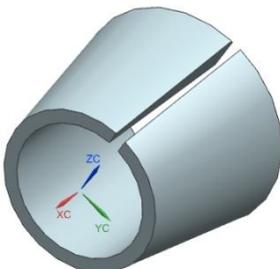
Табл. 2.1 - Структура моделей деталей двигателя

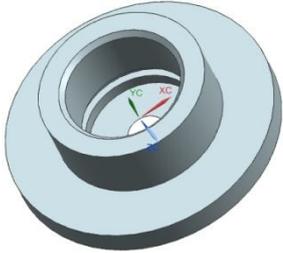
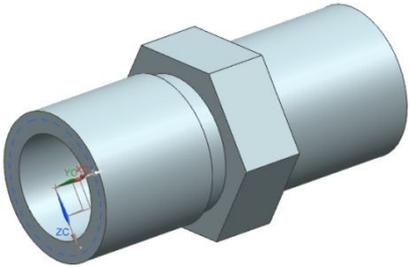
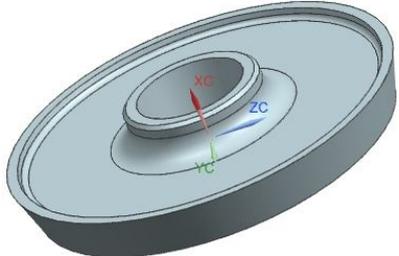
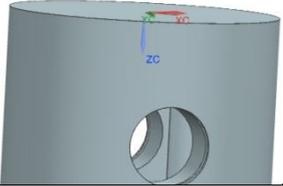
№	Деталь		Структура модели		
1	<b>Верхняя втулка</b>		1	Вытягивание 	
	Шифр		2	Вытягивание 	
	Операций	2			
	Ключевая				
	Доп. геометрия*	0			
	Массивов	0			
	Резьб	0			
2	<b>Втулка ПК передняя</b>				
	Шифр				
	Операций	1	1	Вытягивание 	
	Ключевая				
	Доп. геометрия*	0			
	Массивов	0			
	Резьб	0			
3	<b>Гайка фиксирующая</b>				
	Шифр		1	Вытягивание 	
	Операций	4	2	Вращение 	
	Ключевая		3	Вращение 	
	Доп. геометрия*	1	4	Вращение 	
	Массивов	0			
	Резьб	1			
4	<b>Гильза</b>		1	Вращение 	
	Шифр		2	Зеркальный элемент 	
	Операций	6	3	Вращение 	
	Ключевая		4	Вращение 	
	Доп. геометрия*	4	5	Вращение 	
	Массивов	1	6	Вращение 	
	Резьб	0			
5	<b>Держатель свечи</b>		1	Вытягивание 	

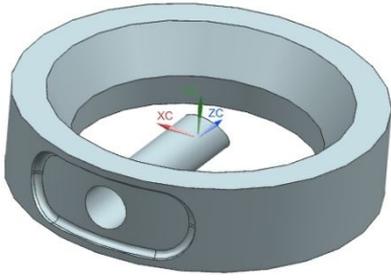
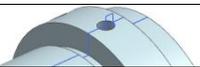
	Шифр		2	Круговой массив 		
	Операций	2				
	Ключевая					
	Доп. геометрия*	3				
	Массивов	1				
	Резьб	1				
6	<b>Задняя крышка</b>		1	Вращение 		
	Шифр		2	Вытягивание 		
	Операций	2				
	Ключевая					
	Доп. геометрия*	0				
	Массивов	0				
	Резьб	0				
7	<b>Игла</b>		1	Вращение 		
	Шифр		2	Заметание вдоль направляющей 		
	Операций	4				
	Ключевая		3	Вращение 		
	Доп. геометрия*	3	4	Объединение		
	Массивов	0				
	Резьб	1				
8	<b>Картер</b>		1	Вращение 	75	Зеркальный массив 
	Шифр		2	Вращение 	76	Зеркальный массив 
	Операций	147	3	Вращение 	77	Массив 
	Ключевая		4	Обрезка тела 	78	Объединение  {164}
	Скруглений	45	5	Объединение 	79	Вытягивание 
	Фасок	0	6	Обрезка тела 	80	Вытягивание 
	Коорд. плоскостей	45	7	Объединение 	81	Объединение  {170}
	Кривых пересеч.	9	8	Вращение 	82	Обрезка тела 
	Проекц. кривых	5	9	Вытягивание 	83	Объединение  {195}
	Простых отверстий	5	10	Разделить тело 	84	Обрезка тела 
	Резьб. отверстий	2	11	Уклон 	85	Зеркальный массив 

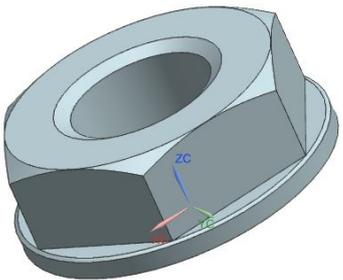
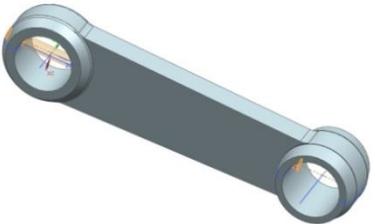
	Эскизов	45	12	Объединение 	86	Объединение 
	Огран. плоскостей	2	13	Объединение 	87	Вытягивание 
			14	Вращение 	88	Объединение 
			15	Линейный массив 	89	Вращение  {214}
			16	Линейный массив 	90	Вращение 
			17	Линейный массив 	91	Вращение 
			18	Обрезка тела 	92	Вращение  {226}
			19	Вращение 	93	Разделить тело 
			20	Массив 	94	Обрезка тела 
			21	Заметание 	95	Объединение  {232}
			22	Массив 	96	Заметание 
			23	Заметание 	97	Обрезка тела 
			24	Массив  {71}	98	Обрезка тела 
			25	Массив  {73}	99	Заметание 
			26	Заметание  {76}	100	Вытягивание  {253}
			27	Массив  {82}	101	Обрезка тела 
			28	Заметание 	102	Объединение 
			29	Обрезка тела 	103	Вычитание 
			30	Массив  {85}	104	Вращение  {261}
			31	Массив  {88}	105	Обрезка тела 
			32	Заметание  {92}	106	Обрезка тела 
			33	Объединение 	107	Обрезка тела 
			34	Обрезка тела 	108	Обрезка тела  {277}
			35	Объединение 	109	Зеркальный массив 
			36	Вращение  {96}	110	Вычитание 
			37	Вытягивание  {99}	111	Вращение  {282}
			38	Массив  {100}	112	Обрезка тела 
			39	Вытягивание 	113	Обрезка тела 
			40	Вытягивание 	114	Зеркальный массив 
			41	Объединение 	115	Обрезка тела 

			42	Вытягивание  {116}	116	Обрезка тела 
			43	Обрезка тела  {117}	117	Обрезка тела 
			44	Вытягивание 	118	Зеркальный массив 
			45	Обрезка тела 	119	Обрезка тела 
			46	Объединение 	120	Вытягивание  {306}
			47	Вытягивание 	121	Вычитание 
			48	Зеркальный массив 	122	Вращение  {309}
			49	Зеркальный массив 	123	Вытягивание 
			50	Вычитание  {126}	124	Объединение 
			51	Объединение 	125	Вытягивание 
			52	Вычитание 	126	Обрезка тела 
			53	Вычитание 	127	Объединение 
			54	Вычитание 	128	Вращение  {324}
			55	Объединение 	129	Вращение 
			56	Вытягивание 	130	Вращение 
			57	Вытягивание  {134}	131	Обрезка тела 
			58	Зеркальный массив 	132	Вращение  {330}
			59	Зеркальный массив 	133	Вращение 
			60	Объединение 	134	Обрезка тела 
			61	Вычитание 	135	Обрезка тела 
			62	Вытягивание 	136	Обрезка тела 
			63	Обрезка тела 	137	Вычитание 
			64	Зеркальный массив 	138	Вращение  {338}
			65	Объединение  {145}	139	Линейный массив  
			66	Вытягивание 	140	Линейный массив  
			67	Массив 	141	Обрезка тела 
			68	Объединение 	142	Вычитание 
			69	Вытягивание  {150}	143	Вытягивание  {350}
			70	Зеркальный массив 	144	Вытягивание 
			71	Объединение 	145	Вращение  {353}

			72	Массив 	146	Вращение 
			73	Вытягивание  {157}	147	Вытягивание  {370}
			74	Обрезка тела 		
9	<b>Кок</b>		1	Вращение 		
	Шифр		2	Вытягивание 		
	Операций	2				
	Ключевая					
	Доп. геометрия*	0				
	Массивов	0				
	Резьб	1				
10	<b>Коленчатый вал</b>		1	Вращение 		
	Шифр		2	Вращение 		
	Операций	6	3	Вращение 		
	Ключевая		4	Вращение 		
	Доп. геометрия*	12	5	Вытягивание 		
	Массивов	0	6	Вытягивание 		
	Резьб	1				
11	<b>Конус</b>		1	Вращение 		
	Шифр		2	Вытягивание 		
	Операций	2				
	Ключевая					
	Доп. геометрия*	0				
	Массивов	0				
	Резьб	0				
12	<b>Корпус жиклёра</b>		1	Вращение 		
	Шифр		2	Вытягивание 		
	Операций	3	3	Вытягивание 		
	Ключевая					
	Доп. геометрия*	0				
	Массивов	0				
	Резьб	2				

13	<b>Модуль камеры сгорания</b>		1	Вращение 🔄	
	Шифр				
	Операций	1			
	Ключевая	🔄			
	Доп. геометрия*	1			
	Массивов	0			
	Резьб	1			
14	<b>Наконечник</b>		1	Вращение 🔄	
	Шифр		2	Вытягивание 📏	
	Операций	3	3	Вращение 🔄	
	Ключевая	🔄			
	Доп. геометрия*	0			
	Массивов	0			
	Резьб	1			
15	<b>Опорная шайба</b>		1	Вращение 🔄	
	Шифр		2	Вращение 🔄	
	Операций	3	3	Круговой массив 🔄 📏	
	Ключевая	🔄			
	Доп. геометрия*	0			
	Массивов	1			
	Резьб	0			
16	<b>Поршень</b>		1	Вытягивание 📏	
	Шифр		2	Вытягивание 📏	
	Операций	6	3	Вытягивание 📏	

	Ключевая		4	Вытягивание 	
	Доп. геометрия*	0	5	Вытягивание 	
	Массивов	0	6	Вытягивание 	
	Резьб	0			
17	<b>Поршневой палец</b>		1	Вращение 	
	Шифр				
	Операций	1			
	Ключевая				
	Доп. геометрия*	0			
	Массивов	0			
	Резьб	0			
18	<b>Расходная шайба</b>		1	Вращение 	
	Шифр		2	Вращение 	
	Операций	5	3	Вытягивание 	
	Ключевая		4	Вытягивание 	
	Доп. геометрия*	4	5	Вращение 	
	Массивов	0			
	Резьб	0			
19	<b>Резонансная труба</b>		1	Вращение 	
	Шифр				
	Операций	1			
	Ключевая				
	Доп. геометрия*	0			
	Массивов	0			
	Резьб	2**			
20	<b>Сопло</b>		1	Вращение 	

	Шифр		2	Вращение 	
	Операций	3	3	Круговой массив 	
	Ключевая				
	Доп. геометрия*	0			
	Массивов	1			
	Резьб	1			
21	<b>Спецгайка</b>		1	Вытягивание 	
	Шифр		2	Вращение 	
	Операций	4	3	Вращение 	
	Ключевая		4	Вытягивание 	
	Доп. геометрия*	2			
	Массивов	0			
	Резьб	1			
22	<b>Шатун</b>		1	Вращение 	
	Шифр		2	Вращение 	
	Операций	5	3	Вытягивание 	
	Ключевая		4	Объединение 	
	Доп. геометрия*	10	5	Вращение 	
	Массивов	0			
	Резьб	0			

\* скругления, фаски, отверстия и т.д.

\*\* резонансная труба делится на три части: на первой и последней по одной резьбе, на средней - две.

### 3 Создание 3D-модели двигателя



Рис. 3.1 - 3D-модель двигателя

После создания САД-моделей отдельных деталей они объединяются в сборку двигателя (см. рис. 3.1) за счёт использования различных сопряжений деталей в сборке 🛠️.

Условия сопряжения – традиционный способ создания сборочных зависимостей. Особенность условий сопряжения заключается в том, что они являются направленными, то есть условие сопряжения зависит в общем случае от порядка выбора геометрии компонентов. Поэтому во избежание ошибок требуется четко соблюдать последовательность сборки, разделять базу и сопрягаемый компонент. Выбираемый первым объект («От») считается принадлежащим сопрягаемому компоненту, выбираемый вторым объект («В») считается принадлежащим базе. Условия сопряжения накладываются на элементы (геометрию) компонентов, при этом стыкуемый компонент обязательно должен быть компонентом сборки, а база – не обязательно (в качестве базы может быть использована, например, координатная плоскость, определенная в файле сборки).

Условия сопряжения необходимо задавать так, чтобы не возникало циклических ссылок. Например, пусть компонент А является базой,

компонент В сопрягается с А и компонент С сопряжен с компонентом В. Если вы попытаетесь задать условие сопряжения между компонентам А и С, то NX выдаст сообщение о недопустимости циклических ссылок – «Вы попытались задать цепочку циклических зависимостей». Однако вы можете задать условие сопряжения между компонентами С и А.

 - выравнивание по касанию. Совмещает два плоских объекта так, чтобы их нормали были сонаправлены. Выбор объектов аналогичен выбору для совмещения. Имеет четыре режима.

«Предпочтение касания» – задает ограничение касания в случае, когда возможно применение выравнивания и касания.

«Касание» – ориентирует объекты так, чтобы нормали их поверхностей были противоположно направленными.

«Выравнивание» ориентирует объекты так, чтобы нормали их поверхностей были сонаправленными.

«Вывод центра/оси» – задает соосность двух цилиндрических или конических граней.

 - концентричность. Соединяет дуговые или эллиптические ребра компонентов так, чтобы их центры совпали и они лежали в одной плоскости (при включении опции «Принять допустимые кривые» в качестве дуг могут быть выбраны объекты, которые в пределах линейного допуска близки к дугам).

 - расстояние. Устанавливает минимальное расстояние между объектами. Выбор объектов аналогичен выбору для сопряжения. После выбора объектов становится активным дополнительное поле ввода «Выражение расстояния». Положительное значение расстояния определяет расстояние совмещения, отрицательное – расстояние выравнивания. Эта связь фиксирует одну линейную и две вращательных степени свободы.

 - фиксация. Фиксирует компонент в текущей позиции. Убирает все степени свободы компонента. Эту связь удобно использовать для позиционирования базового компонента, а также для временной фиксации.

 - параллельно. Делает направляющие векторы двух объектов параллельными. Выбор объектов аналогичен выбору для сопряжения. Эта связь фиксирует одну линейную и две вращательные степени свободы.

 - перпендикулярно. Делает направляющие векторы двух объектов перпендикулярными. Выбор объектов аналогичен выбору для сопряжения. Эта связь фиксирует одну линейную и две вращательные степени свободы.

 - совмещение. Совмещает два плоских объекта так, чтобы их нормали были противоположно направлены. Требуется выбрать два объекта: «От» – объект на совмещаемом компоненте, «В» – объект на базовом компоненте. Сопряжение можно использовать и для задания соосности, однако в этом случае радиусы осей должны быть равны. Эта связь фиксирует одну линейную и две вращательных степени свободы.

 - соединение. Жестко соединяет вместе два компонента, как бы образуя из них единое тело.

 - центр. Часто используемая связь совмещает в себе связи сопряжение и расстояние. Имеет четыре режима:

«1 в 1» – делает соосными два осесимметричных объекта (цилиндрические, конические поверхности);

«1 в 2» – размещает объект между парой базовых объектов так, чтобы расстояние между объектом и каждой из баз было равным;

«2 в 1» – размещает два объекта относительно базового объекта так, чтобы он служил объектом симметрии;

«2 в 2» – размещает пару объектов относительно пары базовых объектов

 - угол. Задает угол между двумя объектами. Доступен режим «Опции угла» (три варианта). Режим «Плоский» требует определения объектов «От», «В» и «Вторая к». Объект «Вторая к» выполняет роль оси, которой должны

быть перпендикулярны объекты «От» и «В», то есть фактически определяет вершину угла. Режим «3D» позволяет задать угол в пространстве, ось отсчета угла в этом случае система NX выбирает сама. Для режимов «Плоский» и «3D» объекты «От» и «В» должны быть одного типа. Режим «Ориентация» позволяет задавать угол между объектами различного типа. Для использования этого режима требуется, чтобы между компонентами существовало условие «Сопряжение», которое определяет ориентацию компонентов. Эта связь фиксирует одну линейную и две вращательные степени свободы.

Перед тем как применить ограничения, положение детали в сборке можно перемещать инструментом "Перемещение в сборке" , например для общей оценки компоновки. Также перед добавлением сопряжений  в сборку может возникнуть необходимость их определённого размещения для правильного толкования NX граничных условий сопряжения  (например, развернуть болт шляпкой наружу, а не внутрь). После добавления сопряжений  инструмент перемещения в сборке  позволяет смещать детали только относительно незапрещённых сопряжениями  направлений. Добавлять детали в сборку можно с помощью инструмента .

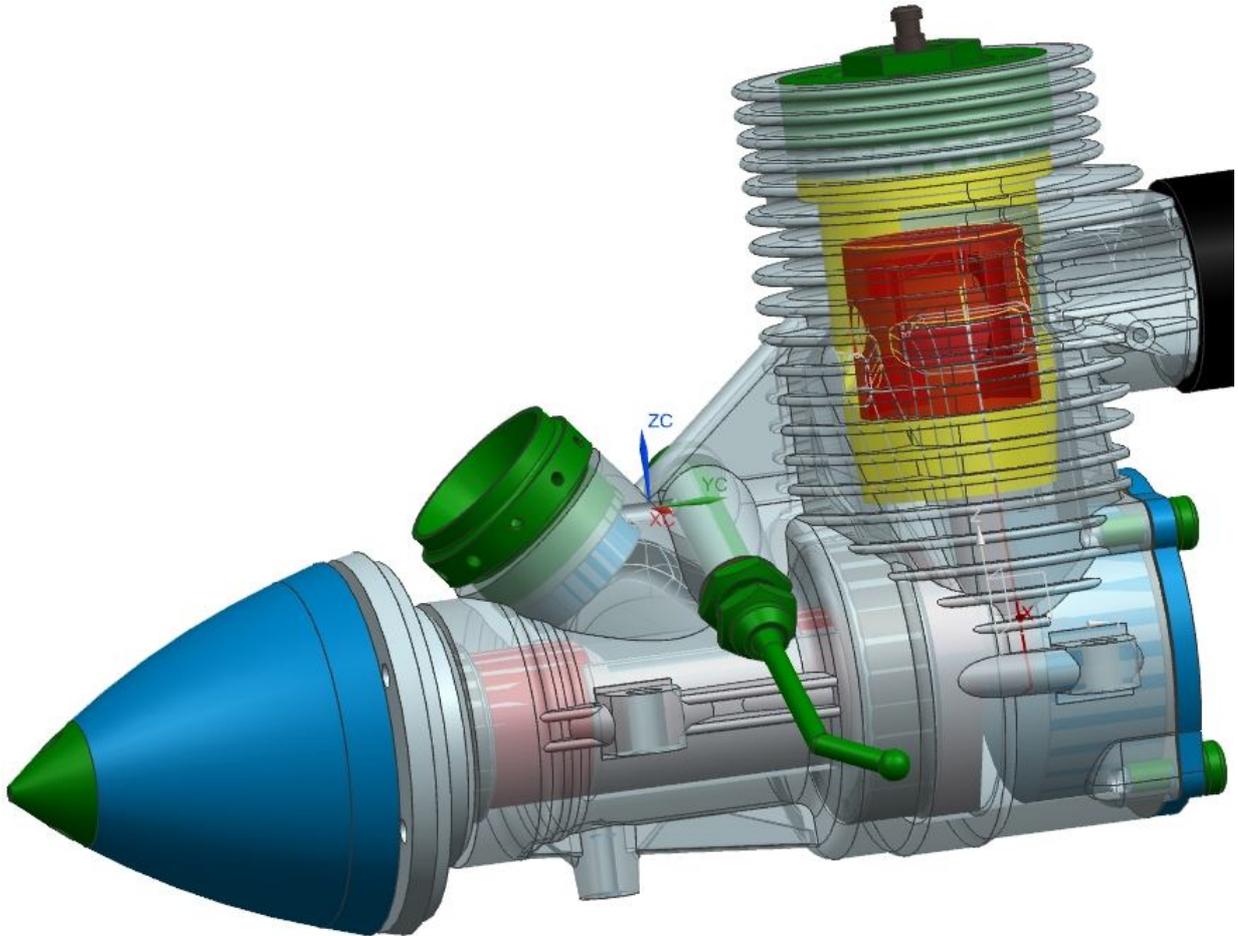


Рис. 3.2 - 3D-модель двигателя без резонаторной трубы

Для создания модели (см. рис. 3.2) использовался модульный метод или иерархичную сборку, когда сначала создаются под сборки отдельных узлов, которые затем соединяются в другие под сборки более высокого уровня, и так далее, вплоть до сборки готовой модели. Данная имеет ряд преимуществ:

- а) Каждый отдельный модуль может проектировать отдельный конструктор, что существенно ускоряет работу.
- б) Небольшие сборки можно выполнять на компьютерах с незначительным объемом оперативной и графической памяти, а итоговую – на более мощной ЭВМ.
- в) В случае необходимости в отдельные модули легко внести изменения без нарушений структуры всей модели.

г) Структура модели строго упорядочивается, что обуславливает быстрый поиск, легкий и полный доступ к каждой отдельной детали.

Иерархическая структура данной модели показана на рисунке 3.3.



Рис. 3.3 - Иерархическая структура модели двигателя

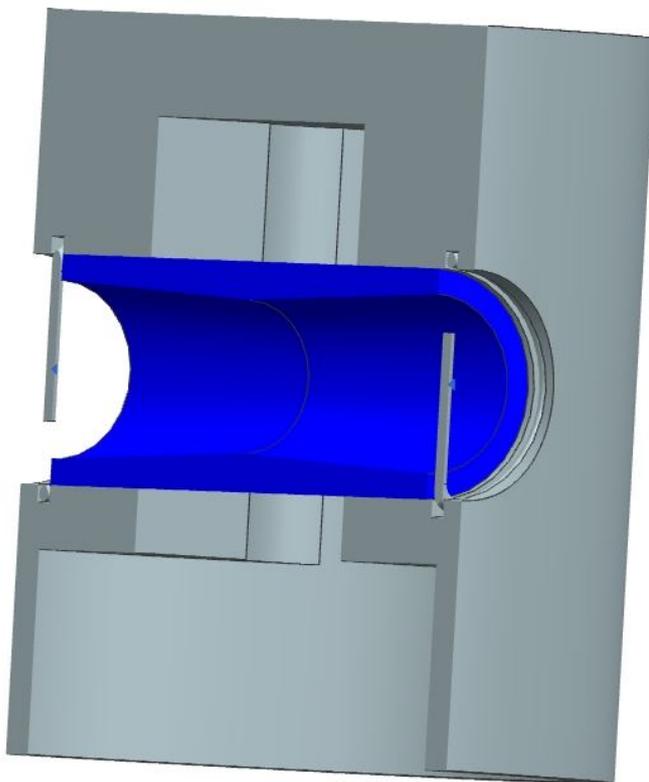


Рис. 3.4 - Поршневая группа

Рассмотрим создание отдельных подборок.

**Поршневая группа** (см. рис. 3.4) состоит из четырех деталей:

1. Поршень
2. Поршневой палец
3. Два стопорных кольца

Поршневой палец и поршень соединяются сопряжением концентричность  $\text{◎}$ , а стопорные кольца устанавливаются в канавках на поршне с помощью сопряжения касание  $\text{||}\text{↔}$ .

**Группа камеры сгорания** (см. рис. 3.5) состоит из пяти деталей:

1. Модуль камеры сгорания
2. Гильза
3. Держатель свечи
4. Свеча

## 5. Специальный винт

Базовой деталью этой сборки является **модуль камеры сгорания**. К нему операцией выравнивания  $\parallel$  пристыковывается снизу гильза, сверху держатель свечи. Затем задаётся из выравнивание  $\parallel$  по наружным поверхностям для обеспечения соосности. Тем же образом (состыковка и соосность), в силу осесимметричности сборки, присоединяются и остальные детали. Для выравнивания свечи относительно **модуля камеры сгорания** используется операция концентричность  $\odot$ .

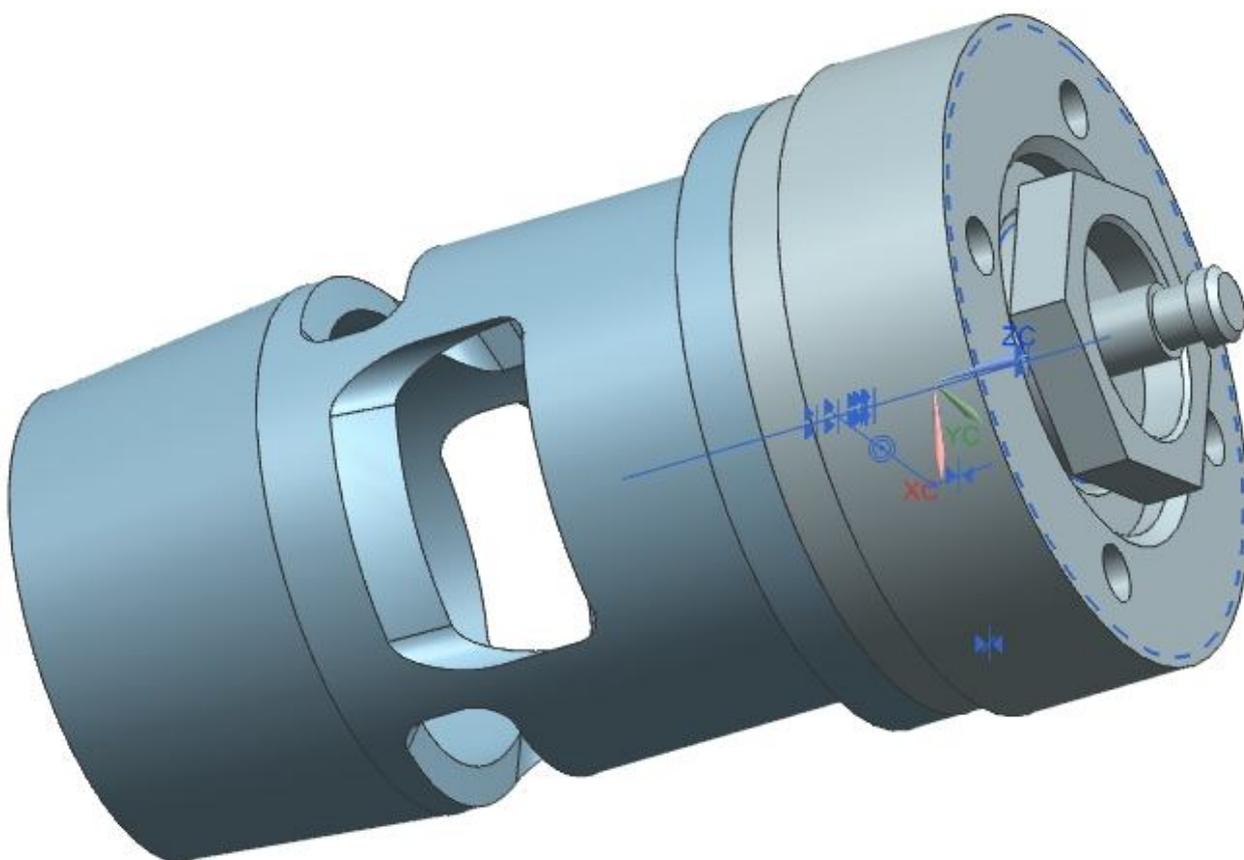


Рис. 3.5 - Группа камеры сгорания

**Шатунная группа** (см. рис. 3.6) состоит из трёх деталей:

1. Шатун
2. Верхняя втулка
3. Нижняя втулка

Нижняя и верхняя втулки устанавливаются в головках шатуна операцией концентричность  $\odot$ , используя для соединения наружные кромки деталей.

**Группа коленчатого вала** (см. рис. 3.7) состоит из 11 деталей:

1. Коленчатый вал
2. Передний подшипник
3. Задний подшипник
4. Прокладка переднего подшипника
5. Конус
6. Пробка коленчатого вала
7. Пробка пальца
8. Воздушный винт
9. Опорная шайба
10. Спецгайка
11. Спецшайба

И одной сборки:

1. Группа кока

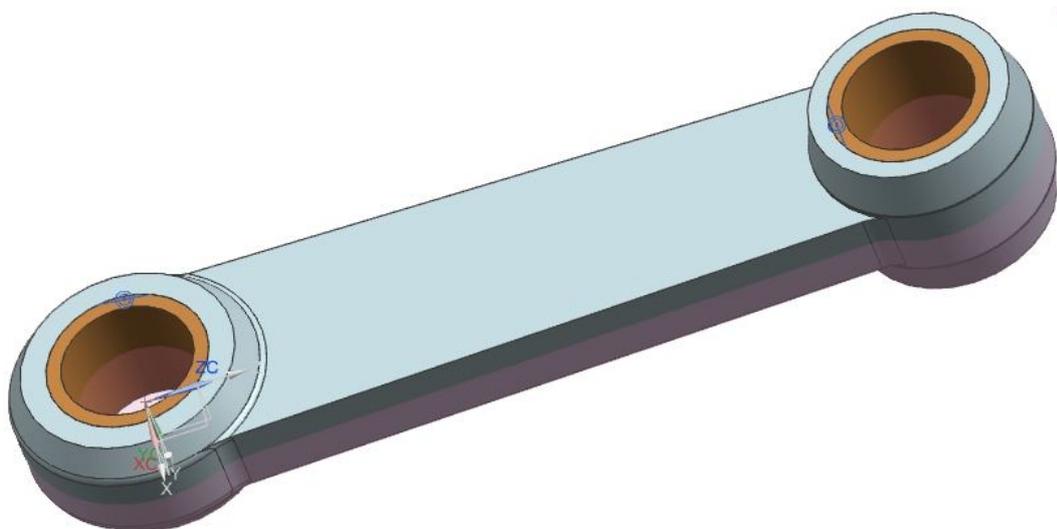


Рис. 3.6 - Шатунная группа

Основной деталью данной сборки является **коленчатый вал**. Основными операциями также являются касание  $\text{||}\text{||}$  и выравнивание  $\text{||}\text{||}$  для сопряжения деталей по торцам и для размещения на валу. С помощью касания соединены  $\text{||}\text{||}$ : втулка винта и опорная шайба, спецгайка и спецшайба, прокладка переднего подшипника и **коленчатый вал**, передний подшипник и **коленчатый вал**, конус и передний подшипник, спецшайба и **коленчатый вал**, воздушный винт и **коленчатый вал**, спецгайка и **коленчатый вал**, подшипник передний и прокладка подшипника переднего, группа кока и шайба опорная.

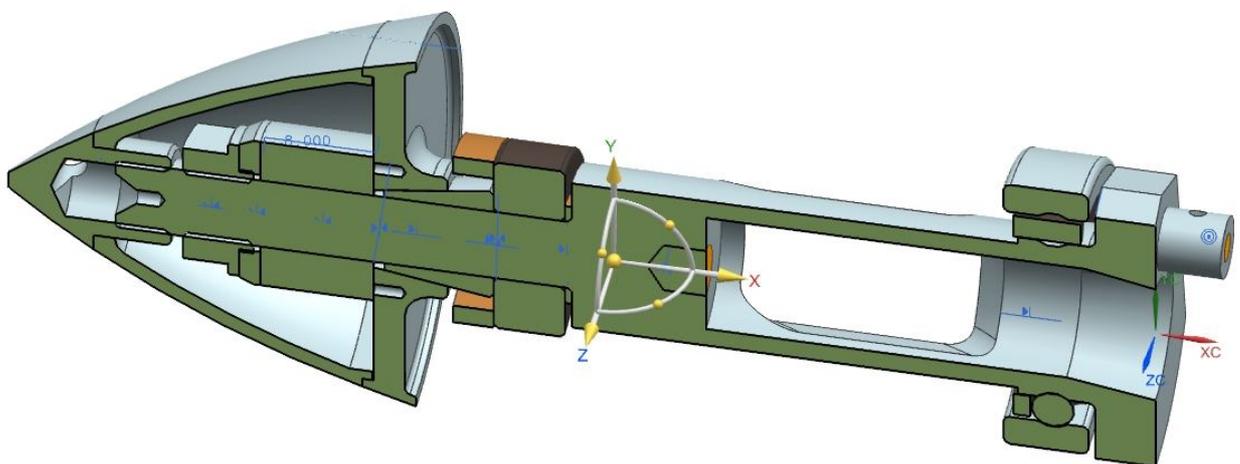


Рис. 3.7 - группа коленчатого вала

Операцией выравнивания  $\text{||}\text{||}$  соединены детали: **коленчатый вал** и прокладка подшипника передняя, задний подшипник и **коленчатый вал**, шайба опорная и конус, конус и **коленчатый вал**.

Для части деталей задано расстояние  $\text{||}\text{||}$  между ними вдоль оси вала: между задним подшипником и щекой **коленчатого вала** есть зазор в 0,5 мм, между опорной шайбой и спецшайбой расстояние 8 мм.

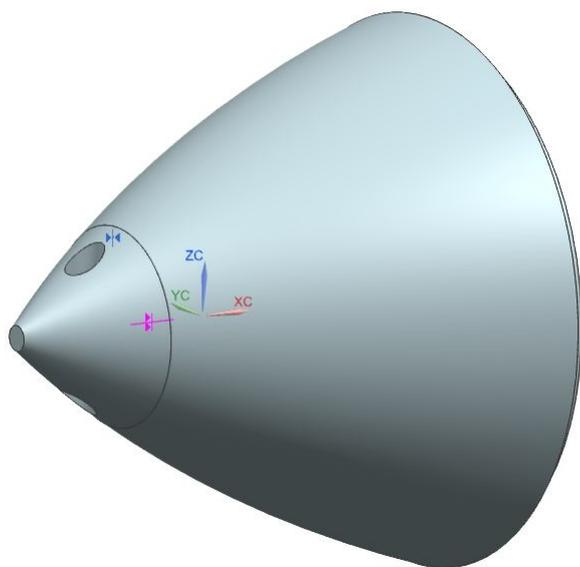


Рис. 3.8 - Группа кока

Для вставки пробки коленчатого вала в отверстие используется операция **концентричность** .

**Группа кока** (см. рис. 3.8) состоит из двух деталей:

1. Кок
2. Обтекатель винта

Между собой они соединяются двумя операциями: **касание**  по кромке соединения и **выравнивание**  по центральному отверстию.

Наконец, в окончательную сборку (см. рис. 3.1), помимо подборок, входят следующие детали:

1. Картер
2. Резонансная труба
3. Силиконовая прокладка резонансной трубы
4. Наконечник резонансной трубы
5. Спецгайка2
6. Сопло
7. Распорная шайба
8. Корпус жиклёра
9. Игла
10. Фиксирующая гайка
11. Латунная гайка
12. Прокладка жиклёра
13. Крышка
14. Прокладка крышки
15. Болты крышки

Основной деталью сборки является картер, хотя зафиксированными элементами  являются группа коленчатого вала и группа камеры сгорания. По сути, в данной сборке содержится корпус с дополнительными элементами, куда в виде отдельных подборок входит кривошипно-шатунный механизм.

Ограничением касание  соединены между собой: группа камеры сгорания и поршневая группа, наконечник и резонансная труба, группа коленчатого вала и **картер**, части резонансной трубы между собой, сопло и распорная шайба, спецгайка2 и группа коленчатого вала, **картер** и резонансная труба, спецгайка2 и **картер**, силиконовая прокладка и **картер**, расходная шайба и **картер**.

Ограничением выравнивания  соединены между собой: латунная гайка и **картер**, группа камеры сгорания и **картер**, группа шатуна и поршневая группа, части резонансной трубы между собой и с наконечником.

Зазор 0,5 мм между верхней головкой шатуна и бобышкой поршня задаётся ограничением расстояние .

Ограничением концентричность  связаны детали: **картер** и силиконовая прокладка, **картер** и группа камеры сгорания, **картер** и корпус жиклёра, сопло и распорная шайба, **картер** и распорная шайба, крышка и её прокладка, **картер** и прокладка жиклёра.

#### 4 Технологии параметризации САД-моделей

Согласно данным мирового лидера в области разработки САД/САМ/САЕ/PLM-решений - компании Parametric Technology Corp. - наиболее общая классификация параметрических САД-систем включает пять основных типов:

1. Системы без параметризации;
2. Системы на базе, так называемых, "умных моделей" (Smart Models);

3. Системы на основе объектно-управляемого моделирования (Objective Driven Design);
4. Системы с моделированием, основанным на базе правил и условий (Rule-Based Design);
5. Системы с открытой расширяемой средой (Open Extensible Environment);

#### **4.1 Системы без параметризации**

В данном случае, система не обладает какими бы то ни было возможностями для параметризации трёхмерной модели. В качестве примера можно привести импортированную из стороннего САД-пакета 3D-геометрию модели.

#### **4.2 Системы на базе "умных моделей"**

Данный уровень параметризации подразумевает, что с помощью инструментария САД-пакета возможно создания некой стандартной геометрии, базирующейся на ряде размеров. Эти размеры одновременно являются параметрами модели. Изменяя размеры можно получить 3D-геометрию нужного типорозмера.

#### **4.3 Системы на основе объектно-управляемого моделирования**

В объектно-управляемой модели, кроме численных параметров, имеются ещё и конструктивные. Простейшим вариантом такой параметризации служит моделирование объекта на основе конструктивных элементов или фичеров (Feature-based modeling) посредством булевых или подобных им операций (Add, Extrude, Revolve и др.)

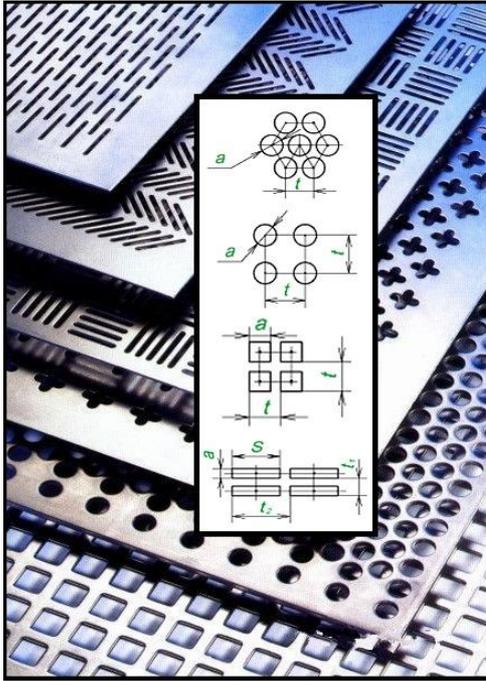


Рис. 4.1. Варианты параметрического задания типа сквозного отверстия

В этом случае возможно управлять формой моделируемого объекта активизацией или исключением из расчёта отдельных конструктивных элементов. То есть, получить варианты 3D-геометрии, отличающиеся не только размерами, но и внешним видом. В более сложном варианте под "объектами" могут пониматься не только относительно простые операции (Extrude, Revolve, Sweep, Shell и др.), но и их более сложные комбинации. Например, такой объект, как "отверстие", в зависимости от параметра, указывающего тип отверстия,

даёт следующие вариации геометрии: рис 4.1.

В качестве ещё одного примера, можно привести методы моделирования, основанные на гибридных техниках (листовой металл, трубопроводы и т.п.), а также различные объекты позволяющие создавать модель из набора технологических операций (фаски, скругления, пазы, проточки, канавки, окна и др.).

#### 4.4 Системы с моделированием, основанным на базе правил и условий

Ещё более сложными и совершенными являются системы параметризации, основанные на технологии управления на базе условий и правил. Следует отметить, что частично данный уровень параметризации обобщает два предыдущих, т.к. размеры тоже можно отнести к неким условиям, а комбинация различных простейших операций в более сложные без задания соответствующих правил не представляется возможной. Однако отличие данного метода заключается в том, что кроме перечисленного, в его

основу заложена и логическая составляющая. Например, логически можно задать взаимосвязи между различными размерами и параметрами, между разными объектами (например, совпадение диаметров сопрягаемых деталей в 3D-модели), тем самым как бы уменьшая размерность пространства параметров. В то же время, с другой стороны, возможно добавлять дополнительную размерность в пространство параметров, позволяя менять не конструктивные составляющие. В качестве примера можно привести классическую логическую цепочку "If-Then-Else".



Рис. 4.2. Параметрические модели на основе правил и условий

Если (If) диаметр болта меньше 5 мм то (Then) вырез под ключ должен быть в форме звездочки, иначе (Else) 5 и более, то вырез под ключ должен быть в форме шестигранника (рис. 4.2). Как видно из примера, проще всего подобный уровень параметризации реализовать на базе исключения из расчета ненужной операции и активации нужной. Что является "размерностью пространства параметров" и отчего она зависит, будет рассмотрено в следующих разделах. Типовыми примерами параметризации на базе условий и правил являются уравнения / выражения (Equation / Expression) и конфигурации / версии (Configuration / Version). Кроме того, к условиям можно отнести и геометрические взаимосвязи в 3D-модели. Следует отметить, что одной из наиболее удобных форм работы со

множественными конфигурациями и версиями 3D-модели являются таблицы (таблицы конфигураций, таблицы параметров и др.).

#### **4.5 Системы с открытой расширяемой средой**

Общий смысл последнего в данной классификации уровня параметризации состоит в том, что в модель, в качестве параметров добавляются такие элементы, которые изначально в её геометрии не планировались. Например, введение в модель каких-то физических условий или непосредственное изменение модели в обход её параметров, или автоматическое модифицирование САД-системой некоторых конструктивных элементов на базе опыта предыдущих подобных разработок (система самостоятельно добавляет на элементы выпускных трубопроводов теплоизоляцию в тех местах, где она подвергается активному термическому воздействию).

Одной из основных проблем применения в моделях параметризации высокого уровня является то, что без использования программирования, четвертый и пятый уровень параметризации больше всего подходят к САД-системам верхнего уровня. К подобным системам относятся программные пакеты Pro-Engineer, Siemens NX, CATIA. Однако и в менее совершенных САД-системах среднего уровня (например, SolidWorks) возможно создавать параметризацию, учитывающую не только геометрические, но и физические параметры без применения программирования. Так, вполне реально создать 3D-сборку КШМ двигателя внутреннего сгорания, которая будет меняться в зависимости от того, какие исходные данные будут поданы на вход (частота оборотов, крутящий момент, ресурс и др.). Но в алгоритме проектирования всегда присутствуют точки принятия решений, поэтому без использования программирования, либо придется увеличивать число параметров, либо в модели всегда будут изменяться одни и те же элементы (например, нельзя

будет поменять тип упрочнения коленвала или выбрать подшипниковые узлы, исходя из грузоподъёмности). Кроме того, уже на четвёртом уровне параметризации САД-системы среднего уровня в значительной степени перегружаются. Так, чтобы применить новые параметры в модели уже недостаточно будет "Обновить" или "Перестроить", необходимо открыть на редактирование все компоненты, включённые в данную сборку. Разумеется, это все равно быстрее, чем "с нуля" создавать всю сборку, но даже перебор ограниченного числа компонентов в значительной мере затрудняет использование в таких САД-системах параметризации высокого уровня.

Таким образом, основной целью параметрического моделирования является увеличение доли автоматизированных работ по модификации существующих и созданию новых конструктивных элементов в модели. Причём, чем сложнее 3D-модель и чем глубже уровень параметризации, тем больше времени необходимо потратить на её создание. По сравнению с обычным моделированием, разница во времени может достигать десятки раз. Однако при этом необходимо помнить важное обстоятельство: если модель полностью параметризована, но для её изменения необходимы специальные навыки и значительное время для обработки, то она не укладывается в общую идею параметризации - упрощение и ускорение процесса проектирования (рис. 4.3). Иными словами, создание параметрической модели - всегда поиск компромиссного оптимального решения.



Рис. 4.3. Пример сборки двигателя, построенной на основе параметрической 3D-модели

В качестве иллюстрации, рассмотрим параметрическую модель КШМ двигателя внутреннего сгорания. На рисунке 4.4 представлены несколько вариантов КШМ, отличающихся конструктивно. Несмотря на очевидное различие, среди них можно выделить наиболее общую схему, которая может менять кинематическую схему.

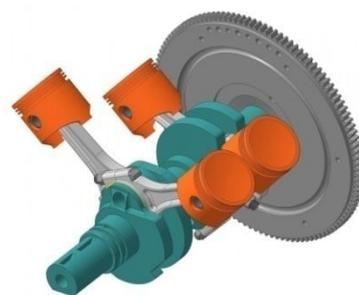


Рис. 4.4. Варианты КШМ для параметрической модели двигателя внутреннего сгорания

Следует отметить, что представленные 3D-модели обладают лишь геометрической параметризацией, т.е. их входные параметры исключительно геометрические - нет значений крутящего момента на валу двигателя, частоты оборотов, ресурс-часов. Не учитываются и не изменяются, к примеру, вид подшипников, тип и конфигурация маховика. Тем не менее, подшипники или маховик тоже имеют свои параметры, которые не зависят от конструктива и также управляют результатом. Например, для маховика это  $B$  - ширина,  $Dв$  – внешний диаметр,  $d$  – диаметр отверстия под коленвал. На рис. 4.5 представлен пример набора параметров для 3D-модели поршня двигателя.

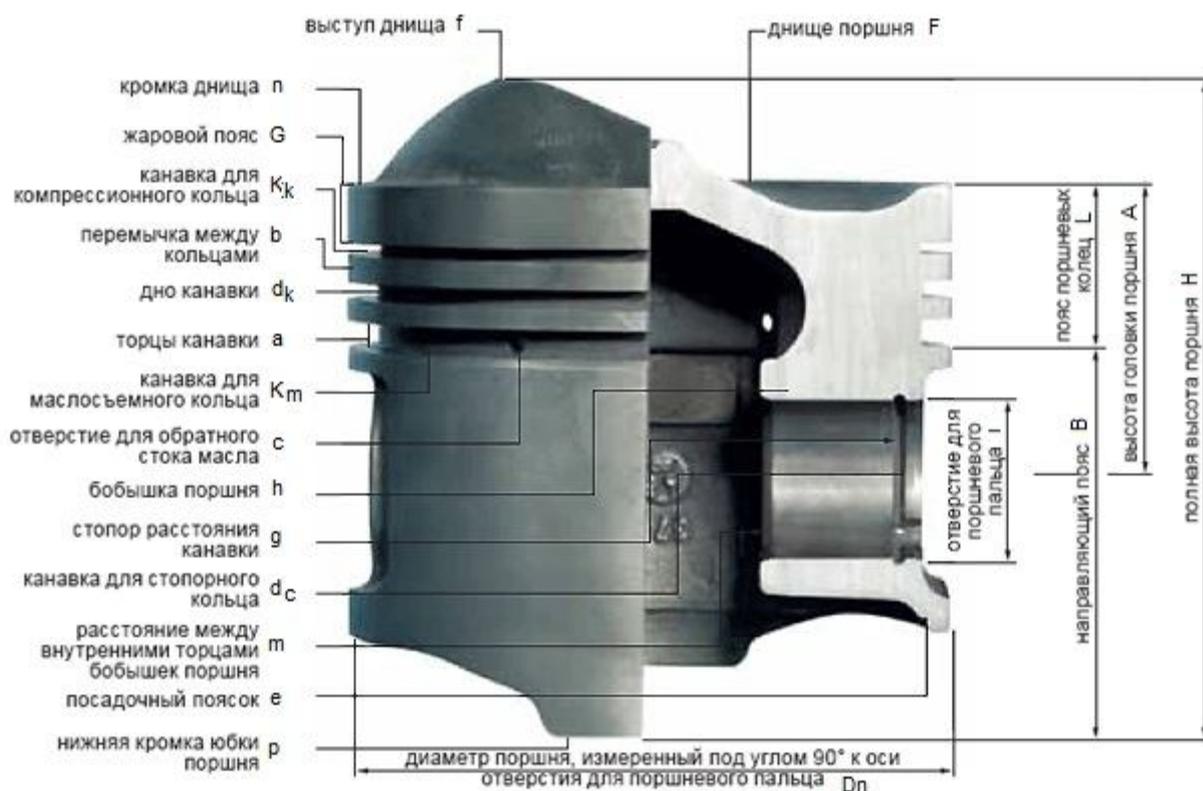


Рис. 4.5. Набор параметров 3D-модели поршня ДВС

Параметры приведены в избытке, по причине того, что большинство из них взаимозаменяемы, а для различных задач удобно использовать различные параметры, следовательно, параметризовать сборку можно с очень высокой степенью детализации.

В табл. 4.1 представлена сводная информация по ориентировочным временным затратам для решения различных инженерных задач на базе параметрических 3D-моделей с разной глубиной параметризации. Несмотря на внушительное время, затрачиваемое проектировщиком на создание качественной параметрической модели, этот процесс имеет смысл и несёт в себе несомненное преимущество.

Таблица 4.1. Затраты времени на решение различных инженерных задач методом создания параметрических 3D-моделей с разной глубиной параметризации

Задача	Время, затрачиваемое на выполнение, мин.					Итого, мин.
	Создание эскиза	Задание взаимосвязей	Применение 3D-операций	Задание материала	Создание КД	
Создание подсорки с параметризацией габаритных и посадочных размеров для дальнейшего включения в сборку более высокого уровня	15	5	5	-	-	25
Создание 3D-модели с параметрическим изменением массово-инерционных характеристик	15	5	5	15	-	40
Создание 3D-модели с геометрической и объектно-управляемой параметризацией с возможностью автоматизированного выпуска конструкторской документации	30	80	90	20	180	400

Согласно статистическим данным [3], на изменение параметров полностью параметризированной 3D-модели (см. задачу №3, табл. 4.1) идёт около 5 минут, при этом перестроение происходит в автоматическом режиме и длится от 15 до 90 минут на генерирование новой модели и выпуск САД-системой конструкторской документации.

#### **4.6 Библиотеки готовых компонентов**

Одним из основных инструментов для параметрического моделирования в современных САД-системах являются разнообразные библиотеки готовых компонентов. В них, в качестве компонентов могут выступать и 3D-детали, и под сборки. Некоторые САД-системы позволяют создавать библиотеки не только из уже полностью готовых компонентов, но и из различных элементов, таких как эскизы, блоки, группы операций (например, шпоночные пазы различной формы) и используются не столько при создании конечной сборки, сколько при создании конкретной детали. Общей чертой всех типов библиотек, является параметричность входящих в её состав моделей (рис. 4.6).



#### 4.7 Обоснование выбора количества параметров в модели

Учитывая значительное время создания параметрических моделей возникает вопрос выбора целесообразного числа параметров, необходимых для описания модели и решающих поставленные перед проектировщиком задачи. В этой связи предлагается дополнить рассмотренную выше классификацию по глубине параметризации разделением моделей по количеству параметров, доступных для изменения:

1. Параметры для изменения не предусмотрены;
2. До 10-15 параметров;
3. 50-80 параметров;
4. До 200 параметров;
5. Более 300 параметров.

Другой вопрос заключается в том, что именно считать параметрами доступными для изменения. Не следует думать, что любую некубическую 3D-модель с количеством деталей 20-50 и количеством размеров более 300, можно считать верхним уровнем параметризации. Размер и параметр суть не одно и то же. В качестве изменяемых необходимо принимать "внешние параметры", которые управляют всей сборкой, а не общее количество внутренних размеров. В общих чертах, согласно предложенной классификации, ко второй группе относятся сборки до 10-20 относительно несложных деталей, к третьей - включающих 100-300 деталей; к четвертой - сборки с количеством около 1000 компонентов; к последней - более 10000 деталей. Так как в сборках обычно присутствует лишь ограниченное число действительно сложных деталей (в процентном отношении), то эти пропорции сохраняются и для 3D-сборок с наличием сложных деталей. Следует отметить, что в данном случае количество параметров выбиралось упрощенно, методом простого подсчета. Например, имеется 3D-модель "Болт" у него существуют два основных изменяемых параметра, у ответной

3D-модели "Гайка" этих параметров тоже два. При связывании в общей сборке этих параметров, из четырех остается два, но всего в модели число внешних параметров принимается равным четырём. Это, так называемое, "полное количество параметров" в модели. Теперь подсчитывая только свободные параметры, оставшиеся после наложения в модели всех связей, общее количество независимых параметров резко сократится. Отсюда отношением количества внешних управляющих параметров сборки к количеству размеров или к количеству полных параметров модели можно определить степень необходимой в той или иной задачи параметризации. При этом необходимо учитывать, что нередко для достаточного описания модели требуется также включать в неё не только параметры, определяющие количество взаимосвязей, управляющих геометрией, но и "физические" параметры, указывающие на принцип работы механизма или изделия.

#### **4.8 Ассоциативность моделей**

В САПР под "ассоциативностью" обычно понимают такую взаимосвязь 2D-чертежа с 3D-моделью, в которой, при внесении изменений в модель, меняется и чертёж. В более широком смысле можно говорить об ассоциативности деталей и сборок, когда при изменении деталей меняются связанные с ними сборки. Это справедливо и для САМ-систем среднего уровня, которые часто встраиваются в САД-пакеты, позволяя системе, при незначительных изменениях геометрии модели, самостоятельно корректировать результирующий код для ЧПУ.

Классифицировать "ассоциативность" можно по четырём основным направлениям:

1. По принципу работы
  - а). Прямая
  - б). Опосредованная

## 2. По направленности

- а). Однонаправленная (все размеры проставляются вручную)
- б). Двухнаправленная (размеры используются с модели)

## 3. По полноте

- а). Только измененная геометрия
- б). Численные параметры
- в). Геометрические взаимосвязи (перпендикулярность, касательность, равенство и др.)
- г). Обобщенные параметры (конструктивные элементы, свойства материала и др.)

## 4. По программной ориентации

- а). Внутри одного приложения
- б). С собственными и сторонними модулями, встроенными в программное приложение
- в). Со сторонними программами

Прямая ассоциативность наблюдается, когда при изменении одних объектов одновременно меняются и взаимосвязанные с ними. Когда для обновления модели необходимо совершить какие-то действия (например, нажать Rebuild Model, Update Parameter, повторно импортировать геометрию и т.п.), то речь идёт об опосредованной ассоциативности. Т.е., прямая ассоциативность отличается от опосредованной только тем, что в первом варианте программа сама "нажимает" на кнопку "Update".

Направленность означает возможность одностороннего или взаимного изменения ассоциативных объектов. Проще всего это демонстрируется на примере 2D-чертежей. Если чертёж меняется в зависимости от изменений 3D-модели, значит имеется ассоциативная связь между моделью и чертежом. Если при этом возможно вносить некоторые изменения на чертеже, и это служит сигналом к автоматическому изменению и модели, то ассоциативность является двухнаправленной (в противном случае -

ассоциативность однонаправленная). Следует заметить, что из наличия в САД-пакетах возможности создания двунаправленной ассоциативности не следует, что всё, что они создадут будет таковым. Т.е. в Pro-Engineer, SolidWorks, Siemens NX, CATIA или КОМПАС вполне можно создать, как ассоциативный чертеж (одно- и двунаправленный), так и полностью автономный по отношению к модели. При этом, отсутствие возможности передачи каких-то параметров и изменений через ассоциативную связь, означает именно полное отсутствие. Однако относительно каких-то переменных параметров может быть прямая двунаправленная ассоциативность, а относительно других вообще может отсутствовать. Именно поэтому и введена классификация относительно того, что именно может изменяться через ассоциативную связь. Самый простой вариант – это передача геометрической информации модели. В этом случае нет необходимости в ручном режиме выполнять операции импорта/экспорта. В случае же, когда передаваться будут различные параметры модели (например, допуски к размерным цепям для САМ-систем, технологические фичеры, массово-инерционные характеристики для САЕ-систем), то здесь и полнота будет уже достаточно большая. В то же время следует отметить, что в настоящее время добиться полной ассоциативности даже внутри одной программы не представляется возможным. Что же касается разных САПР, то здесь встает вопрос о том, какими параметрами можно обмениваться между программами и модулями и каким образом это происходит (XML, INI, API и т.д.). Поэтому и была введена последняя - четвёртая - классификация.

## 4.9 Классификация параметров

Параметры модели можно классифицировать по следующему типу – численные, геометрические, объектные и обобщенные. Также важным моментом является возможность их варьирования.

Как известно из практики проектирования в САД-системах, частью параметров можно управлять напрямую, а частью нельзя, т.к. они получаются на базе других параметров. Последние невозможно изменять непосредственно, хотя и возможно определить. В качестве примера можно привести треугольник, у которого заданы длины всех сторон. Тогда, длины сторон – это управляющие параметры, а углы – управляемые. При этом для указанного треугольника вполне возможно задать сторону и два угла, как управляющие параметры - всё зависит от выбора проектировщика. Таким образом, управляющий параметр - это параметр или размер, который может изменяться пользователем, и сам влиять на другие параметры - управляемые. Управляемый параметр - это параметр, который вычисляется на базе других параметров.

Численные параметры подразделяются:

- а). Континуальные (непрерывные)
- б). Дискретные (например, количество отверстий в детали)
- в). Булевы

Известно, что большинство параметров является численными. При этом они делятся на постоянные и переменные численные параметры. Например, диаметр поршневого пальца. Это переменный параметр, но в текущей сборке, в конкретном месте он не будет изменяться при работе одной сборки - модели КШМ. Параметр может поменяться только при модификации объекта в другой - изменении геометрии КШМ или структурной схемы двигателя. В то же время, если попытаться описать в сборке работу КШМ, то ряд ее объектов будут менять своё положение. Это

положение и является параметром, который может изменяться, без изменения самого сборочного объекта. Следовательно, численные параметры можно разделить ещё на постоянные (текущая геометрия элемента) и переменные (положение элементов в сборке).



Рис. 4.7. Работа компонентов ГРМ 3D-модели  
ДВС в процессе симуляции

Кроме численных параметров, могут быть геометрические. Речь идет о геометрических или кинематических граничных условиях, параллельности, перпендикулярности, концентричности и т.п. В большинстве САД-систем возможно ставить такие взаимосвязи исключительно в эскизах и сборках.

В то же время, в системах с функцией "Direct Modeling" есть возможность устанавливать подобные связи и в 3D-модели.

Таким образом, геометрические параметры объекта могут включать взаимосвязи эскиза, взаимосвязи сборки и взаимосвязи в 3D-модели. В то же время, сама геометрия может быть постоянной или переменной. Примером может служить клапанная пружина в процессе работы двигателя (см. рис. 4.7).

Геометрические параметры:

1. Постоянная геометрия (Constant Parameter)
2. Переменный параметр (Variable Parameter)
3. Переменная "податливая" геометрия (Variable/Soft Geom)

В первом случае геометрия в сборке (клапанная пружина) не претерпевает изменений при работе сборки (движении элементов ГРМ двигателя). Во втором случае, общий конструктив детали сохраняется, но при этом ряд параметров может быть зависимым от других элементов и параметров. В случае с клапанной пружиной – при работе ГРМ меняется её длина. В

последнем случае геометрия объекта может сильно изменяться. В основном, третий вариант геометрических параметров необходим для описания объектов из податливых или гиперупругих материалов, таких как резина, или пластмасса, различных мембран и т.п.

Объектные параметры:

1. Подчиняются определённому закону (например, определение массива отверстий на базе эскиза)

2. Ссылаются на весь объект (деталь, грань, ребро, система кромок)

В первом случае САД-система включает заданную проектировщиком копию в те места модели, где определит наличие точки в эскизе, тем самым создавая массив элементов. При этом, количество точек и их положение на эскизе не важны, главное чтобы присутствовал сам эскиз (или объект, на который происходит привязка). Второй случай хорошо поясняется примером из практики использования популярного САД-пакета Pro-Engineer, когда средствами его инструментария можно задать автоматическое скругление кромок в местах пересечения булевых операций "Extrude" с объёмным телом (например, создание отверстий). Тогда, вне зависимости от конфигураций эскиза, тела и их взаимного положения, система постарается скруглить все элементы модели, подходящие под подобное определение.

Обобщённые параметры:

1. Конфигурации/исполнения

2. Наследственность

Последний классификационный тип включает всё то, что обычно плохо формализуется посредством числового и текстового описания. Например, в качестве обобщённого параметра ДВС можно задать схему газообмена, от которой будет зависеть целый ряд других параметров: форма камеры сгорания, конфигурация гильзы цилиндра, тип системы охлаждения, вид упрочняющей обработки др.

#### 4.10 Принцип инкапсуляции в параметрическом моделировании

Принцип инкапсуляции ("чёрного ящика") заключается в выделении в отдельные блоки основного содержания путём помещения всего второстепенного в некую условную капсулу - "чёрный ящик". Блоки, кроме описания функционала, т.е. геометрии, содержат точки входа и выхода, каждая из которых имеет свои параметры, которые могут быть разного типа. Метод основывается на том, что исходные данные подаются на вход блока, а на его выходе получаем некие результаты, являющиеся, одновременно, исходными данными для другого блока или блоков, которые подаются на его вход. Далее цикл может повторяться  $n$ -ое число раз. Таким образом, реализуется линейная структура. Однако она не всегда может удовлетворить потребности проектировщика. Поэтому, блоки должны согласовываться так, чтобы не было ни недостающих входных параметров, ни лишних выходных. Важно отметить, что при этом должен согласовываться и тип информации, следующей от входа к выходу блока. Для решения этой проблемы часто бывает необходимо создавать дополнительный блок - "переходник" ("преобразователь"). При грамотно построенной подобной схеме можно использовать принцип инкапсуляции на каждом блоке, так как в этом случае не имеет значения, что находится внутри любого из блоков. Главное требование - что бы он исправно функционировал - т. е. принимал нужные исходные данные и выдавал ожидаемые результаты. Основным преимуществом принципа инкапсуляции является то, что в модели можно легко заменить один блок другим с подходящей спецификацией ("спецификация" в данном случае - это описание функционала и входных/выходных параметров) без потери работоспособности модели в целом.

Применительно к 3D-модели ДВС, принцип инкапсуляции будет выглядеть следующим образом. Пусть в качестве исходных данных

выступают: количество стандартных схем поршневых ДВС, количество основных типов коленвалов, шатунов, поршней. Если все эти параметры собрать воедино, то в результате получится более тысячи вариантов двигателя. Тем не менее, несмотря на все различия, например, у тех же поршней практически любых конфигураций есть два схожих элемента - две цилиндрические поверхности. Одна - от поршневого пальца, вторая - от блока цилиндров двигателя. У шатуна - аналогично: одна цилиндрическая поверхность - под поршневой палец, вторая - под коленвал. И так далее. Примечательно, что эти же поверхности отвечают за взаимодействие с другими элементами сборки. А это значит, что если во всех вариантах поршней, коленвалов, шатунов, блоков цилиндров и т.д. будут одинаковые общие элементы (к примеру, в самом начале древа конструирования), при этом, остальные элементы будут просто ссылаться на общие, то итоговая сборка будет не просто меняться при изменении численных параметров, но даже замена одного из её компонентов на другой не вызовет рассогласования в сборке, поскольку элементы, по которым задавались граничные условия (сопряжения) в этом случае не удаляются.

Согласно принципу инкапсуляции, здесь поршень, шатун и прочие элементы выступают в роли блоков - "чёрных ящиков", а общие сопрягаемые элементы являются связями блоков, т.е. входными и выходными параметрами. При этом, как было отмечено выше, не имеет значения, какими конструктивными или иными особенностями обладают указанные детали, если они функционируют с учётом "физики" 3D-модели, т.е. соответствуют спецификации.

#### 4.11 Принцип абстракции в параметрическом моделировании

Умение абстрагироваться и обобщать позволяет решать множество различных, в том числе и инженерных задач, поскольку любую из них возможно привести к набору некоторых типовых ситуаций. Так, создание параметрической 3D-модели ДВС является весьма сложным до тех пор, пока проектировщик не абстрагируется от частностей и не дойдёт до примитивов, лежащих в основе модели. Ведь сама суть геометрической модели - это та или иная степень упрощения исходного физического объекта. В данном случае, результат позволяет получить принцип абстракции, который сводится к тому, что она "разделяет способ использования функции и деталей её реализации в терминах более примитивных функций". Т.е., вместо детализированной 3D-геометрии предлагается использовать её упрощённые аналоги. При этом рекомендуется разнести "взаимосвязи" и геометрию по разным уровням. Например, в программном пакете Pro-Engineer, предлагается для создания подобных функциональных связей использовать поверхностную геометрию, а детали реализовывать в классическом твердотельном подходе на основе имеющейся поверхностной. Это связано с тем, что поверхностная геометрия не имеет объема и массы, она не участвует в булевых операциях как с твердыми телами, так и с поверхностями до тех пор пока проектировщиком не заданы соответствующие операции. Следовательно, привязки не могут потерять функционального значения вследствие удаления исходных объектов ссылки. Во всяком случае, это не так просто. Требуется отметить, что при создании параметрических моделей важно не столько то, как именно будет реализовываться абстракция, сколько то, что бы она вообще присутствовала в 3D-модели. Наиболее простым способом достижения этого является переложение абстракций, созданных для 2D-моделей на основе классификаций, конструктивных схем, ГОСТов, в основу проектируемой 3D-модели.

## 4.12 Принцип наследования в параметрическом моделировании

Любое 3D-моделирование с историей ("history-based modeling") в своей основе имеет отношение "родитель-потомок". Однако здесь существует ряд нюансов. Так, необходимо помнить, что "родителем" в 3D-моделировании может выступать любой объект, а "потомком" не может быть базовая (исходная) система координат. Что касается точки центра основной системы координат, трёх координатных осей и базовых плоскостей, то следует отметить, некоторые системы не имеют базовых осей, а некоторые "считают", что базовые плоскости и точка центра основной системы координат являются "потомками" базовой системы координат.

Если объект является "родителем", то количество его "потомков" должно быть отличным от нуля. Соответственно, если объект является "потомком", то он должен иметь не менее одного "родителя" (прямого). При этом, "родителей" может быть сколь угодно, вплоть до базовой системы координат. Отсюда можно сделать вывод, что один и тот же объект может выступать и "родителем", и "потомком" одновременно. При этом, он может породить множество ветвей "потомков", как напрямую самостоятельно, так и опосредовано - через "потомков". Так, в процессе проектирования образуется "генеалогическое древо" 3D-модели.

Одним из важных свойств наследственных отношений в модели является правило, что "потомок" не может быть "родителем" своего "родителя". Несмотря на то, что некоторые САD-пакеты и позволяют пользователю обойти это правило, записав параметрическое уравнение, расстановкой ссылки более ранних размеров на более поздние, но обычно это приводит к тому, что программный структурный верификатор перестает воспринимать такую 3D-модель завершённой при любом количестве регенераций, что не позволяет закончить её создание. Поэтому мощность и удобство инструментария наложения и отслеживания взаимосвязей и

отношений "родитель-потомок", во многом определяет то, насколько сложный объект возможно параметризовать в той или иной CAD-системе.

Принцип наследования в CAD-системах предусматривает следующую модель поведения: в большинстве CAD-пакетов можно сохранить текущий файл со всеми его настройками, системами единиц, созданными параметрами, чертёжными форматами и символами (в случае 2D-чертежа) и созданной 3D-геометрией (в случае файла модели) в качестве шаблона. Далее этот шаблон возможно использовать в последующих работах. Т.е., для объектов, чье концептуальное представление известно, создаются подобные шаблоны, которые используются при начале новых работ. При этом, внешние ссылки организованы между разными концептами, а внутри модели всё ссылается на текущий концепт. В этом и будет заключаться принцип наследования в параметрическом моделировании.

## **5 Параметризация деталей двигателя**

Согласно изложенному, можно выделить три уровня глубины параметризации:

1. Когда для каждого уникального параметра в модели задаётся отдельная переменная, после чего они сводятся в таблицу параметров. Данный метод даёт наименьший выигрыш по сравнению с непараметризованной моделью лишь за счёт централизованного изменения параметров, поскольку при необходимости изменения модели все параметры должны быть предварительно рассчитаны и по-отдельности изменены.
2. Когда выделяются независимые (главные) и зависимые (вспомогательные) параметры. Значения зависимых параметров вычисляется по выражениям, заданным на этапе параметризации, либо вычисляется программой на основе заданных геометрических ограничений (свободные размеры). Чем меньше независимых параметров, тем сложнее параметризация в виду

необходимости определять функциональные связи между параметрами, для чего могут потребоваться глубокие знания процессов (физических, химических и т.д.), происходящих в двигателе, необходимость учёта влияния изменений на прочность, технологичность и т.д.

3. Когда целевыми функциями являются интегральные характеристики двигателя: мощность, крутящий момент, расход топлива, масса. Здесь мы выходим собственно за рамки геометрической параметризации и данного учебного пособия. Для двигателя в целом может быть осуществлена лишь частично, используя комплекс моделей в рамках концепции "виртуального двигателя" в силу необходимости совмещения в одной модели всех процессов, происходящих в двигателе, для обеспечения которых и создаётся параметризуемая геометрия.

Далее будем рассматривать второй и частично третий уровень глубины параметризации. Таким образом, в параметрической модели должны быть выбраны зависимые и независимые переменные, а также должна присутствовать взаимосвязь размеров деталей, входящих в одну сборку, при этом предполагается, что размеры деталей в ходе последующей оптимизации будут изменяться не более чем на 50%. В качестве примера рассмотрим группу поршня, куда помимо самого поршня входят также поршневой палец и стопорные кольца (см. рис. 3.4).

Первым шагом необходимо составить схему с обозначениями и таблицу параметров, достаточных для описания всех размеров деталей и выделить в ней независимые переменные, а для зависимых переменных указать выражения, которыми они связаны с независимыми переменными. При этом подразумевается, что это деление условно, и, в случае необходимости, зависимой переменной на стадии доводки может быть присвоено числовое значение с удалением связывающих выражений, и в дальнейшем она будет рассматриваться, как независимая.

Главной деталью сборки является поршень (см. рис. 2.21), поэтому на его схеме параметризации (см. рис. 5.1) логично расположить наибольшее число независимых переменных.

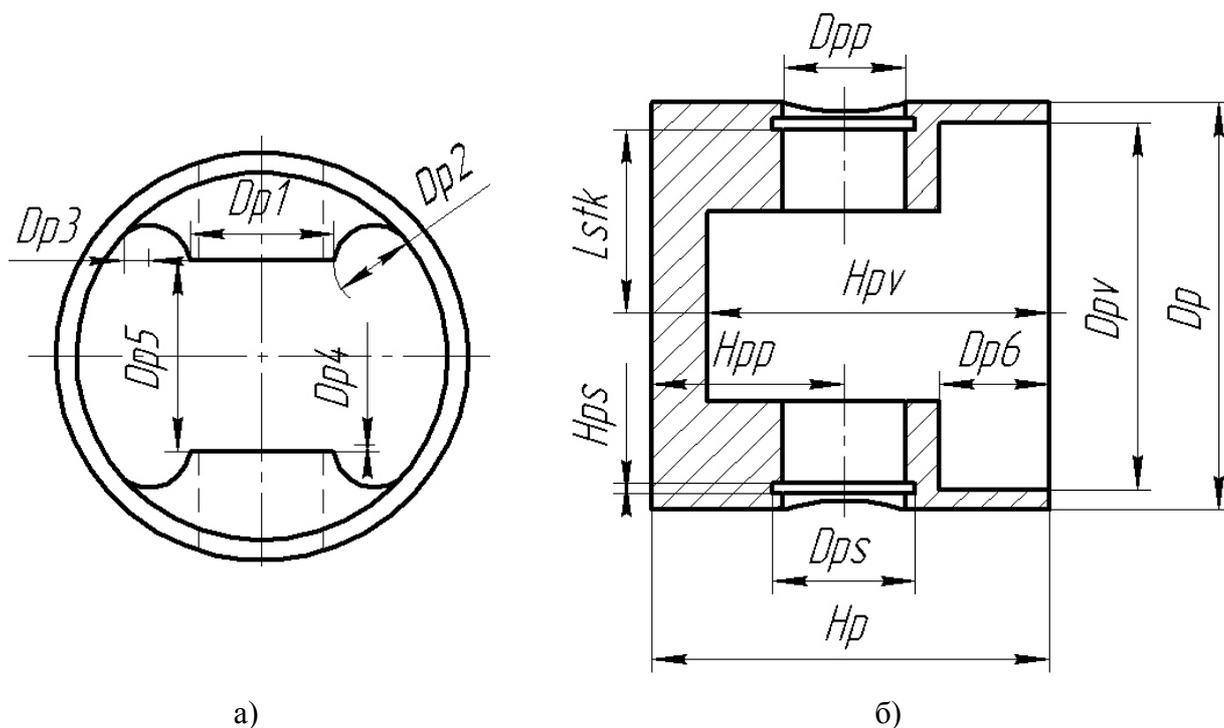


Рис. 5.1 Схема параметризации поршня:

а) вид снизу; б) продольный разрез

Расшифровка значений и функциональных связей переменных приводится в таблице 5.1.

Подробно о взаимодействии с интерфейсом NX в процессе параметризации можно ознакомиться в [1]. Вкратце, параметризация производится по следующему алгоритму:

1. В открытом файле параметризуемой детали выбираются, а затем создаются через команду меню **Инструменты - Выражение =** именованные переменные для независимых параметров детали. Выбор именованных переменных указывается в поле "Список выражений", числовое значение переменной указывается в поле "Формула". Имя переменной в целях совместимости желательно указывать латинскими символами, без пробелов и не длиннее 8-ми символов.

2. Затем через древо модели  запускается процесс редактирования эскизов (через команду  **Изменить...**) или операций (через команду  **Изменить параметры...**), где соответствующим параметрам (имеющим вид  $p_i = \text{число}$ , где  $i$  - присваиваемый NX внутренний номер) назначаются созданные ранее переменные (см. рис. 5.2), где в поле "Формула" указывается выражение из таблицы 5.1, связывающее зависимые и независимые переменные.

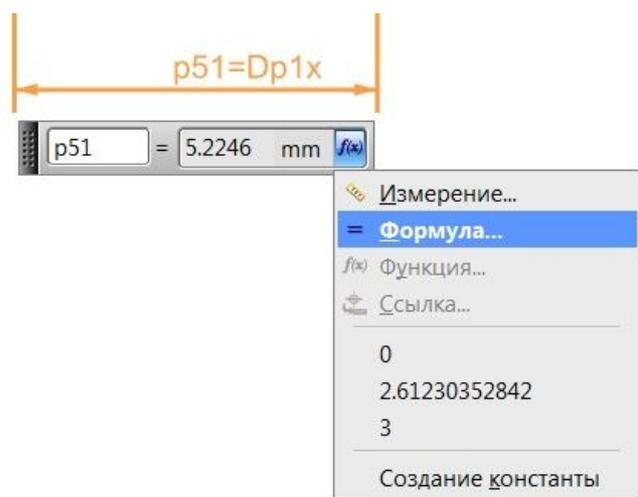


Рис. 5.2 - Назначение созданных переменных параметрам модели

Свободные размеры (как правило, это радиусные элементы, скругления, фаски и т.д.) вычисляются NX для сопряжения параметризованных элементов. Задать свободные размеры явно не представляется возможным, поскольку они являются зависимыми, и при их неверном задании NX не может найти решение размерной цепочки контура.

Однако, после задания параметров необходимо осуществить контроль всех свободных размеров на предмет соблюдения требуемой формы детали.

В качестве примера рассмотрим диаметр боковой части бобышки поршня ( $Dp2$ ). Данный размер обеспечивает сопряжение бобышки поршня с его внутренней поверхностью. На рис. 5.3 показано расположение этого сопряжения в исходной (непараметризованной) модели, а на рис. 5.4 - после изменения расстояния между бобышками поршня  $Dp5$ , где хорошо видно, что дуга сопряжения сместилась, внедрившись в тело поршня, а плавность сопряжения нарушилась. В этом случае плавность сопряжения можно восстановить вручную, просто переместив наружную точку дуги вдоль линии внутреннего диаметра поршня, как это показано на рис. 5.5.

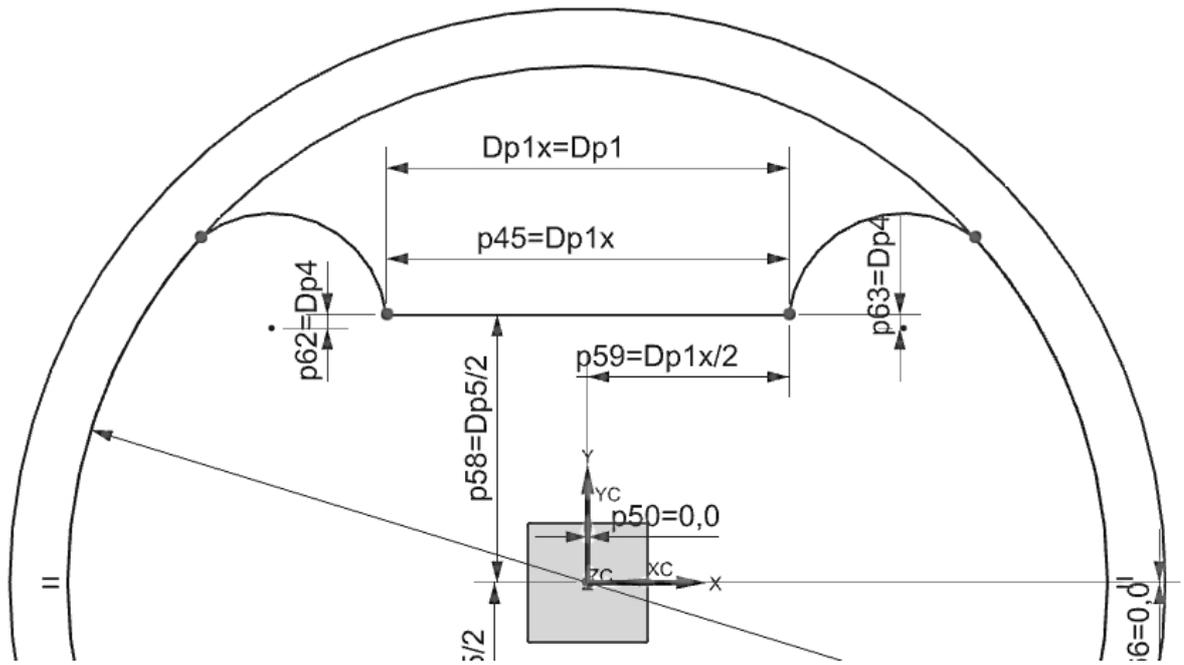


Рис. 5.3 - Сопряжение бобышки поршня с его внутренней поверхностью на непараметризированной детали

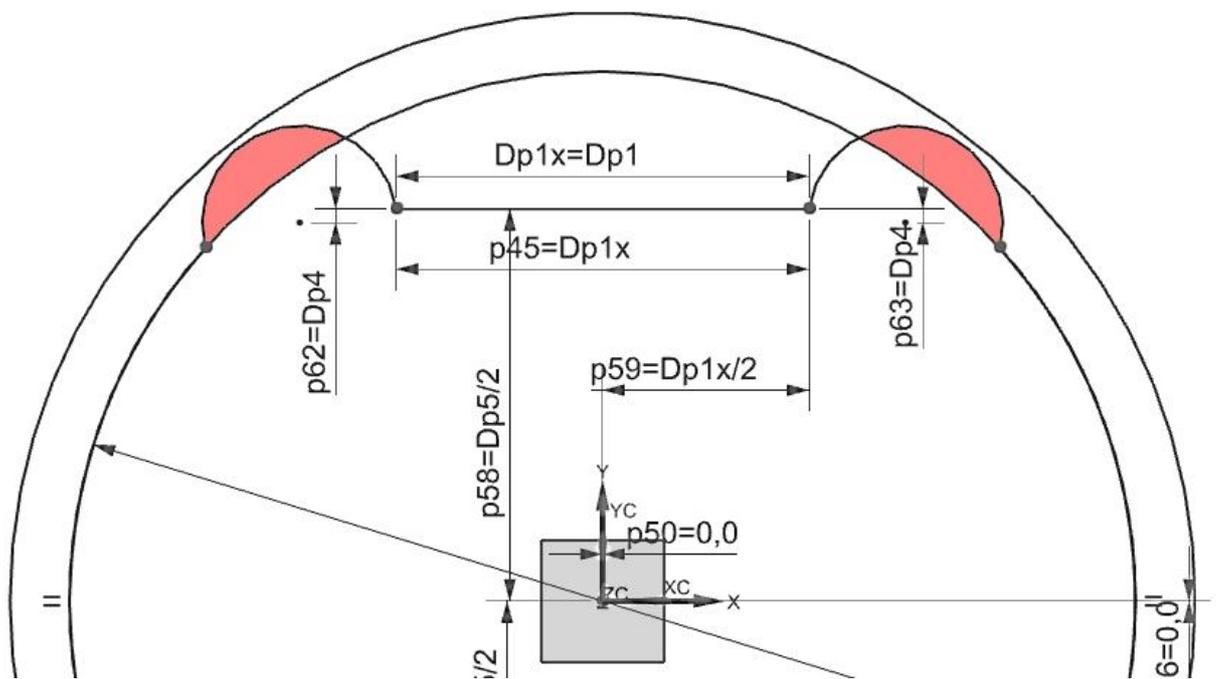


Рис. 5.4 - Нарушение сопряжения бобышки поршня с его внутренней поверхностью после изменения параметра  $Dp5 = 10$  мм

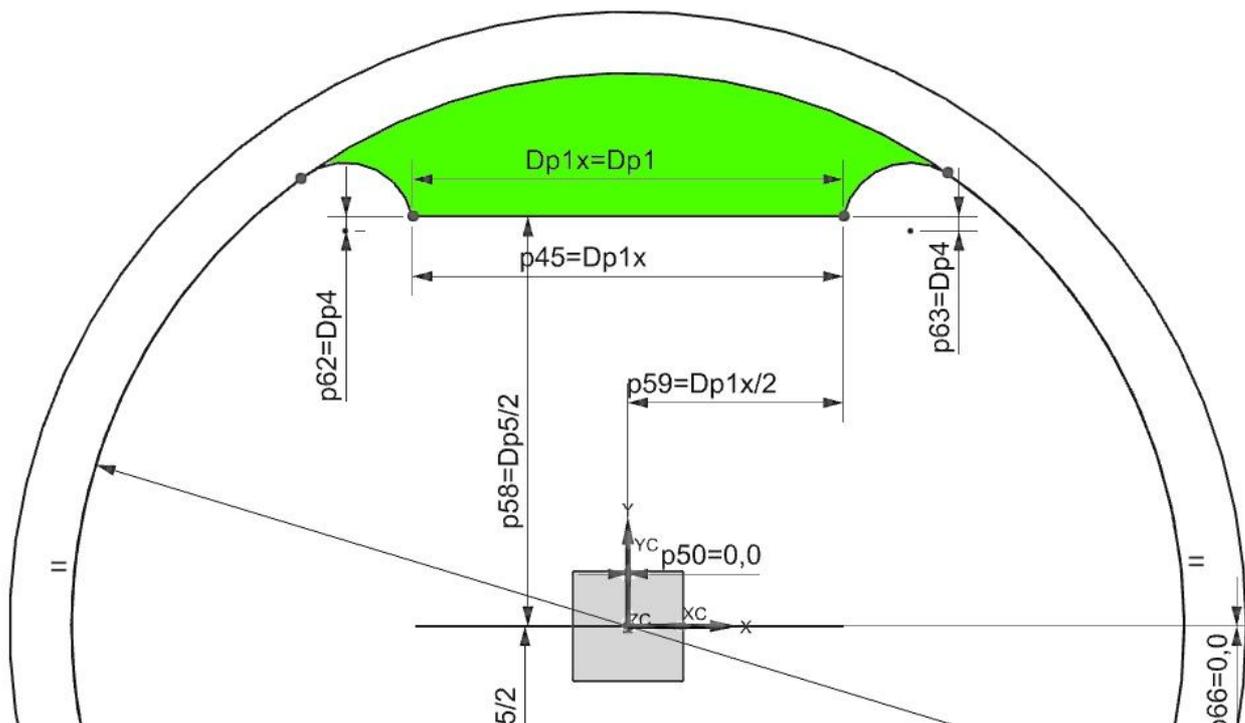


Рис. 5.5 - Ручное задание сопряжения бобышки поршня с его внутренней поверхностью после изменения параметра  $Dp5 = 10$  мм

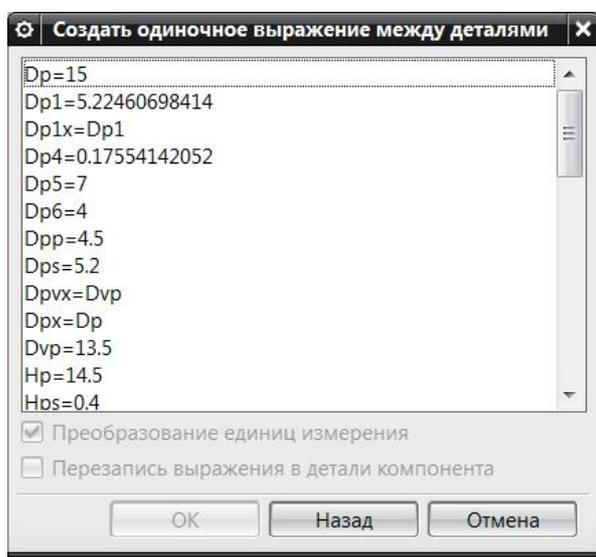


Рис. 5.6 - Окно инструмента "Создать одиночное выражение между деталями"

Следующей параметризуемой деталью является поршневой палец (см. рис. 5.7). Для его параметризации достаточно 4-х параметров (см. табл. 5.1), однако часть из них ссылается на переменные, созданные в модели поршня. Чтобы сослаться на переменные, созданные в другой модели, следует воспользоваться инструментом "Создать одиночное выражение между деталями" , где указать файл детали и выбрать из списка требуемую переменную.

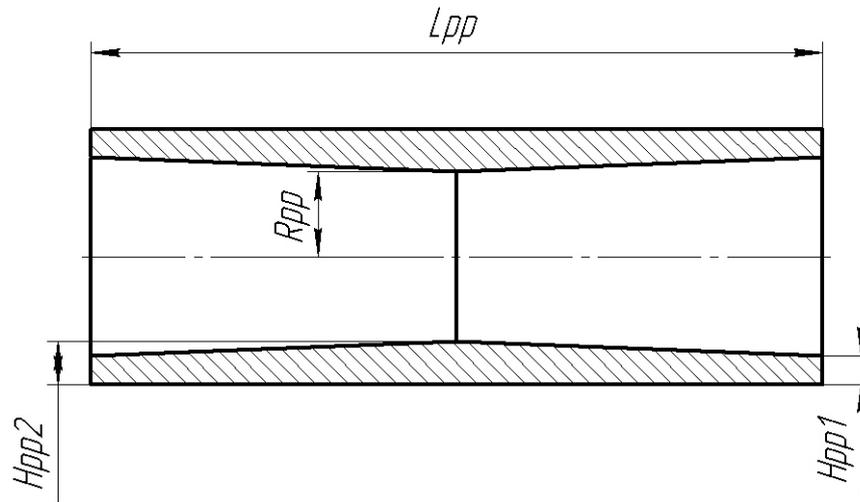


Рис. 5.7 - Схема параметризации поршневого пальца

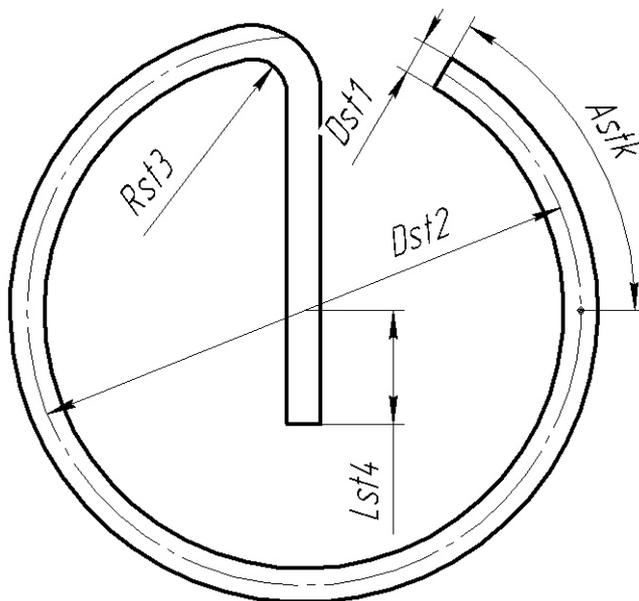


Рис. 5.8 - Схема параметризации стопорного кольца

Параметризация шатунной группы (см. рис. 3.6) осуществляется аналогичным образом. Базовой деталью группы является шатун (см. рис. 2.25). Схема параметризации шатуна приведена на рис. 5.9, а параметры сведены в таблицу 5.2.

Также в шатунную группу входят две втулки, верхняя и нижняя, имеющие отверстия для прохода масла.

Схема параметризации верхней втулки приведена на рис. 5.10а, схема параметризации нижней втулки на рис. 5.10б, параметры приведены в таблице 5.2, причём все параметры втулок являются зависимыми от размеров других деталей: шатуна, поршня и коленчатого вала.

Табл. 5.1 - Таблица параметров группы поршня

<b>Поршень (Porshen)</b>				15
№	Имя	Расшифровка	Значение	
1	<b>Dp</b>	Диаметр поршня	15,0 мм	
2	<b>Hp</b>	Высота поршня	14,5 мм	
3	<b>Dpv</b>	Внутренний диаметр поршня	13,5 мм	
4	<b>Hpv</b>	Высота внутренней части поршня	12,5 мм	
5	<b>Lstk</b>	Расстояние от оси поршня до стопорного кольца поршневого пальца	6,5 мм	
6	<b>Dp1</b>	Ширина бобышки поршня	5,2246 мм	
7	<b>Dp2</b>	Диаметр боковой части бобышки поршня	<i>Свободный 3 мм</i>	
8	<b>Dp3</b>	Сдвиг центра диаметра Dp2 по X	<i>Свободный 0,9230 мм</i>	
9	<b>Dp4</b>	Сдвиг центра диаметра Dp2 по Y	0,1755 мм	
10	<b>Dp5</b>	Расстояние между бобышками поршня	7 мм	
11	<b>Dp6</b>	Расстояние от низа поршня до бобышки поршня	4 мм	
12	<b>Dpp</b>	Диаметр отверстия под поршневой палец	4,5	
13	<b>Hpp</b>	Расстояние от днища поршня до оси поршневого пальца	7 мм	
14	<b>Dps</b>	Наружный диаметр стопорного кольца	5,2 мм	
15	<b>Hps</b>	Ширина стопорного кольца	0,4 мм	
<b>Поршневой палец (Porsh_pal)</b>				4
№	Имя	Расшифровка	Значение	
1	<b>Lpp</b>	Длина поршневого пальца	"Porshen"::Lstk*2-0.2	
2	<b>Rpp</b>	Внутренний радиус поршневого пальца	("Porshen"::Dpp/2)-Hpp2	
3	<b>Hpp1</b>	Толщина стенки поршневого пальца на кромке	(0.5/12.8)*Lpp	
4	<b>Hpp2</b>	Толщина стенки поршневого пальца в середине	(0.75/12.8)*Lpp	

Стопорное кольцо (stopornie_kolco)				5
№	Имя	Расшифровка	Значение	
1	<b>Dst1</b>	Диаметр проволоки стопорного кольца	0,3 мм	
2	Dst2	Средний диаметр стопорного кольца	"Porshen"::Dps-Dst1-0.05	
3	<b>Astk</b>	Угол стопорного кольца	60 градусов	
4	Rst3	Радиус сгиба стопорного кольца	0.45*Dst2/4.85	
5	Lst4	Длина свободного конца стопорного кольца	Dst2/4.85	

3

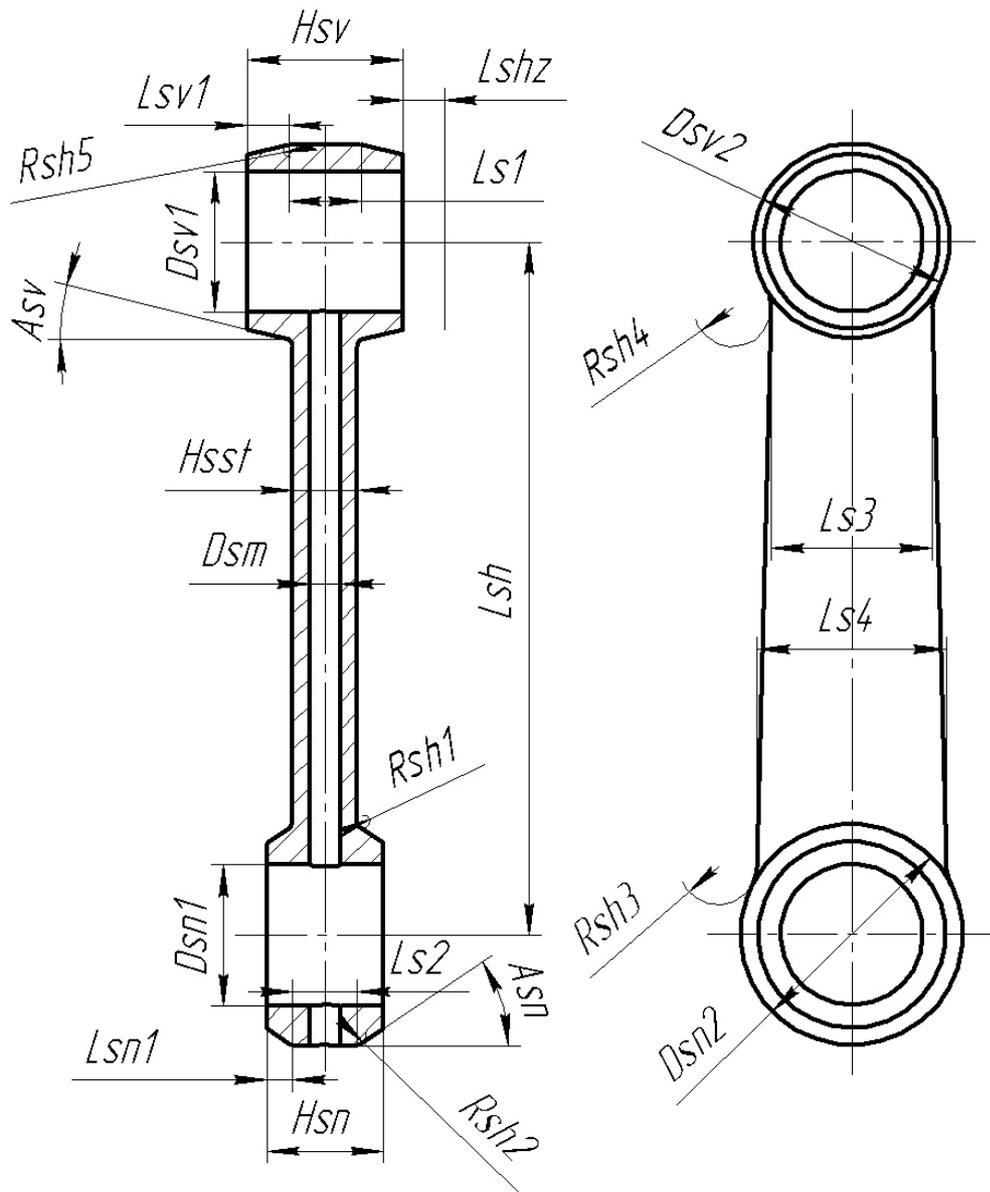


Рис. 5.9 - Схема параметризации шатуна

Табл. 5.2 - Таблица параметров группы шатуна

<b>Шатун (Shatun)</b>				23
№	Имя	Расшифровка	Значение	
1	<b>Lsh</b>	Длина шатуна	27 мм	
2	<b>Hsv</b>	Ширина верхней головки шатуна	"Porshen"::Dp5- (2*Lshz)	
3	<b>Dsv1</b>	Внутренний диаметр верхней головки шатуна	5,5 мм	
4	<b>Dsv2</b>	Наружный диаметр верхней головки шатуна	7,6 мм	
5	<b>Ls1</b>	Длина цилиндрической части верхней головки шатуна	2,8 мм	
6	<b>Lsv1</b>	Длины наклонных частей верхней головки шатуна	$(Hsv-Ls1)/2$	
7	<b>Asv</b>	Угол наклона верхней головки шатуна	14 градусов	
8	<b>Dsm</b>	Диаметр смазочного отверстия	1,2 мм	
9	<b>Hsn</b>	Ширина нижней головки шатуна	4,5 мм	
10	<b>Dsn1</b>	Внутренний диаметр нижней головки шатуна	5,5 мм	
11	<b>Dsn2</b>	Наружный диаметр нижней головки шатуна	8,6 мм	
12	<b>Ls2</b>	Длина цилиндрической части нижней головки шатуна	2,5 мм	
13	<b>Lsn1</b>	Длины наклонных частей нижней головки шатуна	$(Hsn-Ls2)/2$	
14	<b>Asn</b>	Угол наклона нижней головки шатуна	34 градуса	
15	<b>Ls3</b>	Ширина стержня шатуна в верхней части	6,2 мм	
16	<b>Ls4</b>	Ширина стержня шатуна в нижней части	7,4 мм	
17	<b>Hsst</b>	Высота стержня шатуна	2,5 мм	
18	<b>Rsh1</b>	Радиус скругления нижней головки шатуна	0,25 мм	
19	<b>Rsh2</b>	Радиус скругления нижней головки шатуна	0,5 мм	
20	<b>Rsh3</b>	Радиус скругления нижней головки шатуна	1,5 мм	
21	<b>Rsh4</b>	Радиус скругления верхней головки шатуна	1,5 мм	
22	<b>Rsh5</b>	Радиус скругления верхней головки шатуна	0,25 мм	
23	<b>Lshz</b>	Зазор между верхней головкой шатуна и бобышкой поршня	0,5 мм	

Верхняя втулка шатуна (vtulkaverx)				4
2	1	Dsvv1	Наружный диаметр втулки	"Shatun"::Dsv1
	2	Dsvv2	Внутренний диаметр втулки	"Porshen"::Dpp
	3	Lsvv3	Длина втулки	"Shatun"::Hsv
	4	Dsvv4	Диаметр масляного отверстия	"Shatun"::Dsm
Нижняя втулка шатуна (vtulkaniz)				4
3	1	Dsvn1	Наружный диаметр втулки	"Shatun"::Dsn1
	2	Dsvn2	Внутренний диаметр втулки	"Kol_val"::Dhh
	3	Lsvn3	Длина втулки	"Shatun"::Hsn
	4	Dsvn4	Диаметр масляного отверстия	"Shatun"::Dsm

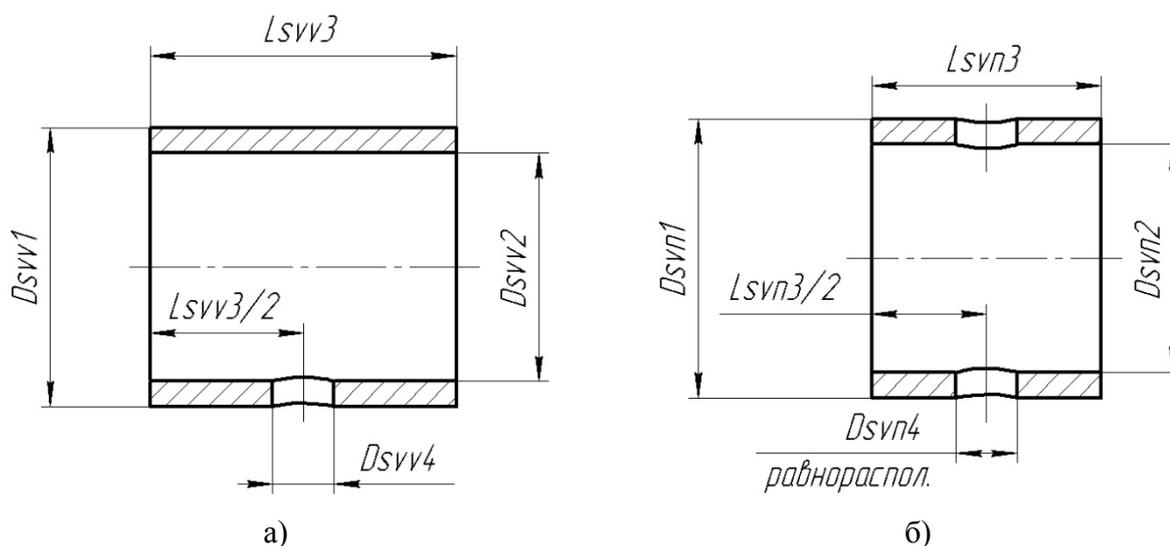


Рис. 5.10 - Схема параметризации втулок шатуна:

а) верхняя втулка; б) нижняя втулка

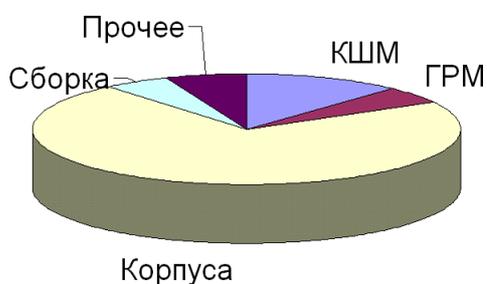


Рис. 5.11 - Трудоемкость создания объемной модели

Детали других групп параметризуются аналогичным образом, причём наибольшую сложность представляет параметризация картера (см. рис. 5.11). В силу объёмности соответствующие схемы параметризации и таблицы в данном учебном пособии не приводятся.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведена теория и практика создания параметрических САD-моделей двигателей. Рассмотрены вопросы создания эскизов, выполнения операций по созданию геометрии, добавления дополнительной геометрии, создания сборок двигателя с анализом и применением необходимых граничных условий, а также общие вопросы технологии проектирования 3D-моделей. Приведены сведения по параметрическому моделированию. Даны практические примеры по использованию предложенной технологии моделирования основных деталей двигателя.

Анализируя трудоёмкость работы, можно отметить, что суммарное время создание объемной модели ДВС около двухсот часов. Из них на создание КШМ – 12%, ГРМ – 5%, корпусные детали – 72%; на сборку – 5%. Остальное время тратится на мелкие детали и прочие операции.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Данилов, Ю., Артамонов, И. Практическое использование NX [Текст]: Учеб. пособие / Сост. Ю. Данилов, И. Артамонов. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 332 с.: ил.
2. Колчин, А.И. Расчёт автомобильных и тракторных двигателей [Текст]: Учеб. пособие для вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. школа, 1980. - 400 с.: ил.
3. Васильев, А. Очередной блог о САПР [Электронный ресурс]: Сетевой журнал: URL <http://www.saprobasni.ru/> (дата обращения 10.09.13)