

Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени академика С. П. КОРОЛЕВА»

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ДВИГАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3D-МОДЕЛЕЙ ИХ ЭЛЕМЕНТОВ.

ЧАСТЬ 1: ДВС

Методические указания



**Инновационная образовательная программа
«Развитие центра компетенции
и подготовка специалистов мирового уровня
в области аэрокосмических
и геоинформационных технологий»**

САМАРА 2006

Составители: А.С. Гвоздев, В.С. Мелентьев, Д.С. Лежин

УДК

Изучение конструкции двигателей с использованием 3D-моделей их элементов. Часть 1:
ДВС: Метод. указания / Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Сост. А.С. Гвоздев, В.С. Мелентьев, Д.С. Лежин. Самара, 2006. 24 с.

Даны сравнительные характеристики для 2D- и 3D-моделирования. Приведены достоинства и недостатки каждого метода применительно к современному машиностроению. Детально рассмотрены особенности построения двигателей в программной среде 3D-пакетов, топологическая структура и принципы конвертации моделей в другие инженерные программы для дальнейших расчетов (динамического, прочностного и т.п.). Обоснована стадия 3D-моделирования, как одна из важнейших в «сквозном» проектировании современных двигателей с указанием наиболее эффективных способов ее применения.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по специальности 140501 Двигатели внутреннего сгорания, 160301 Авиационные двигатели и энергетические установки и выполняющих лабораторные работы по дисциплинам «Конструкция двигателей внутреннего сгорания», «Динамика двигателей внутреннего сгорания» и «Динамика авиационных двигателей и энергетических установок». Методические указания разработаны на кафедре конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов.

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева

Рецензент: В.Б. Балякин

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
2D-моделирование	5
3D-моделирование	9
Основные технические характеристики двигателя	13
Описание конструкции и работы двигателя	15
Построение 3D-модели двигателя	16
Заключение	23
Контрольные вопросы	24

Введение

В настоящее время в мире вопрос о включении компьютерного обеспечения в работу любого специалиста давно решен. Без современных программ особенно усложняется жизнь инженера, большая часть работы которого связана с черчением и вычислением. Нынешнее образование обязательно должно учитывать все больший охват задач, возлагаемых на информационную технику, и включать в учебный процесс решение задач с использованием инженерного программного обеспечения.

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

Конструирование = **Кинематика и динамика** = **Прочность** = **Производство**

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 имеет ряд преимуществ перед старыми видами отображения действительности, которое все более возрастает по мере роста его универсальности, то есть расширения 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, не взирая 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. Удобства этого метода давно оценены в Европе, но и у нас с конца 90-х годов наметилась тенденция использовать 2D САД пакеты для построения чертежей. За рубежом стандартом является 3D-геометрия. Производители же подобных продуктов пошли дальше, объединяя различные программы в целые пакеты, например, конструкторские, кинематические, динамические, прочностные программы объединяются в единый пакет.

Лидерство в создании подобных пакетов принадлежит пока зарубежным странам, и, хотя в нашей стране разрабатываются пакеты по аналогии с иностранными образцами, впервые построить замкнутую систему безбумажного проектирования удалось не в России, поэтому в данном методическом пособии мы будем опираться в основном на импортные САД-пакеты.

2D-моделирование

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 САД-пакетов.

В данном методическом пособии авторы опирались на такие пакеты, как:

1. **SolidWorks** – инженерный пакет, предназначенный для построения качественной 3D-геометрии. Имеет встроенный 2D-модуль с небольшими возможностями. Созданная геометрия легко сохраняется во множестве форматов, включая *Parasolid*.
2. **SolidEdge** – инженерный пакет, также предназначенный для создания 3D-геометрии и имеющий простой 2D-модуль. В последних версиях **SolidEdge** и **SolidWorks** сближаются между собой, если не по ядрам, то по функциям и дизайну.
3. **КОПМАС-3D** – отечественный инженерный комплекс, предназначенный для создания 3D-геометрии. По своим возможностям в объемном моделировании практически совпадает с **SolidWorks**, однако имеет очень мощный модуль 2D-моделирования, что важно для отечественных промышленных предприятий.
4. **ADEM** – пакет для создания 3D-геометрии, резко отличный от первых трех функциями, что связано с использованием принципиально иного метода для создания объемной геометрии. Преимуществом пакета является его тесная связь с САМ-технологиями.
5. **ADAMS** – пакет кинематического и динамического анализа, который, однако, тоже имеет встроенный в **ADAMS/View** модуль создания 3D-геометрии с небольшими возможностями, схожий по принципам построения с **ADEM**.

Существуют и другие пакеты, такие как **Unigraphics**, **CATIA**, **AutoCAD**, **Cimatron**, **Pro/Engineer**, описать возможности которых в рамках данного пособия невозможно.

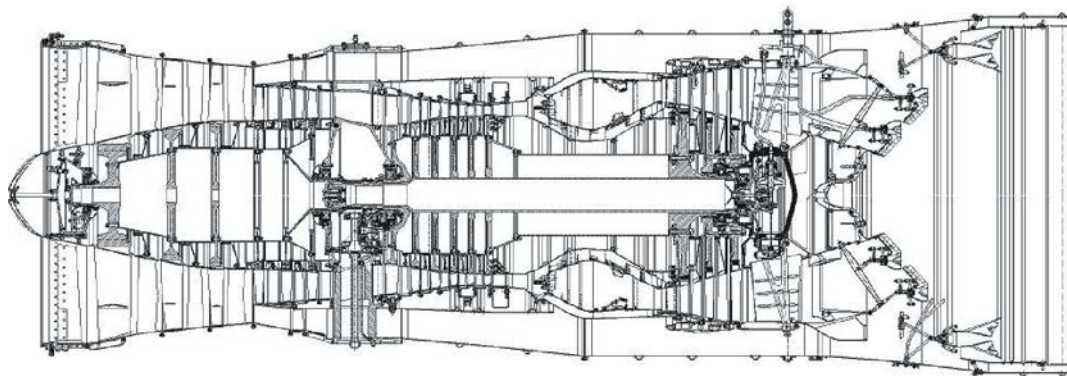


Рис. 1 – Фрагмент 2D-модели двигателя ТРДДФ НК-22

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. Так, пакет **SolidWorks** поддерживает стандарты: *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 А3 и А1, 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 так же 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:

$$\text{Размер } A = \text{математическая функция от } \text{Размера } B$$

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. Данный метод применяется в **SolidWorks**, однако наибольшее развитие получил в среде **КОМПАС**.

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. Для **SolidWorks** это *.prt, *.sldprt (детали), *.asm, *.sldasm (сборки), *.drw, *.slddrw (чертежи); для **SolidEdge** - *.par (детали), *.asm (сборки), *.dft (чертежи); для **КОМПАС-3D** - *.m3d (детали), *.a3d (сборки), *.cdw, *.frw (чертежи).

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, *.drw 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 САД-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, к рассмотрению которого и посвящена следующая глава.

3D-моделирование

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. К ним относятся прежде всего **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.

а) Программы с эскизным методом построения. К ним относятся SolidWorks, SolidEdge, 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 *повернуть* 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.

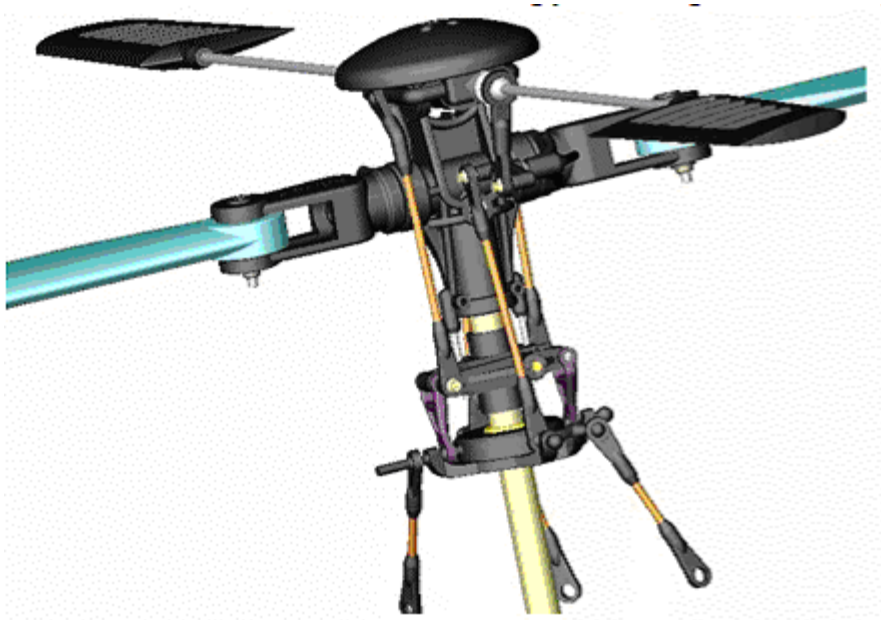


Рис. 2. Механизм стабилизации вертолета ([Видео1](#))

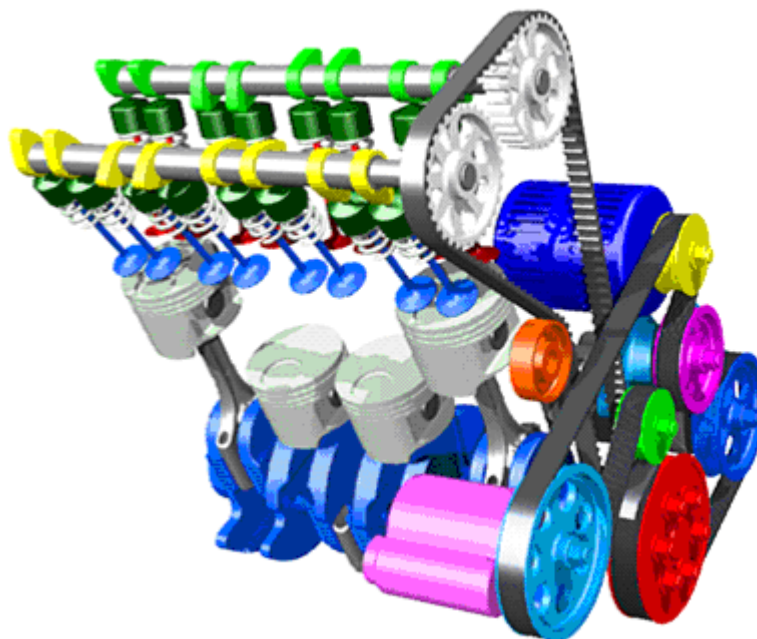


Рис. 3. Модель рядного ДВС с ГРМ

И другие, более сложные. Так, например, возможно построение одного тела (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. Эта опция важна для отечественных промышленных предприятий, которые пока ориентируются на плоские чертежи.

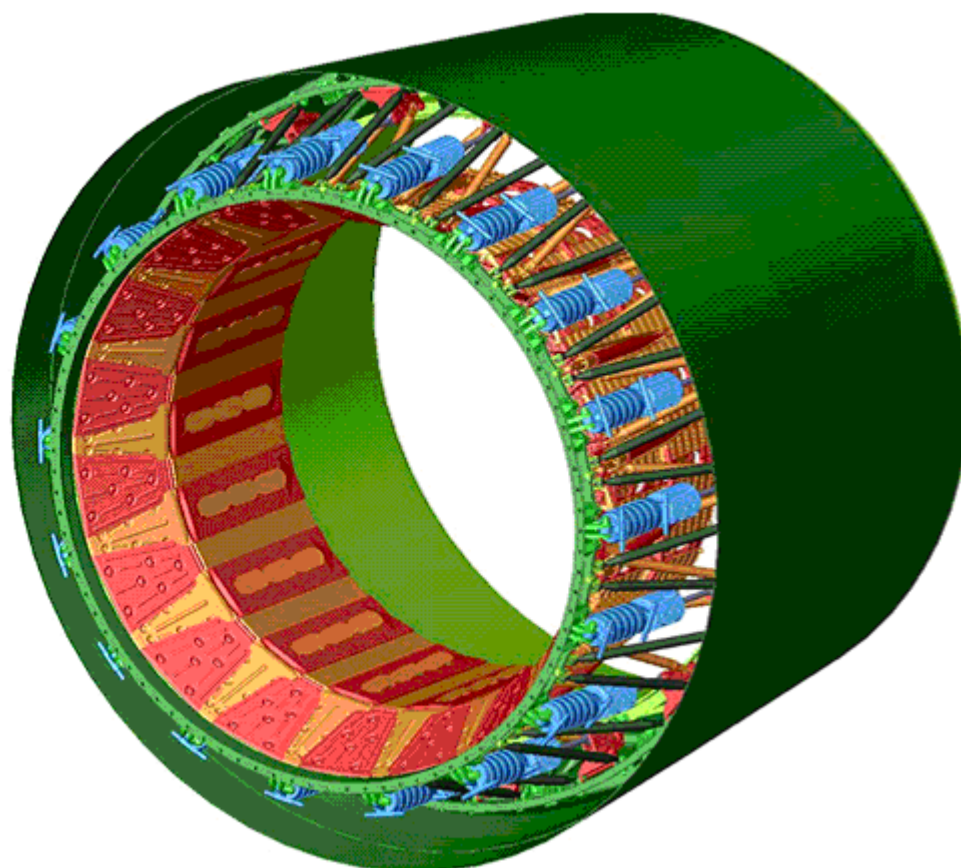


Рис. 4. Модель управляемой части сопла Д30Ф6

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.

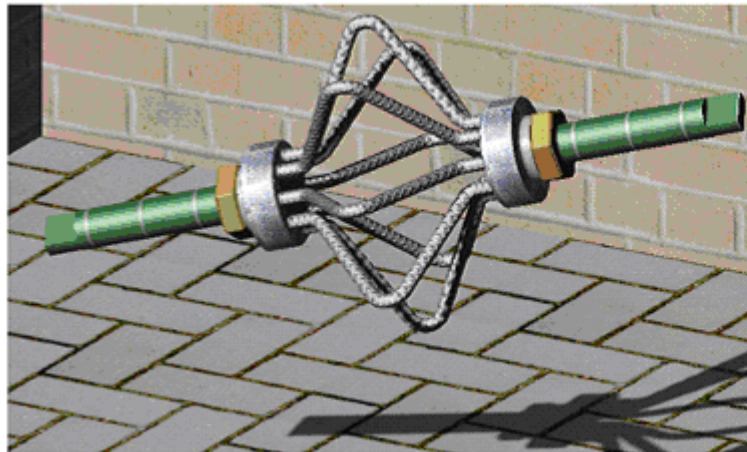


Рис.5. Фотореалистичная модель тросового виброизолятора ([Видео2](#))

Для безбумажных алгоритмов проектирования основными являются общие модели.

Помимо отдельных деталей, 3D-пакеты позволяют создавать сборки. Сборка состоит из расположенных в определенном порядке деталей, оснащенных необходимыми связями. 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. ([Видео3](#))

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 сборки 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. Так, в SolidWorks они не доступны вообще.

Частично присутствуют в ADAMS. Имеются в пакете Pro/Engineer.

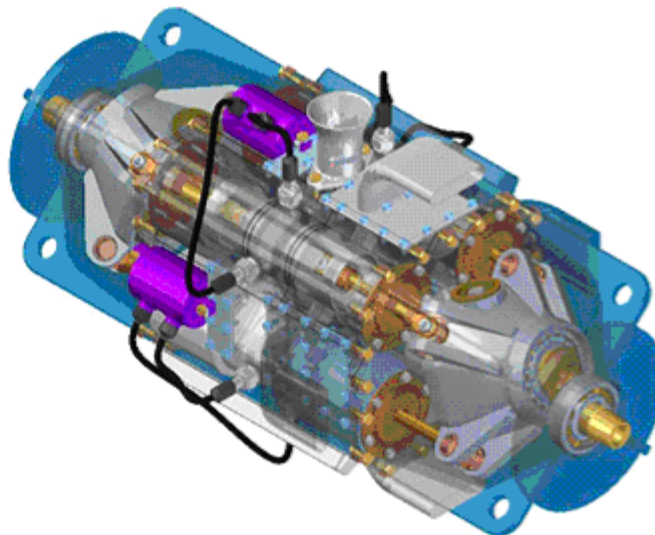


Рис.6. Четырехцилиндровый аксиальный ДВС с противоположно движущимися поршнями, Л разработанный в ОАО «СКБМ»

Для серии похожих деталей часто используют масштабную параметризацию, кода изменением масштабного фактора можно уменьшать или увеличивать детали в сборке в одинаковой пропорции. Выполненная таким образом модель для серии виброизоляторов, показана на рисунке 5. Точно так же созданы базы стандартных деталей.

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.

Основные технические характеристики двигателя

Для правильного построения 3D-модели необходимо иметь некоторые представления о конечном виде модели и ее характеристиках. Поэтому создание нового двигателя всегда начинается с изучения похожих механизмов, или прототипов, о которых желательно иметь максимально полные данные. В данном пособии рассматривается двигатель Д300, описание которого приведено ниже:

Тип	двухтактный с двухканальной возвратной продувкой
Номинальная мощность, кВт	4,8
Максимальная эксплуатационная мощность, кВт	3,6
Частота вращения, об/мин	3000
Удельный расход топлива, мг/Дж	150
Наибольший крутящий момент (при $n=2200$ об/мин), Н*м	18
Число цилиндров	1
Диаметр цилиндра, мм	74
Ход поршня, мм	68
Рабочий объем цилиндра, см ³	293
Степень сжатия	6,2±0,3
Система зажигания	магнето М25Б1
Тип запальной свечи	А10НТ ГОСТ 2043-74
Модель карбюратора	К16-И
Топливо	Автомобильный бензин А72 ГОСТ 2084-77
Смазочный материал	масло МС-20 ГОСТ 21743-76
Способ смазки	смешивание масла с бензином в объемном отношении 1:25
Габаритные размеры, мм	
Длина	370
Ширина	402
Высота	620
Масса двигателя, кг	33

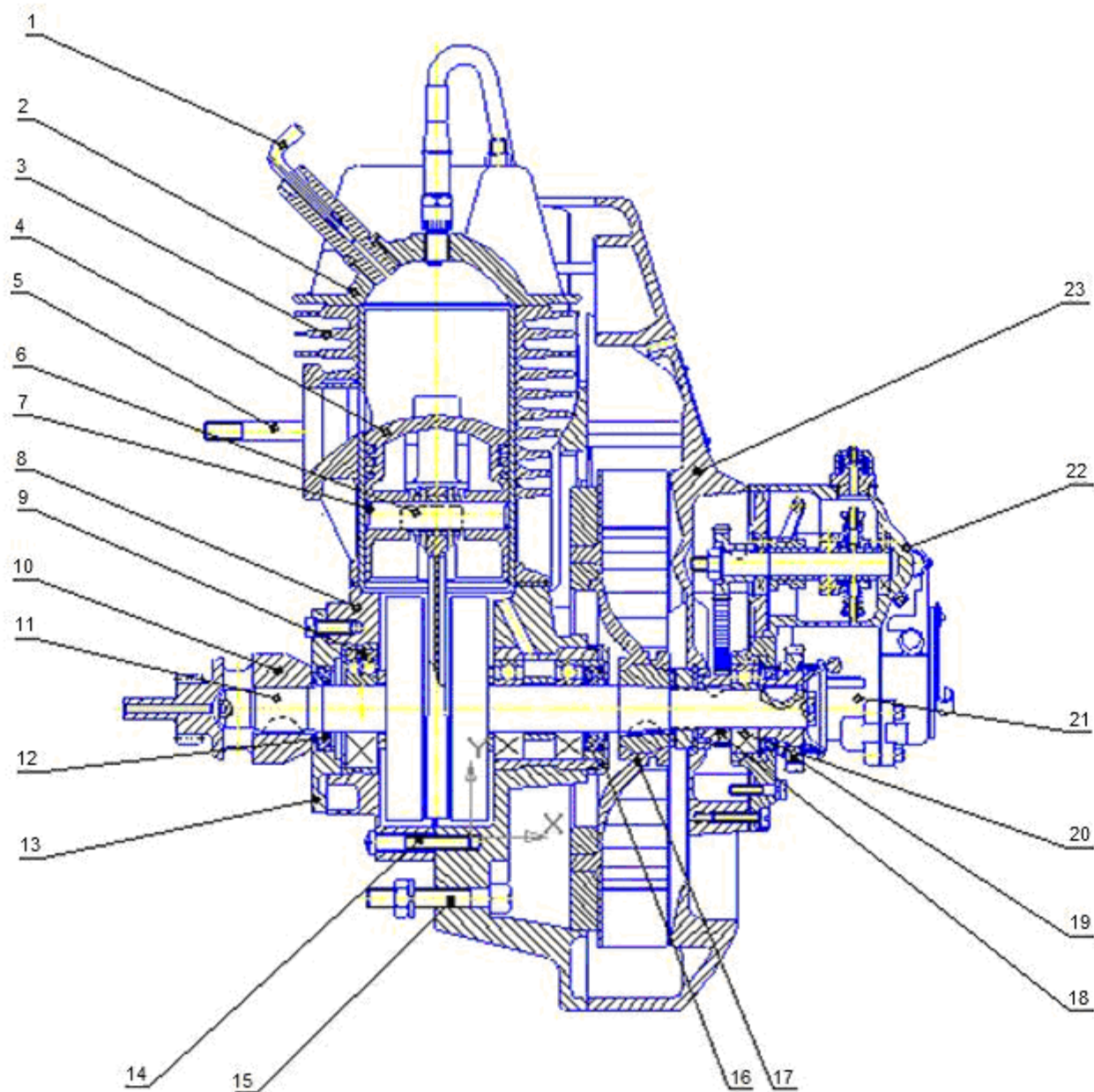


Рис.7. Продольный разрез двигателя Д300

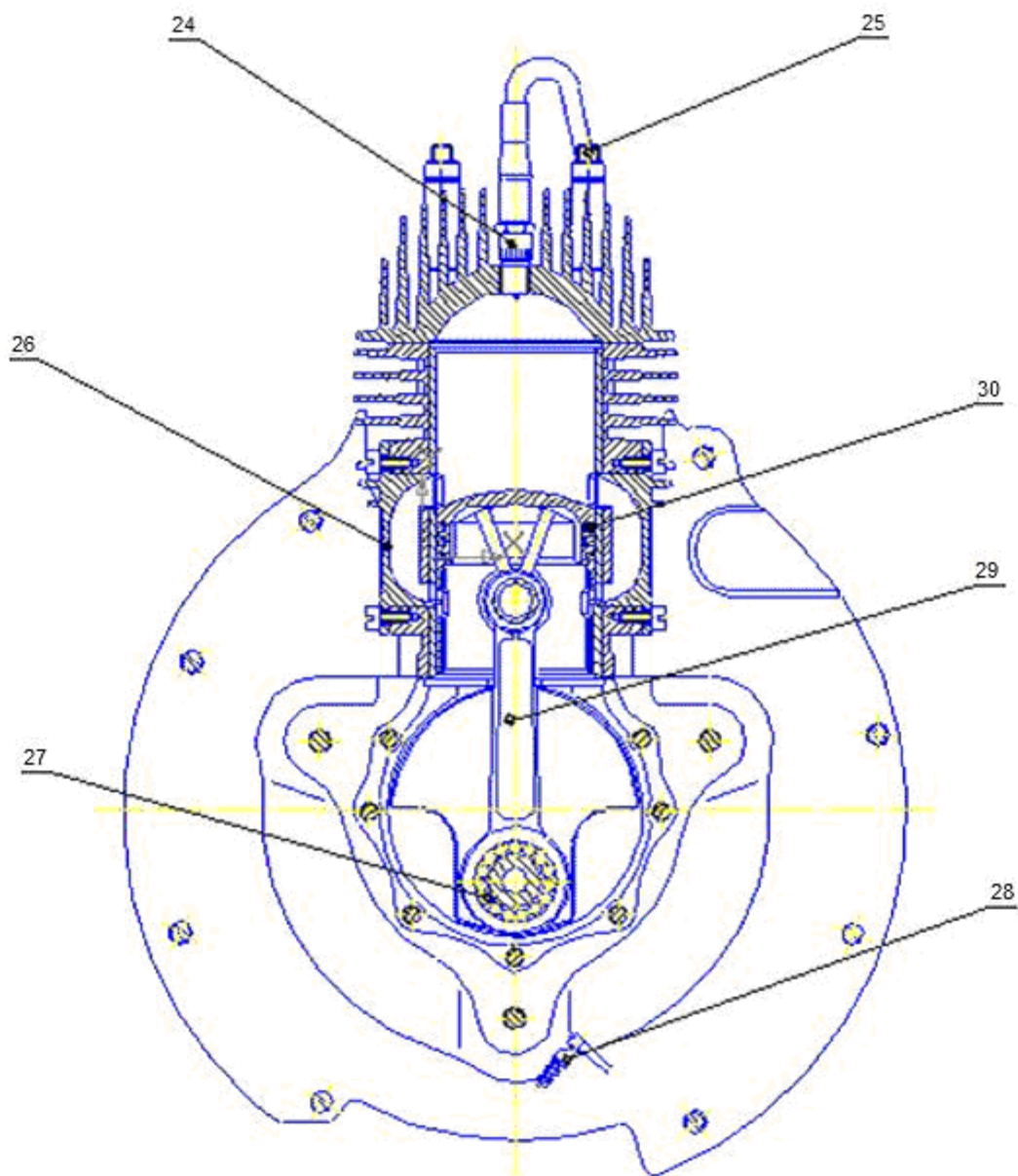


Рис.8. Поперечный разрез двигателя Д300

На рисунках 7,8:

1 - краник декомпрессионный; 2 - головка цилиндра; 3 - цилиндр; 4 - поршень; 5 - шпилька крепления глушителя; 6 - поршневой палец; 7 - стопорное кольцо; 8 - картер;
 9 - шариковый подшипник; 10 - муфта; 11 - коленчатый вал; 12 - резиновое уплотнение;
 13 - крышка уплотнения; 14 - винт картера; 15 - болт крепления двигателя; 16 - гайка уплотнения; 17 - маховик-вентилятор; 18 - ведущая шестерня; 19 - шестерня;
 20 - вспомогательный подшипник; 21 - магнето; 22 - регулятор; 23 - корпус двигателя;
 24 - свеча; 25 - болт; 26 - заглушка перепускного канала; 27 - ролик; 28 - краник спускной; 29 - шатун; 30 - поршневое кольцо.

Описание конструкции и работы двигателя

1 Назначение

Карбюраторный двигатель Д300 предназначен для привода различных машин, требующих мощность не выше 3,6 кВт.

2 Принцип действия

Двигатель Д300 работает по двухтактному циклу с двухканальной возвратной продувкой цилиндра горючей смесью. Цилиндр и кривошипная камера двигателя представляют собой один объем, разделенный поршнем на две части, сообщающиеся перепускными каналами. При движении поршня вверх в кривошипной камере создается разрежение, под действием которого через всасывающий канал начинает поступать топливо-воздушная смесь. Когда поршень находится в ВМТ, всасывающий канал открыт полностью.

(Видео4)

При движении поршня вниз всасывающий канал постепенно закрывается и поступившая в кривошипную камеру горючая смесь сжимается. При дальнейшем движении поршня вниз его верхняя кромка постепенно открывает верхние окна перепускных каналов. При достижении поршнем НМТ, эти окна полностью открываются, а специальные отверстия, имеющиеся в нижней части поршня, совпадают с нижними окнами тех же каналов. Верхняя и нижняя части объема соединяются, и горючая смесь, сжатая в кривошипной камере, переходит через поршень в цилиндр. Затем поршень идет вверх, закрывая окна перепускных и выхлопных каналов, горючая смесь над поршнем сжимается. В конце хода поршня вверх, когда он не доходит 2,5...4,5 мм до ВМТ, между электродами запальной свечи возникает искра, от которой смесь воспламеняется. При сгорании смеси создается повышенное давление (около 3 МПа), под действием которого поршень движется вниз, совершая полезную работу. Затем его верхняя кромка открывает выхлопное окно, через которое отработавшие газы по выхлопному каналу выходят в атмосферу.

Давление над поршнем резко падает. Поршень, двигаясь к НМТ, открывает верхние окна перепускных каналов, и сжатая в кривошипной камере горючая смесь устремляется в цилиндр, выталкивая остатки отработавших газов. Весь рабочий процесс происходит за один оборот КВ.

3 Устройство

Двигатель Д300 состоит из следующих основных частей: корпуса с картером и крышкой коробки передач, кривошипно-шатунного механизма, системы питания и смазки, системы зажигания, системы охлаждения, системы регулирования частоты вращения, системы механического запуска. Корпус двигателя состоит из двух половинок, скрепленных восемью винтами М8. В задней половине корпуса расположена коробка передач, к которой крепится крышка. Картер соединяется с половиной корпуса кольцевым замком и крепится к корпусу семью винтами М8.

Вертикально расположенный цилиндр крепится к картеру и корпусу двигателя, в которых на трех радиальных шариковых подшипниках лежит коленчатый вал. На выходе вала из картера и корпуса двигателя установлены уплотнения. На удлиненной полуоси вала крепится маховик-вентилятор. На этой же полуоси находится зубчатое колесо, передающее вращение на магнето, и регулятор, автоматически изменяющий мощность двигателя в

соответствии с изменением нагрузки на рабочую машину, поддерживая при этом постоянную частоту вращения.

На конце удлиненной полуоси посажена шестерня запуска, которая входит в зацепление с зубчатым сектором стартера. Для облегчения запуска двигатель снабжен декомпрессионным краником, расположенным на головке цилиндра.

Для соединения двигателя с рабочей машиной вал имеет конус 1:10 со шпонкой, цилиндрическую резьбу, зажимную гайку и контрящуюся шайбу.

В коробке передач полуось вала опирается на вспомогательный подшипник, исключаящий вибрации удлиненной полуоси вала и предохраняющий вал от прогиба под действием усилий, которые возникают при запуске.

Конструкцией двигателя предусмотрена смазка КШМ за счет смазывающих свойств горючей смеси. Бензобак объемом 5,5 л изготовлен из листовой стали, горловина для залива топливной смеси закрывается специальной крышкой с замком. Бензобак крепится к корпусу вентилятора двумя стяжными болтами. Коробка передач и регулятор частоты вращения смазываются отдельно от остальных частей двигателя.

Карбюратор К16-И – однодиффузорный, с количественной регулировкой холостого хода с горизонтальной смесительной камерой. Он состоит из двух основных частей: корпуса и крышки поплавковой камеры.

Для получения электрического тока, пропускаемого через свечу, на двигателе установлено одноискровое магнето М25Б1 левого вращения с постоянным опережением зажигания и фланцевым креплением.

Двигатель охлаждается воздушным потоком, создаваемым маховиком-вентилятором, который помещен в корпусе. Маховик-вентилятор представляет собой чугунный диск, на котором помещены изготовленные из алюминиевого сплава лопатки определенной кривизны. При вращении лопатки вентилятора захватывают воздух со стороны коробки передач и подают его по направляющим каналам корпуса на цилиндр и его головку. К головке цилиндра двигателя привинчены дефлекторы, направляющие воздух так, что он омывает ребра цилиндра и ребра головки цилиндра по всей поверхности.

Двигатель запускается при помощи рычага с зубчатым сектором, скрепленным со специальной шестерней запуска, установленной на коленчатом валу двигателя.

Построение 3D-модели двигателя

Для построения 3D-модели была использована программа **SolidWorks**. Выбор данной программы был обусловлен следующими причинами:

- а) **SolidWorks** использует стандарт *Parasolid*, который легко конвертируется в среду **ADAMS** и **ANSYS**. При этом достигается точная передача всех элементов, включая сплайновые поверхности и много радиусные скругления.
- б) Булевы операции осуществляются с помощью большого набора действий над эскизами, что позволяет легко создавать тела сложной геометрии. Данный метод предпочтительнее предварительного создания ряда твердых тел и их последовательного вычитания и сложения (так действуют **ADEM** и **ADAMS**).
- в) Пакет позволяет передавать в другие программы не только геометрию, но и массы, моменты инерции и координаты центра масс.
- г) **SolidWorks** полностью русифицирован, не конфликтует с другими инженерными пакетами, стабильно работает, имеет обширный набор инструментов.

К недостаткам программы относится слабый модуль 2D-проектирования, что и привело к использованию для создания 2D-чертежей пакета **КОМПАС**. В последних версиях **SolidWorks** сближается по интерфейсу и принципам построения моделей с пакетом **SolidEdge**, хотя последний все же остается ближе к средам **Cimatron** и **Unigraphics**.

3D-модель создавалась по реально существующему прототипу: поршневому, двухтактному, одноцилиндровому ДВС Д300.

С целью восстановления работоспособности данного двигателя и получения детальной информации об особенностях конструкции и геометрических размерах объекта исследования, двигатель был подвергнут разборке, очистке и последующей сборке с заменой неисправных элементов. Кроме этого, было произведено взвешивание основных элементов кривошипно-шатунного механизма для получения инерционных и других характеристик двигателя.

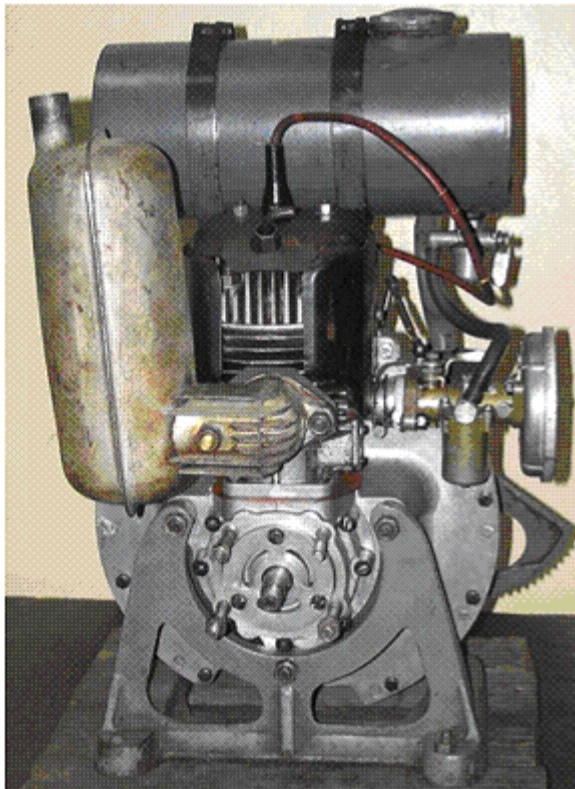


Рис. 9. Внешний вид ДВС Д300

Так как для создания динамической модели не требуется очень высокая точность геометрии, необходимо лишь обеспечить точные массово-инерционные характеристики, то при построении модели был принят ряд допущений:

1) Все болтовые элементы выполнялись гладкими, причем диаметр стержней принимался по внешнему диаметру резьбы, а отверстий - по внутреннему. Добавление резьбы резко замедляет процесс расчета и требует значительный объем графической памяти, и с физической точки зрения бесполезно, так как легко заменяется идеализированным винтовым шарниром.

2) Сложные аэродинамические поверхности, такие как перепускные и выпускные каналы, улитка вентилятора и т. п. были существенно упрощены, поскольку не оказывают влияние на процесс динамического расчета.

3) Вспомогательные агрегаты двигателя (магнето, датчик оборотов, карбюратор и т.д.), были заменены корпусами эквивалентной массы и момента инерции.

4) Цвета большинства деталей подбирались в соответствии с классификацией, по их типу или функциональному назначению.

5) Сложные литейные формы были упрощены.

6) Все сопрягаемые поверхности соединялись без зазоров и отклонений.

7) Некоторые элементы небольших размеров и массы, для упрощения структуры модели, были выполнены заодно. Например, некоторые шайбы и прокладки. В случаях, когда объединялись детали соизмеримых масс, определялась средняя плотность объекта.

8) Профиль зубьев в зубчатых соединениях был упрощен.

Рассмотрим создание деталей на примере поршня. Всего для этого понадобилось 37

операций.

1) Построение первоначального эскиза. Выбирая эскиз, уже необходимо хотя бы примерно представлять всю цепочку операций по получению готовой модели, поскольку все вновь создаваемые объемы должны будут пересекаться с первым.

2) Построение базовой 3D-геометрии, определяющей форму изделия.

3) Создание внутренних элементов поршня.

4) Создание дополнительной геометрии. На этом этапе модель доводится до требуемого уровня детализации.

5) Окончательная редакция детали. Удаление лишних элементов, добавление необходимых фасок и скруглений.

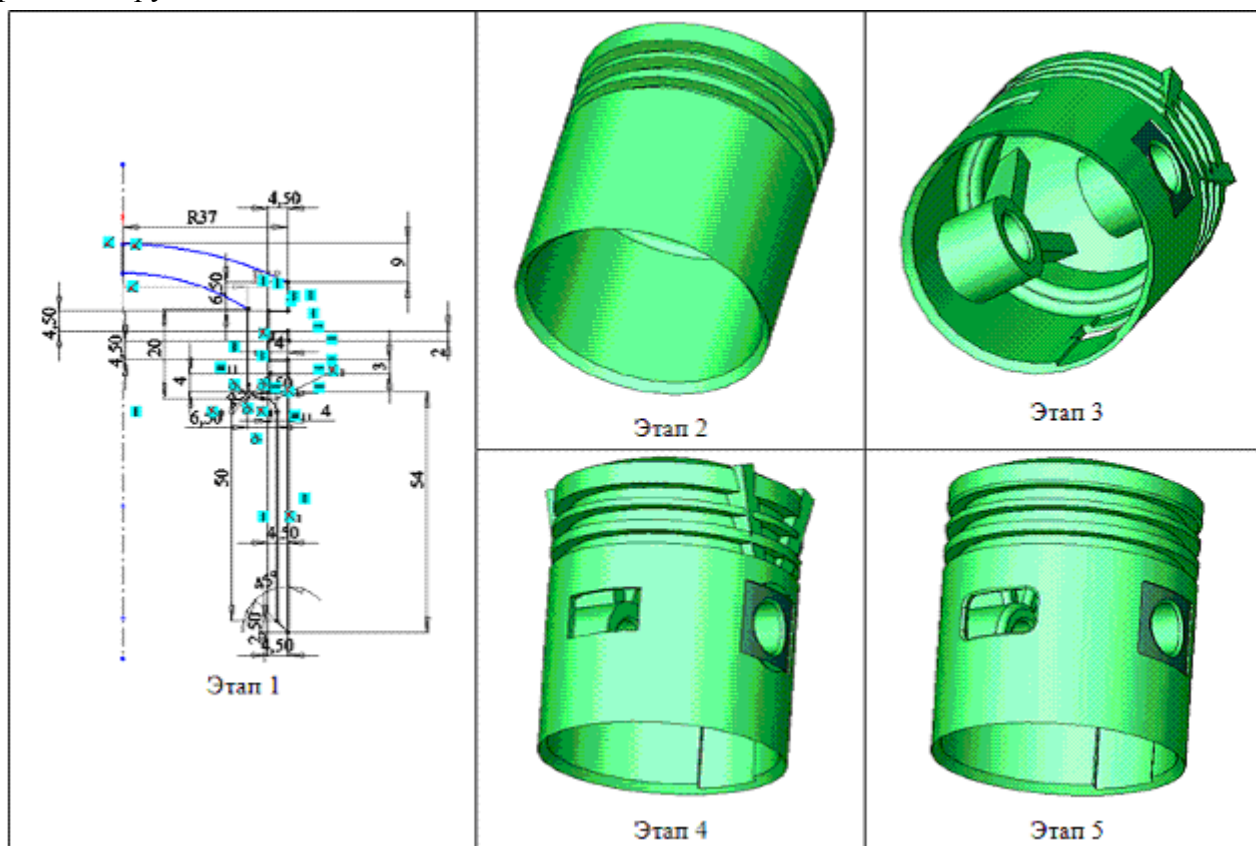


Рис. 10. Этапы создания 3D-модели поршня в программном пакете SolidWorks

При создании данной модели была использована многоуровневая иерархическая структура, представленная на рисунке 11.



Рис. 11. Иерархическая структура модели двигателя Д300

На самом нижнем уровне (см. рисунок 11) находятся простейшие сборочные единицы, такие как подшипники и отдельные детали двигателя, подобные корпусным (см. рисунок 12).

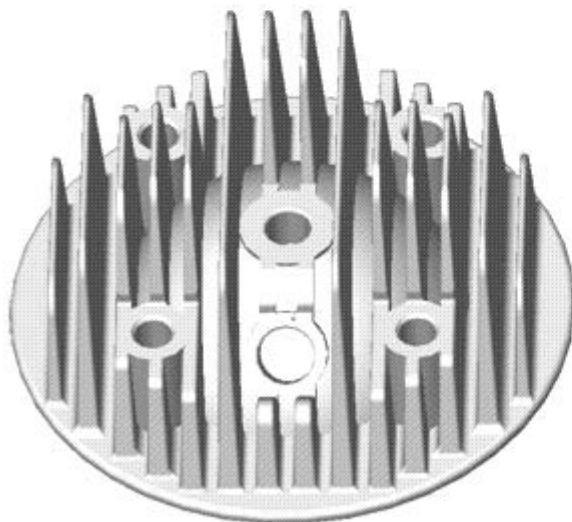
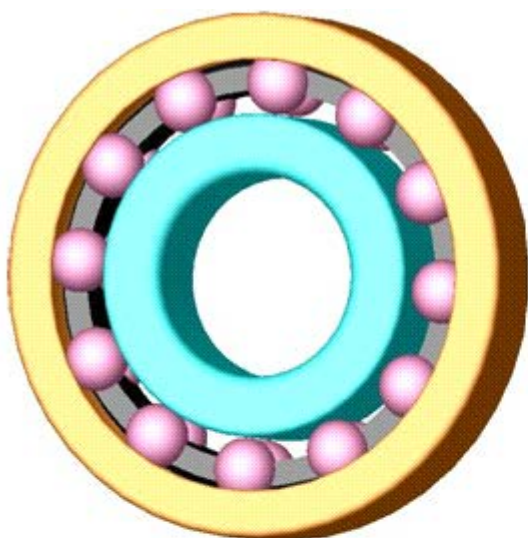


Рис. 12. Детали и сборочные единицы двигателя Д300

Простейшие сборки включаются в более сложные, те - в еще более сложные и т. д. Данная схема, называемая модульной, 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.

Например, подшипники, кольца, шестерни и остальные детали помещаются на коленчатый вал двигателя в сборке среднего уровня, которая называется «Группа вала» (см. [рис.13](#)).

Далее «Группа вала» объединяется с «Группой цилиндра» в сборку высшего (предпоследнего) уровня, которая называется «КШМ и ЦПГ» (см. [рис.14](#)).

В это время по другой ветви структурного дерева (см. рисунок 11) модели происходит сборка корпусов и вспомогательных агрегатов. Наконец, все они объединяются в итоговую сборку «Двигатель Д300». На рисунке 15 представлена модель с четвертьвырезом, на которой хорошо видно внутренне устройство данного двигателя. ([Видео5](#)) После создания геометрии требуется с помощью специального инструмента  задать плотности деталей, по которым автоматически вычисляются массово-инерционные характеристики.

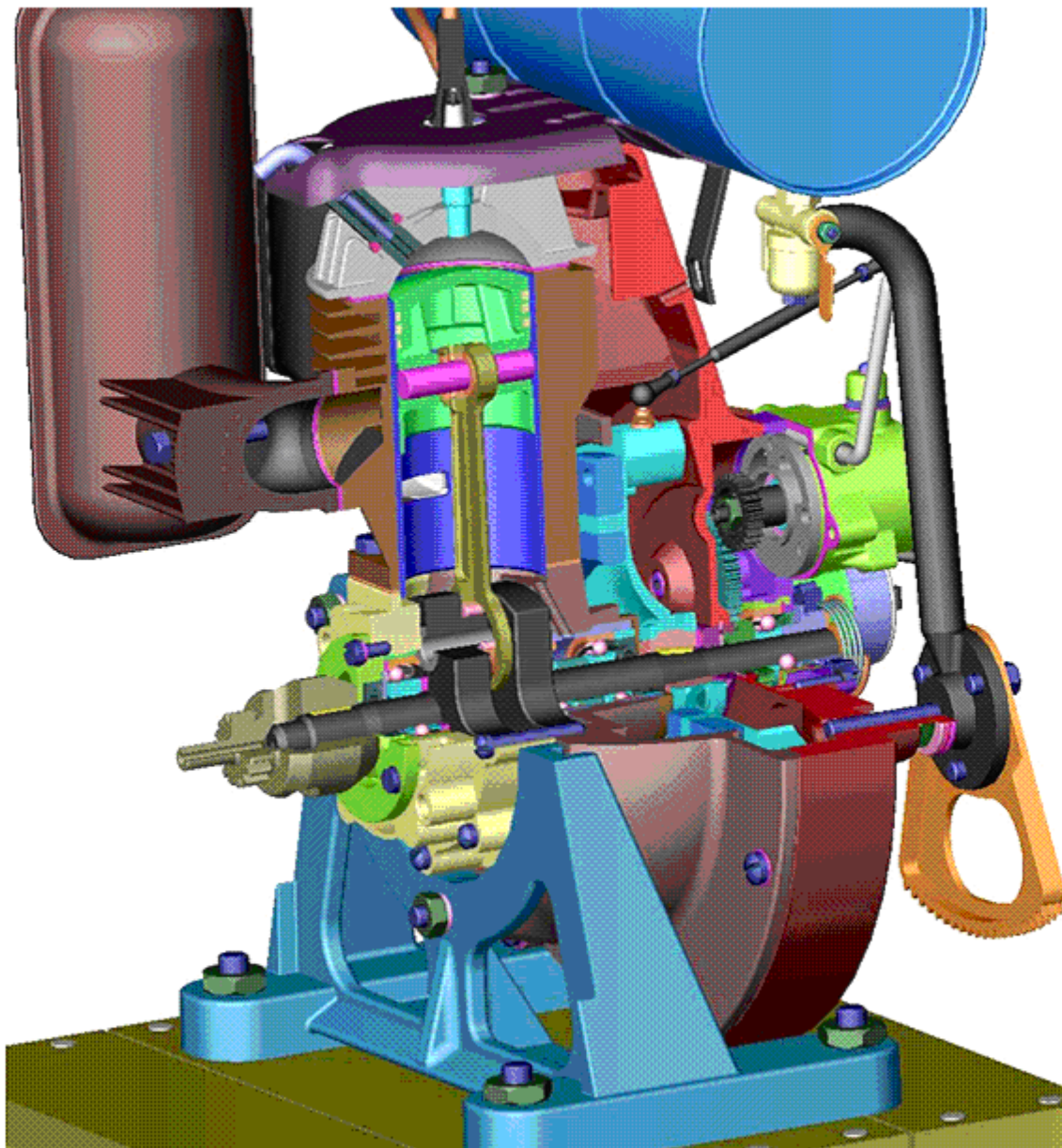
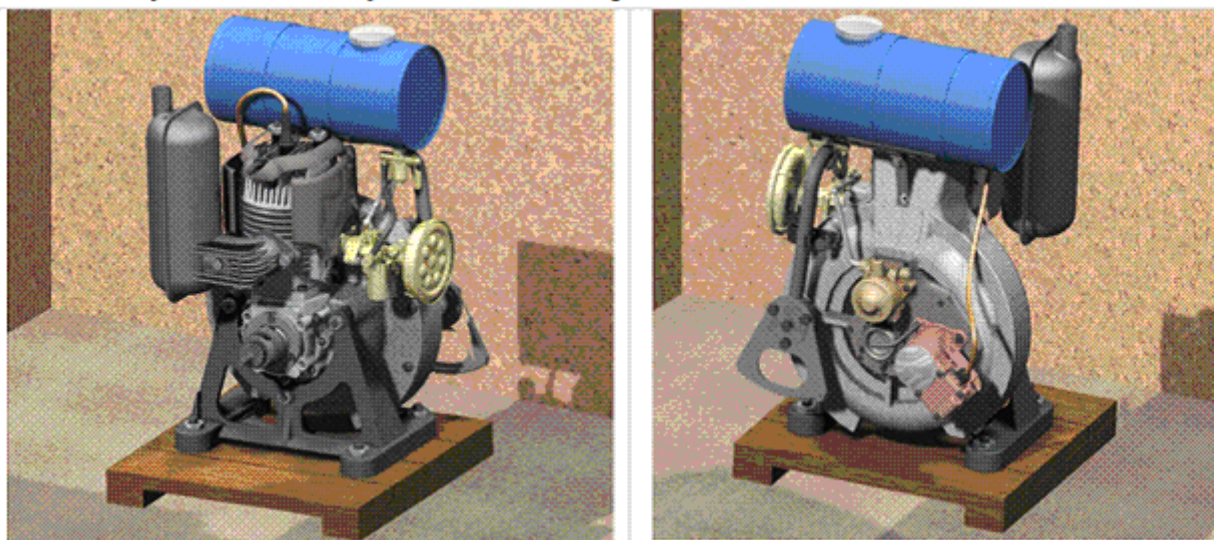


Рис.15. Итоговая сборка двигателя Д300 ([Видео6](#))

№	Группа	Элементов	Примечания
1	Группа вала	25/25	2 сборки
2	Шатунная группа	2/2	1 сборка
3	Поршневая группа	5/6	1 сборка
4	Прокладки	7/8	-
5	Крепежный элемент	23/88	-
6	Подшипники	19/82	4 сборки
7	Корпусные детали	22/47	2 сборки
8	Вспомогательные агрегаты	52/68	6 сборок + Д300
	ВСЕГО В МОДЕЛИ	155/326	16 сборок + Д300

Модель двигателя ([Видео7](#)) в исходной комплектации имеет массу 33,085 кг, что соответствует массе 33 кг, указанной в паспортных данных двигателя.



Ри.16. 3D-модель двигателя Д300, созданная в SolidWorks

Суммируя основные моменты, изложенные в данной работе, можно выделить главные этапы разработанной методики:

I. Сначала строится стержневая, а затем и объемная модель двигателя. Подбираются материалы всех деталей, после чего компьютер вычисляет массово-инерционные характеристики.

Используются программы: SolidWorks, КОМПАС, Unigraphics, ... - любые программы 3D-моделирования, поддерживающие стандарт *Parasolid*.

II. Затем проводится тепловой расчет для определения индикаторной диаграммы, которая в виде газовой силы будет участвовать в динамическом и, в виде давления, в прочностном расчете.

Используются программы: Excel, FloWorks, ... - программы расчета состояния газов.

III. Модель передается на различные расчеты (статический, кинематический, динамический, прочностной, вибрационный и другие) о чем подробнее можно узнать в методическом пособии «Изучение конструкции ДВС с совместным использованием пакетов

ANSYS, ADAMS, SolidEdge».

Приведенная выше методика позволяет значительно снизить время проектирования двигателя, увеличить точность результатов, сократить количество доводочных испытаний и снизить стоимость готовой продукции.

Заключение

Основными преимуществами 3D-моделирования перед 2D- являются: большая информативность, наглядность, возможность создания сборок и удобство компоновки. Для объемной модели возможно создание фотореалистичных изображений и анимации. Если фотореалистичное изображение показывает, как будет выглядеть деталь после производства, то анимация показывает работу механизма, что очень важно для задания условий последующих расчетов.

3D-пакеты постоянно совершенствуются, позволяя описывать самую сложную геометрию. В САД-пакетах возможно создание полной модели таких сложных систем, как авиационные поршневые и газотурбинные двигатели. Роль подобного моделирования в мире очень высока благодаря его огромной универсальности, позволяющей находить применение в большинстве отраслей промышленности. Положительное влияние на 3D-моделирование оказало также использование приборов, позволяющих снимать точные цифровые копии объемных предметов.

Немаловажно, что только 3D-модель может быть передана в САЕ-пакеты для проведения кинематических, динамических, прочностных и прочих видов расчета. Поэтому на базе объемной геометрии формируются методы полностью автоматизированных алгоритмов проектирования, создающих непрерывную цепочку от первоначальной идеи конструктора до утилизации отслужившего изделия.

Контрольные вопросы

А. Теоретические вопросы

1. Опишите процессы газообмена у данного двигателя, используя описание конструкции и 3D-модель.
2. Какова конструкция системы охлаждения ДВС Д300?
3. Какие основные вспомогательные агрегаты установлены на двигателе?
4. Чем эскизные булевы операции (пакет **SolidWorks**) отличаются от объемных (пакет **ADAMS**)?
5. Каким образом в 3D-пакете определить массово-инерционные характеристики?
6. Опишите структуру модели Д300. Какой метод использовался и почему?

Б. Практические задания

1. Соберите КШМ Д300 из готовых деталей.
2. Назовите и охарактеризуйте основные этапы алгоритма безбумажного проектирования.
3. Постройте простейший поршень в САД-пакете.
4. Продемонстрируйте работу конструкции в **SolidWorks**. Оцените корректность работы.
5. Средствами САД-пакета создайте двумерный чертеж фронтального вида шатуна двигателя Д300 по его трехмерной модели.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Методического пособия «Изучение конструкции двигателей с использованием 3D-моделей их элементов. Часть 1: ДВС»

1. Гвоздев Александр Сергеевич, ассистент кафедры «Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов» СГАУ. 267-46-75,
2. Мелентьев Владимир Сергеевич, ассистент кафедры «Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов» СГАУ. 267-46-75,
3. Лежин Дмитрий Сергеевич, к.т.н., доцент кафедры «Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов» СГАУ. 267-46-75.