

№ лекции	Темы лекционных занятий
1	Методы и технологии конструирования изделий.
2	Основы геометрического моделирования деталей.
3	Поверхностное моделирование объектов.
4	Твёрдотельное моделирование объектов.
5	Моделирование объёмных сборок.
6	Инженерный анализ методом конечных элементов.
7	Методы и технологии прототипирования
8	Операционные технологические процессы для обработки на станке с ЧПУ.
9	Особенности 5-координатной обработки.

Основы геометрического моделирования деталей

- Твёрдотельное моделирование объектов.*
- Понятие твердого тела.*
- Основные подходы твердотельного моделирования.*
- Методы построения 3D моделей.*
- Геометрические операции.*
- Параметризация геометрических моделей.*

4 Твёрдотельное моделирование объектов

Геометрические объекты, у которых все размеры ненулевые, принято называть **твёрдотельными**, а моделирование таких тел называется **твёрдотельным**.

Реальные объекты всегда имеют определенный объем. Твёрдое тело содержит внутренний объем, **ограниченный внешней поверхностью тела**. Такое представление позволяет определять объем изделия, его массу, моменты инерции, центр тяжести и т.п. Эти параметры зачастую являются критериями оптимальности при оценке эффективности конструкции изделия и необходимы для инженерных расчетов и проектирования технологии.

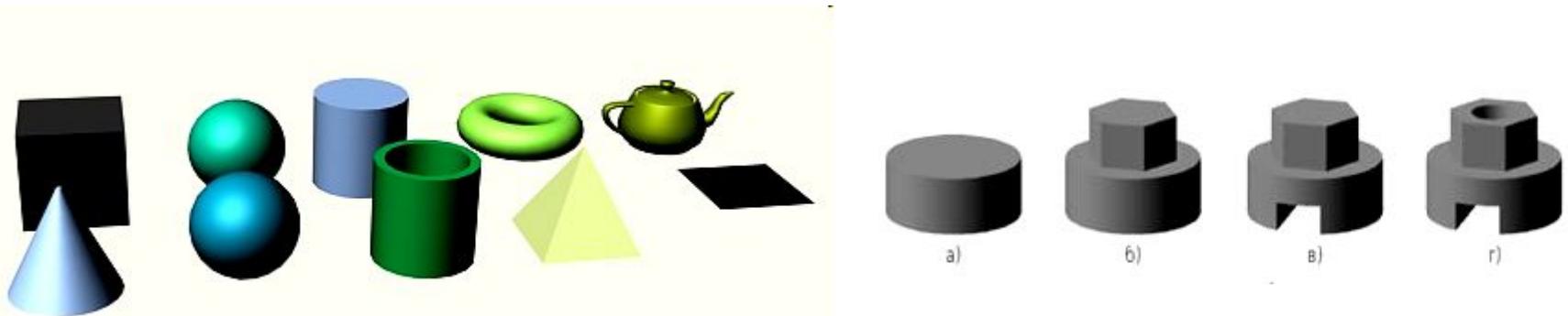
В отличие от поверхностного моделирования, в процессе твёрдотельного моделирования необходимо однозначно **установить внутреннюю и внешнюю части поверхности** и проверить, чтобы все поверхности составляли при этом замкнутое внутреннее пространство без щелей и разрывов.

4.1 Основные подходы твёрдотельного моделирования

1) Конструктивная твёрдотельная геометрия (Constructive Solid Geometry, или использование базовых элементов формы) оперирует простейшими объемными примитивами, к которым относят *прямоугольную призму, треугольную призму, сферу, цилиндр, конус и тор*.

Над этими примитивами и полученными из них телами можно выполнять математически хорошо отработанные **булевы операции** и автоматически получить линии их пересечения в аналитической форме.

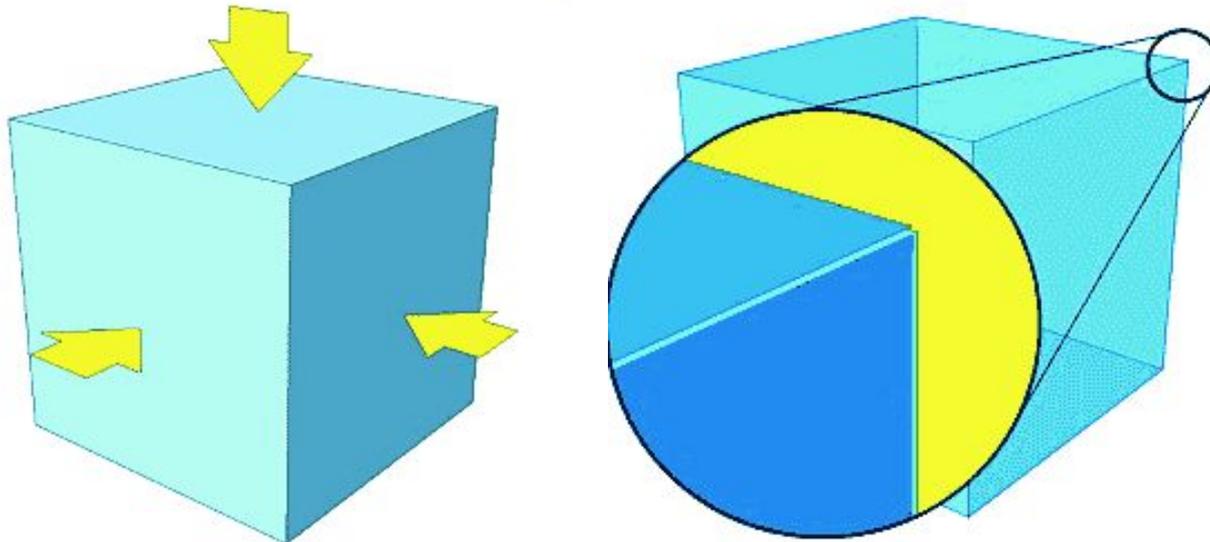
Конструктивная твёрдотельная геометрия позволяет успешно моделировать большинство промышленных деталей. Этот подход гарантирует построение правильных твердых тел и покрывает 60-70% потребностей моделирования, но оставшаяся часть требует использования поверхностей.



4.1 Основные подходы твёрдотельного моделирования

2) Представление с помощью границ (Bounded representation или B-rep). Математически представляет собой наиболее общий подход к описанию объемных тел и состоит в представлении тела совокупностью **ограничивающих его объем произвольных поверхностей**. Границы объекта (вершины, ребра, грани, оболочки) хранятся в памяти компьютера в параметризованном виде и должны точно стыковаться друг с другом.

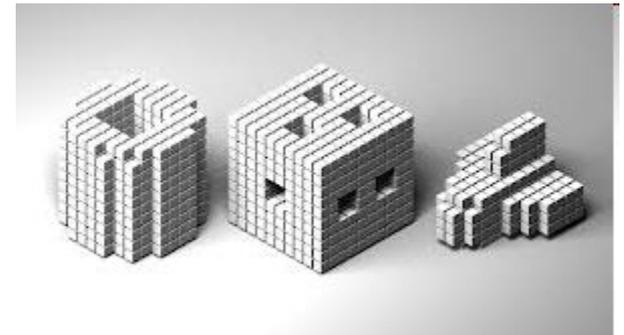
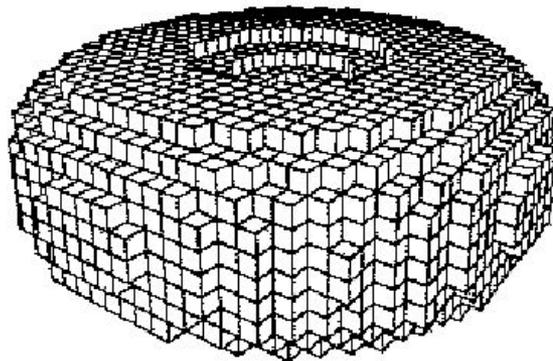
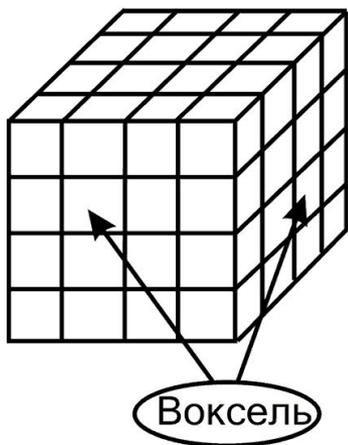
Достоинством этого подхода выступает то, что представление тел с помощью границ позволяет моделировать объекты произвольной формы и сложность стыковки поверхностей составляет серьезную проблему. Так



4.1 Основные подходы твёрдотельного моделирования

3) Позиционный подход к описанию объемных тел - это подход, в соответствии с которым все рабочее пространство разбивается на элементарные объемы (ячейки, воксели, voxel) и деталь задает указанием заполненных или пустых ячеек, т.е. геометрически описывается простейший объемный элемент, например куб, задаются координаты базовых точек всех элементов и топологическая информация об их объединении.

Воксельное представление позволяет описать объемное тело с любой степенью погрешности в зависимости от числа использованных ячеек. В пределе, когда число вокселей стремится к бесконечности, модель становится точной, но ее размерность также бесконечно возрастает.

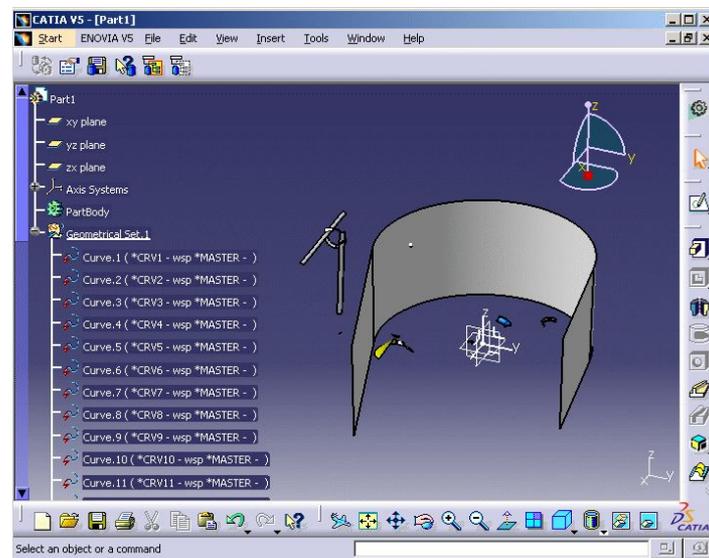
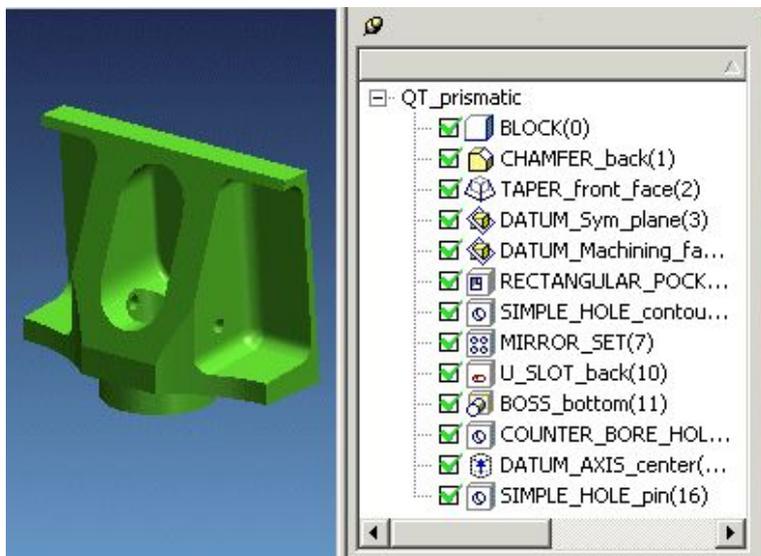


4.2 Методы построений 3D-моделей

4.2.1 Управление геометрическими моделями

В универсальных САД-системах трехмерная модель формируется и управляется пользователем с использованием «**дерева построения**» (иначе называемого: *дерево конструирования* — *Feature manager*, *дерево модели* — *Model Tree*, *навигатор модели* — *Model Navigator*).

Дерево построения можно считать графо-аналитической моделью процесса построения геометрической модели - наглядное изображение алгоритма получения модели. В дереве построения представлена вся последовательность составляющих моделируемое тело объектов и операций с ними.

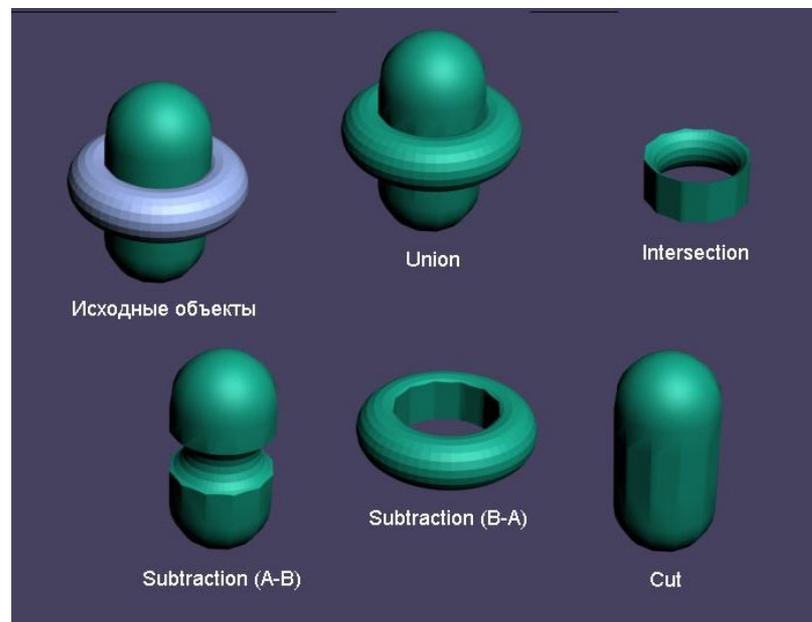
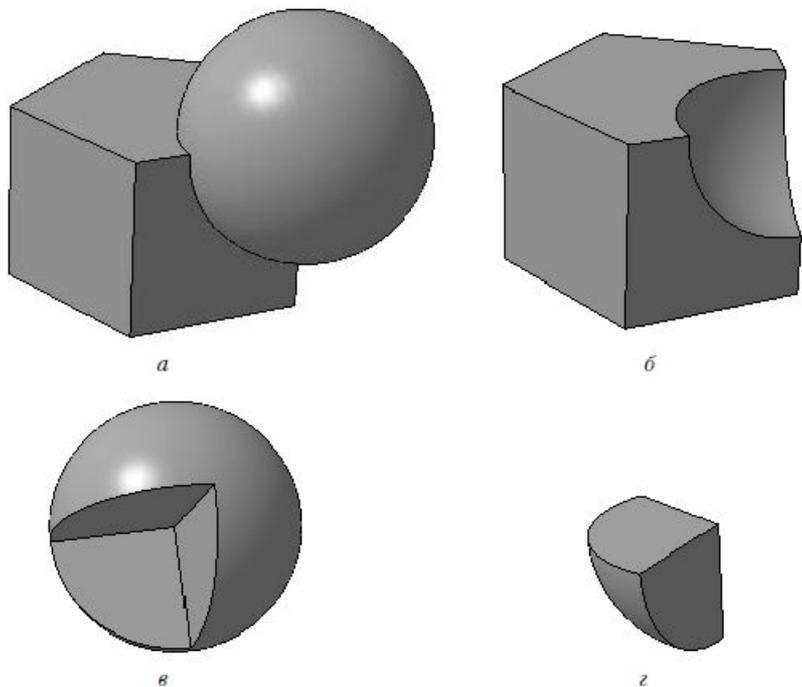


4.2 Методы построений 3D-моделей

4.2.2 Булева геометрия

Для диалогового процесса геометрического 3D-моделирования тел удобно применять булевы операции математической логики:

- объединения (*Unit*);
- пересечения (*Intersection*);
- вычитания (*Subtract*).



4.2 Методы построений 3D-моделей

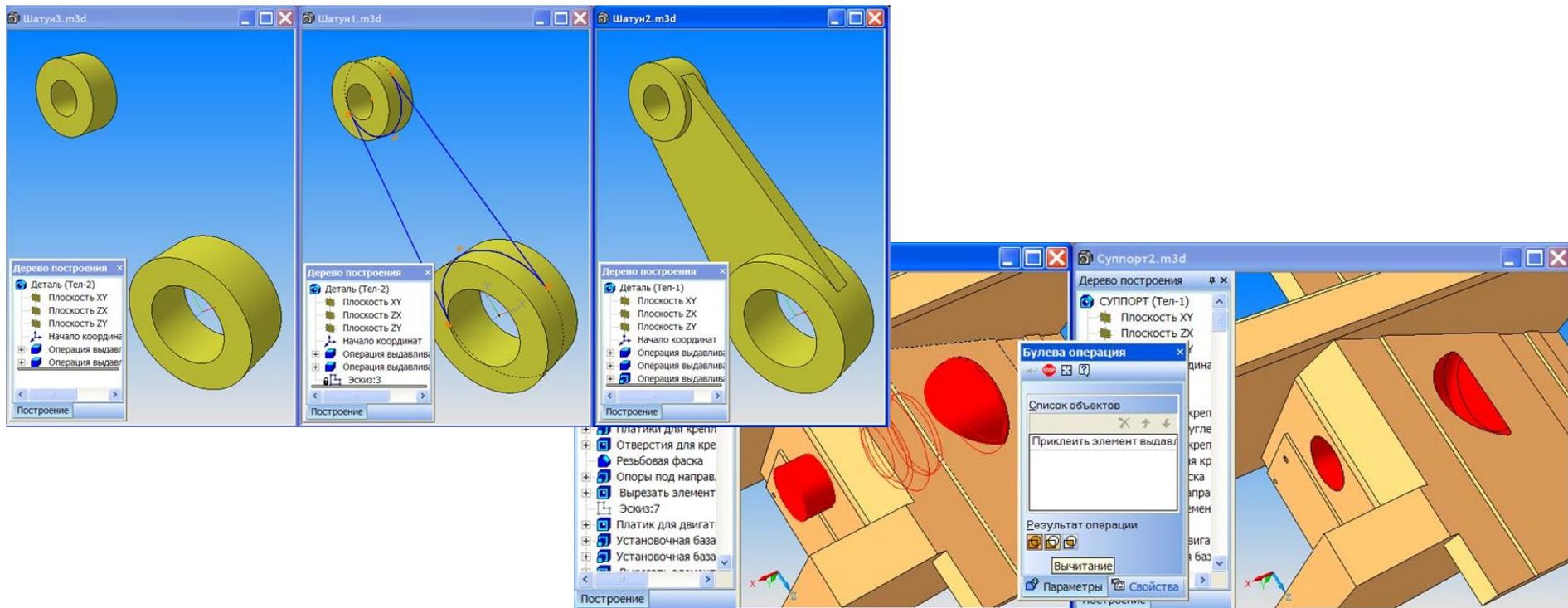
4.2.3 Многотельное моделирование

«**Многотельные**» геометрические модели состоят из нескольких объёмных тел, разделённых в пространстве.

Приёмы многотельного моделирования:

- моделирование с нескольких сторон;
- создание тел вычитанием.

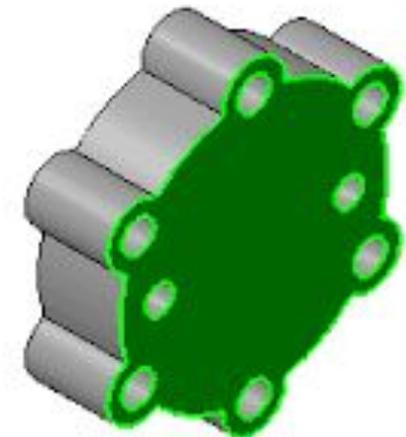
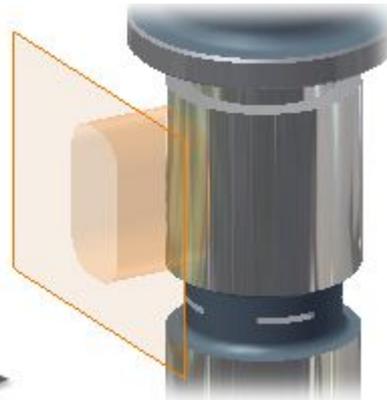
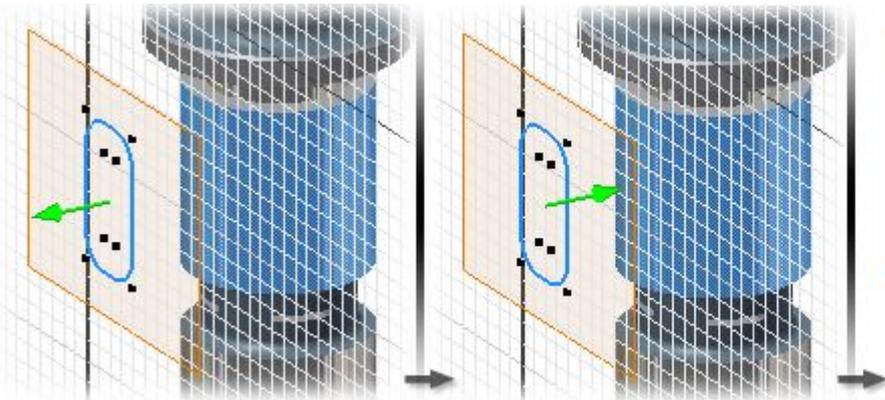
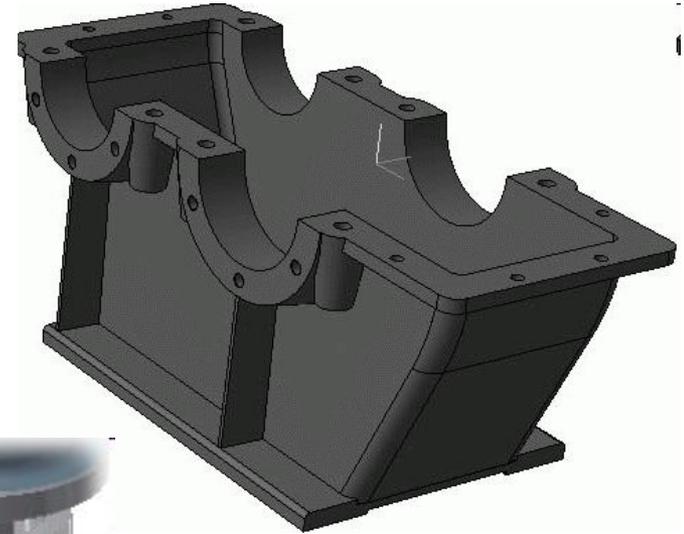
Многотельное моделирование позволяет существенно расширить возможности построения деталей и снимает ограничения на создание моделей с помощью логических операций.



4.3 Геометрические операции

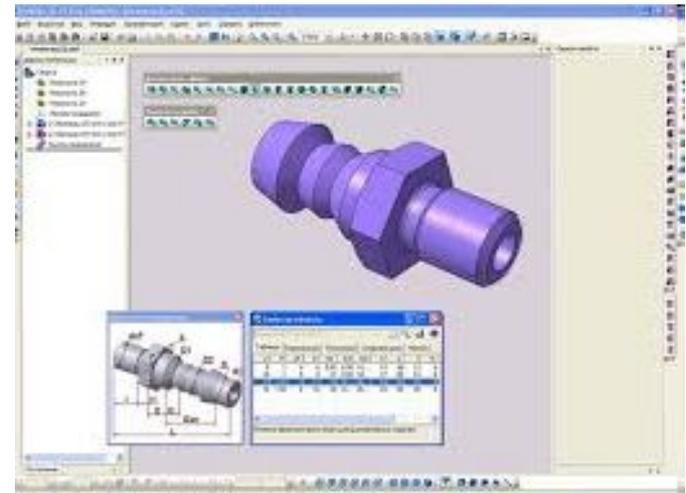
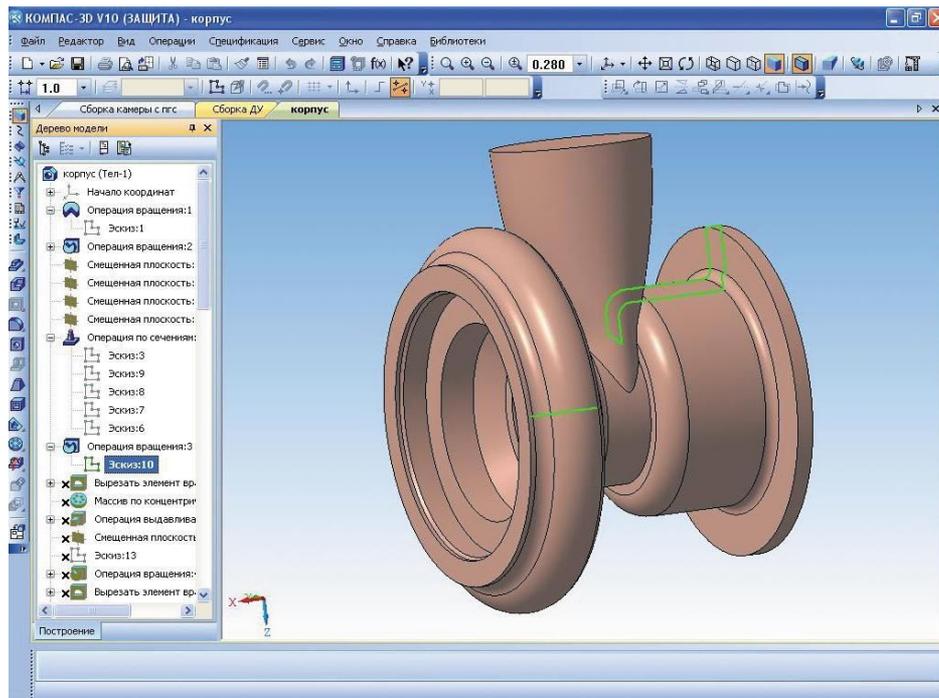
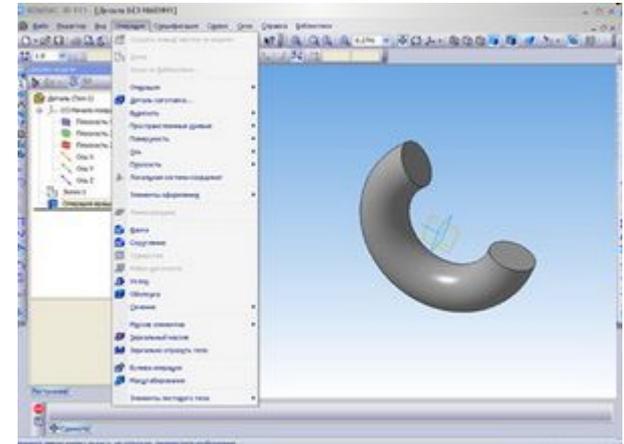
4.3.1 Операция выдавливания (Extrude)

- выдавливание на определенное расстояние;
- выдавливание «через всё»;
- выдавливание до указанной поверхности;
- выдавливание до ближайшей поверхности;
- выдавливание до уровня указанной вершины.



4.3 Геометрические операции

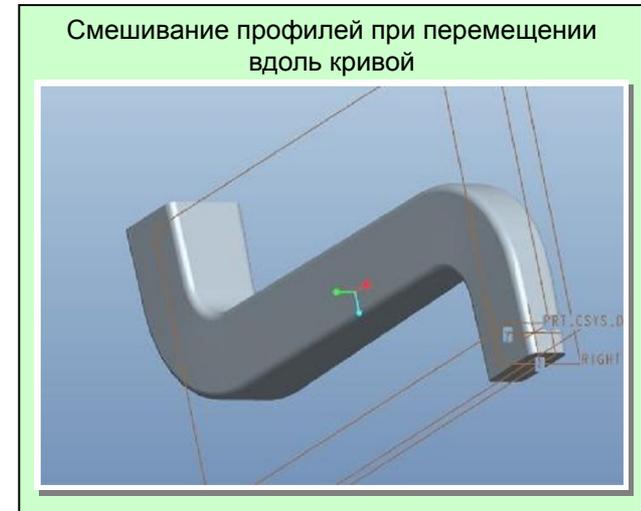
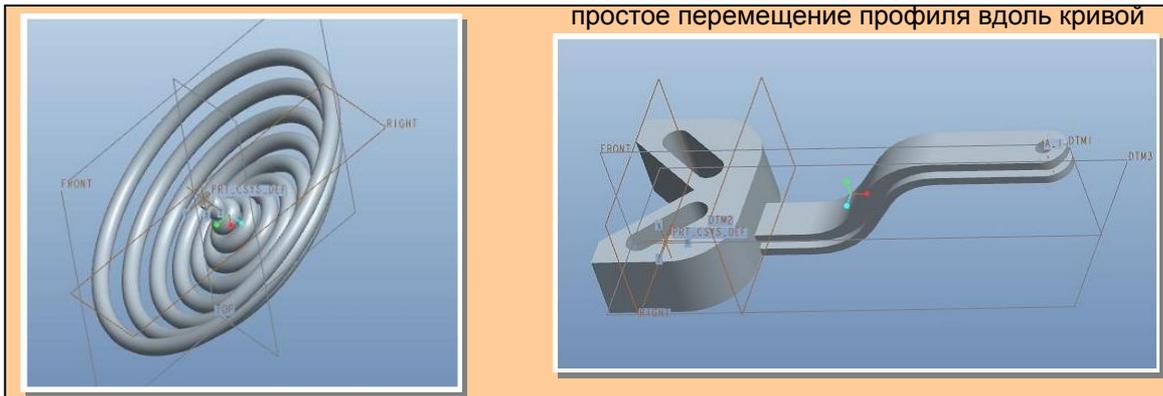
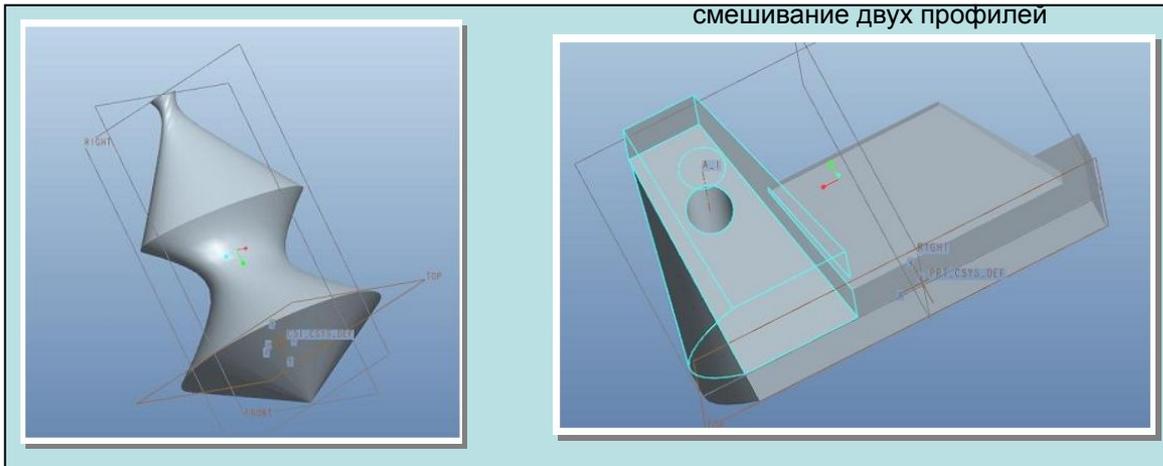
4.3.2 Операция вращения (Revolve)



4.3 Геометрические операции

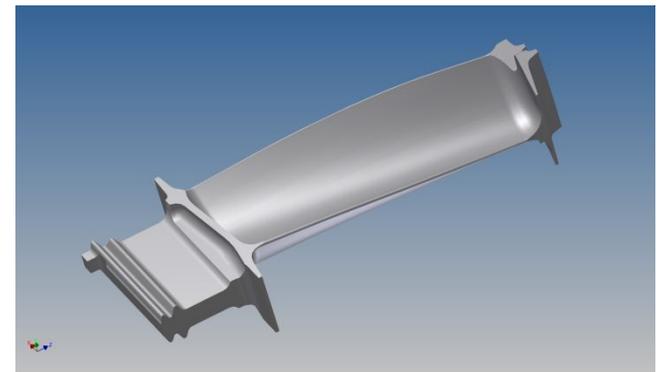
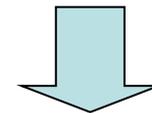
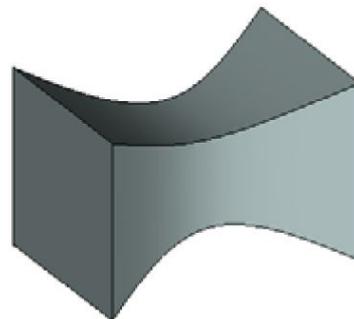
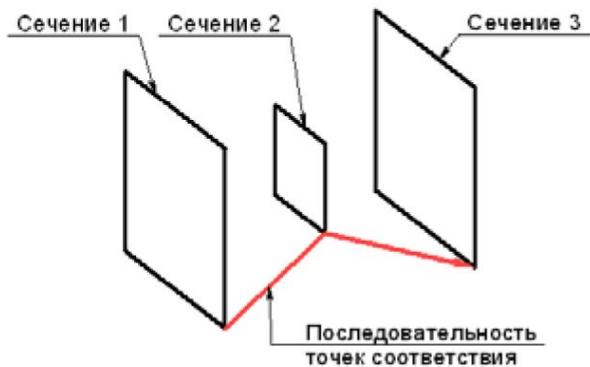
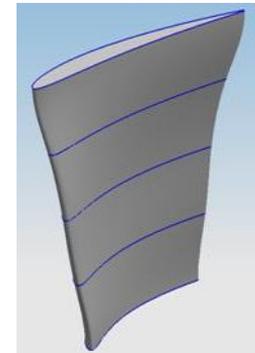
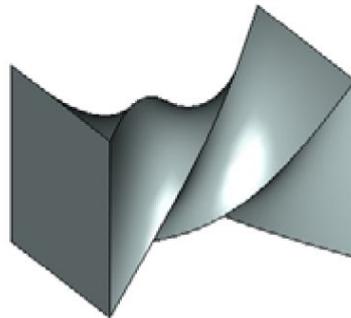
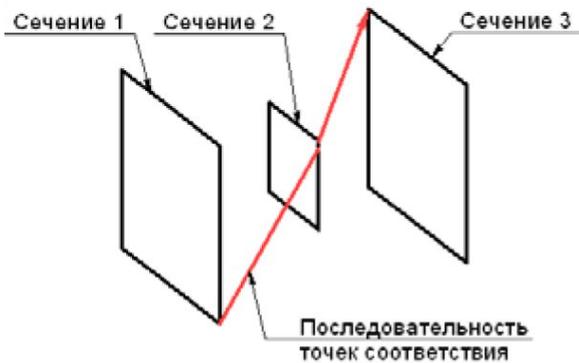
4.3.3 Кинематическая операция (Sweep)

- *вращение;*
- *простое перемещение – выдавливание;*
- *смешивание двух профилей;*
- *простое перемещение профиля вдоль кривой;*
- *перемещение профиля вдоль кривой с его изменением в плоскости сечения.*



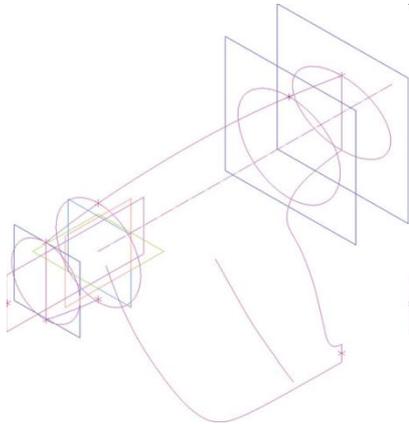
4.4 Геометрические операции

4.3.4 Операция по сечениям (Blend, Loft)

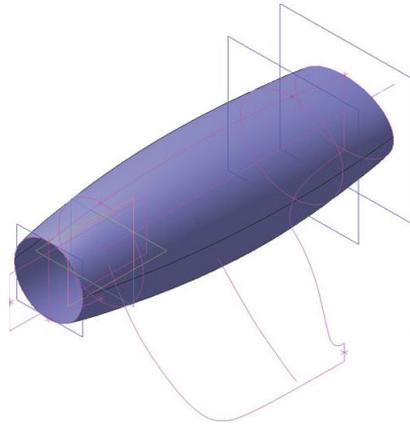


4.5 Гибридное моделирование

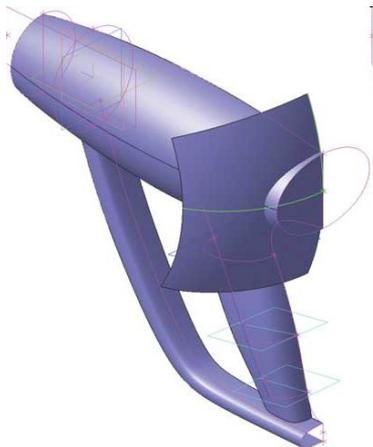
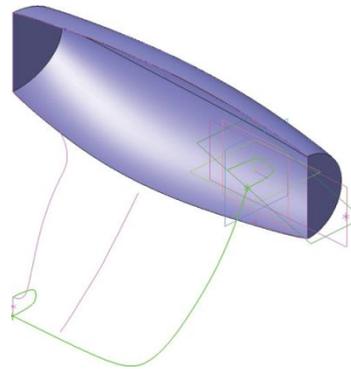
Гибридное моделирование объединяет в себе как твердотельное, так и поверхностное моделирование. Поверхности могут служить основой для создания твердых тел и для их редактирования. Аналогично, твердые тела могут быть использованы для создания поверхностей и для их изменения.



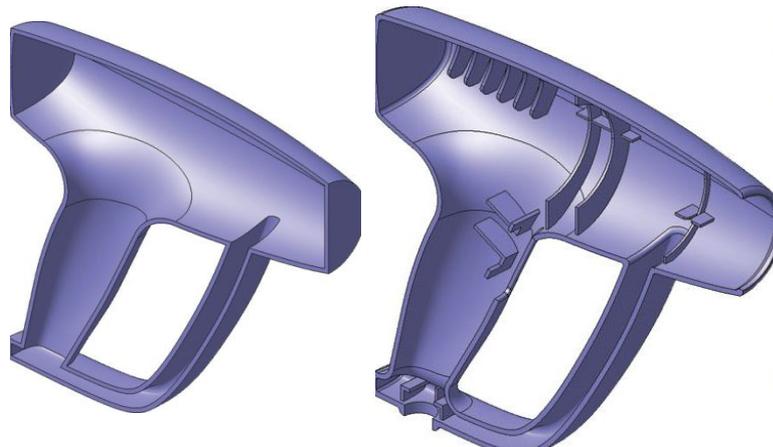
Кривые



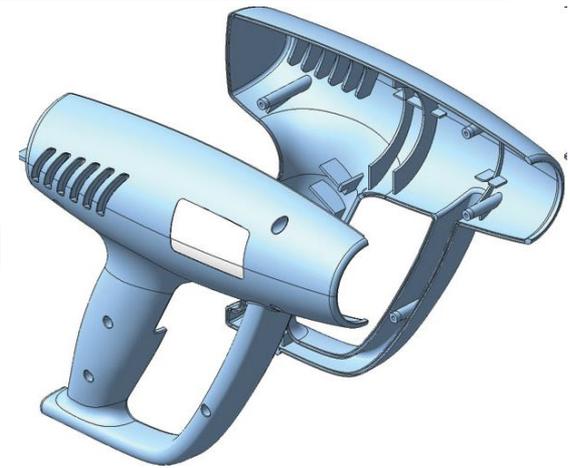
Кривые и поверхности



Поверхности



Твёрдые тела



Сборочная единица

4.6 Конвергентное моделирование

Конвергентное моделирование – объединение гибридного и фасетного моделирования в единую среду.

4.7 Ошибки моделирования

http://help.solidworks.com/2010/RUSSIAN/SolidWorks/sldworks/LegacyHelp/Sldworks/ErrorMsgs/Error_Messages_Overview.htm?id=c9bc4137d0cd42fb946f52ae2b0c3a27#Pg0

4.7 Параметризация геометрических моделей

Геометрические модели, в которых не сохраняются связи между составляющими их элементами и отсутствуют какие-либо правила и ограничения на операции построения и редактирования, называют **непараметрическими**.

Непараметрические модели наиболее удобны для большинства инженерных приложений плоской графики: автоматизации разработки технических рисунков, эскизов, чертежей и оформления проектно-конструкторской документации.

Геометрическую параметризацию можно определить как процесс наложения взаимных связей и ограничений на элементы геометрической модели с целью её дальнейшей целенаправленной модификации.

Ассоциативность геометрических объектов подразумевает принадлежность и подчиненность одного объекта другому. Ассоциативными могут быть объекты, которые при построении привязываются (объединяются с помощью механизма привязок) к другим объектам — размеры, технологические обозначения, штриховки и т.д.

Под **ограничениями**, наложенными на геометрические объекты, подразумеваются ограничения возможностей изменения параметров каждого отдельного объекта.

Параметризация геометрических моделей

Типы двумерных параметрических связей и ограничений:

- вертикальность прямых и отрезков;
- горизонтальность прямых и отрезков;
- фиксация характерных точек объектов;
- фиксация размеров;
- параллельность прямых и отрезков;
- перпендикулярность прямых и отрезков;
- коллинеарность отрезков;
- выравнивание характерных точек объектов по вертикали;
- выравнивание характерных точек объектов по горизонтали;
- зеркальная симметрия графических объектов;
- равенство радиусов дуг и окружностей;
- равенство длин отрезков;
- касание кривых;
- объединение характерных точек объектов;
- принадлежность точки кривой;
- присвоение размеру имени переменной;
- задание аналитических зависимостей между переменными.

Параметризация геометрических моделей

Программная параметризация (алгоритмическая параметризация, program parametric) включает в себя создание графических и геометрических моделей на ЭВМ программным путем на универсальных алгоритмических языках или специальных языках графического программирования.

Например, фирма Autodesk разработала для этих целей специальный проблемно-ориентированный язык программирования AutoLisp. В настоящее время практически все промышленные САПР снабжены подсистемами API (Application Programming Interface) - интерфейсами прикладного программирования.

Ядро	Доступно с	Разработчик	САПР, основанные на ядре
ROMULUS	1982	Shape Data	HP ME30, CAM-I A
Designbase	1986	Ricoh	CADRA, Helix, ICAD, GMSWorks
ACIS	1989	Spatial (Dassault Systemes)	ADEM, Alibre Design, Bricscad, Creo Elements/Direct (частично), IRONCAD, KeyCreator, TurboCAD, SpaceClaim
Parasolid	1989	Siemens PLM Software	IRONCAD, KeyCreator, MicroStation, NX, Solid Edge, SolidWorks, T-FLEX
SMLib	1998	Solid Modeling Solutions	?
Open CASCADE	1999	OPEN CASCADE (Areva)	CAD-Schroer, FreeCAD
GRANITE	2001	PTC	Creo Elements/Pro (Pro/Engineer)
SOLIDS++	2004	IntegrityWare	Rhino (частично)
CGM	2010	Dassault Systemes	CATIA V5, V6, SolidWorks V6

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ЯДРА САПР

- С точки зрения программиста **геометрическое ядро** — это библиотека **функций/классов** для создания **геометрических объектов** (точка, отрезок/дуга/кривая, кусок поверхности, твердое тело), изменения их **форм и размеров**, создания на их основе новых объектов, **визуализации** модели на экране компьютера и обмена **трехмерными данными** с другими программами



КОММЕРЧЕСКИЕ ЯДРА

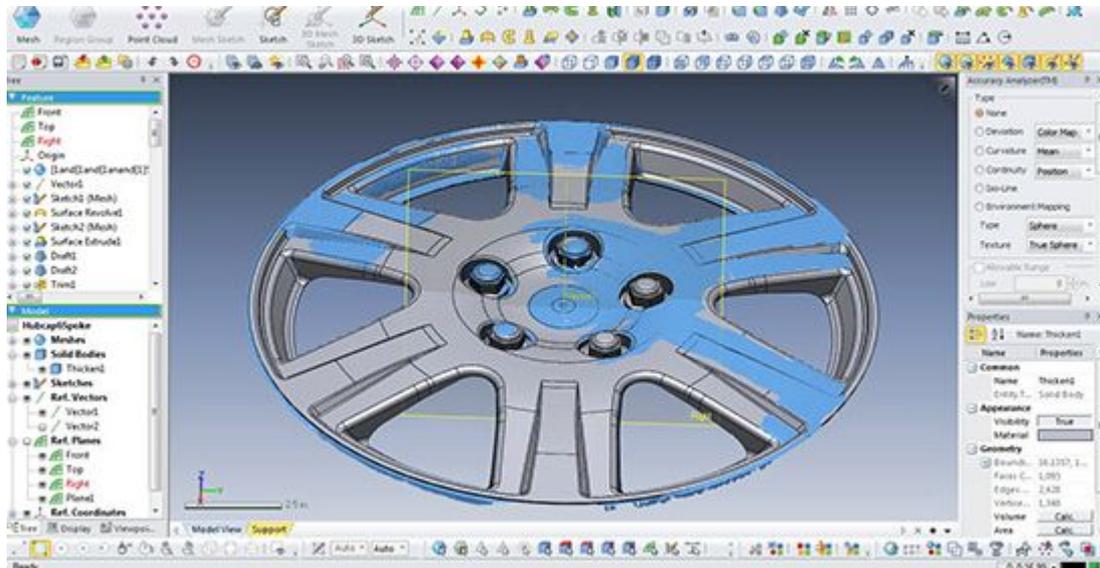
Ядро	Доступно с	Разработчик	САПР, основанные на ядре
ROMULUS	1982	Shape Data	HP ME30, CAM-I A
Designbase	1986	Ricoh	CADRA, Helix, ICAD, GMSWorks
ACIS	1989	Spatial (Dassault Systemes)	ADEM, Alibre Design, Bricscad, Creo Elements/Direct (частично), IRONCAD, KeyCreator, TurboCAD, SpaceClaim
Parasolid	1989	Siemens PLM Software	IRONCAD, KeyCreator, MicroStation, NX, Solid Edge, SolidWorks, T-FLEX
SMLib	1998	Solid Modeling Solutions	?
Open CASCADE	1999	OPEN CASCADE (Areva)	CAD-Schroer, FreeCAD
GRANITE	2001	PTC	Creo Elements/Pro (Pro/Engineer)
SOLIDS++	2004	IntegrityWare	Rhino (частично)
CGM	2010	Dassault Systemes	CATIA V5, V6, SolidWorks V6

Параметризация геометрических моделей

Параметризация по истории построения (иерархическая параметризация, history-based design) состоит в том, что при включении этого режима работы автоматически, по мере выполнения команд создания объектов модели, фиксируются связи и порождаются ограничения, определяемые приемами интерактивной работы пользователя.

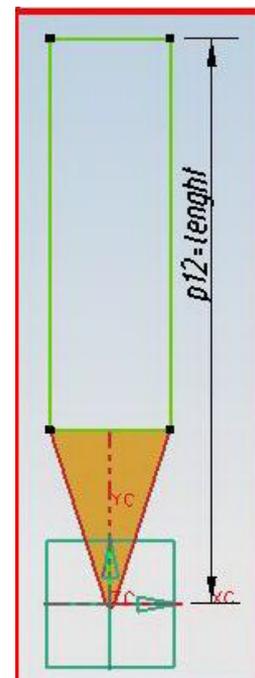
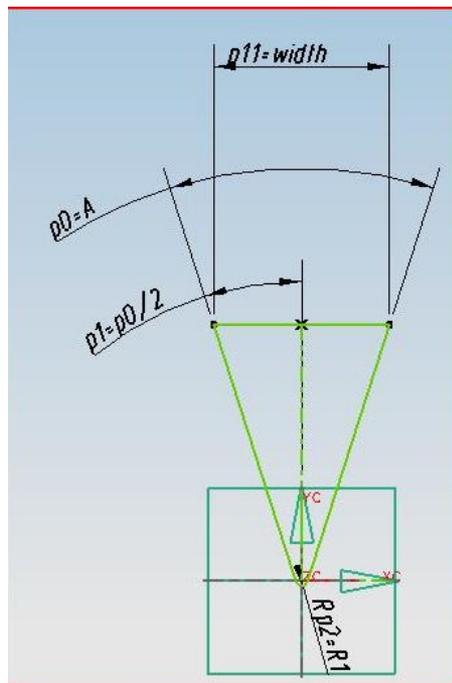
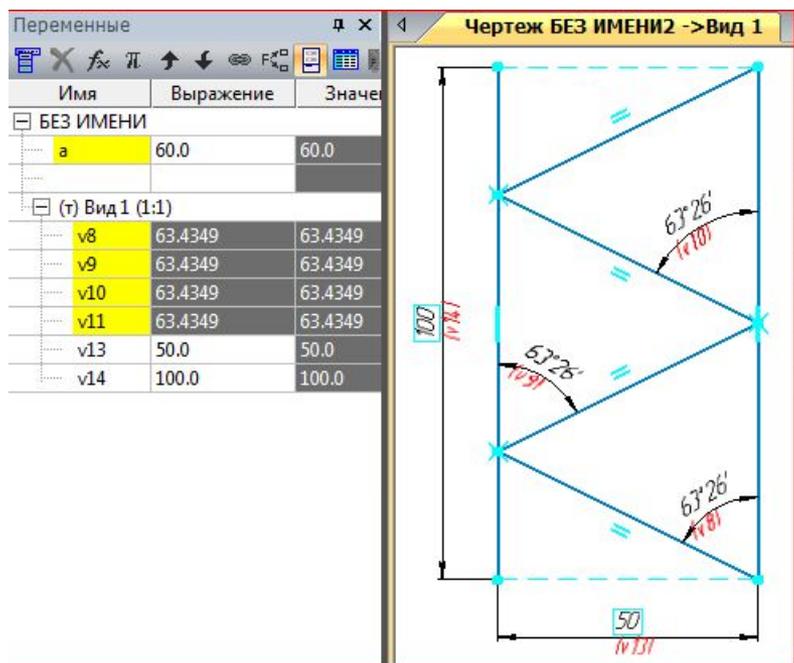
Недостатки иерархической параметризации:

- Введение циклических зависимостей в модели приведет к невозможности создания такой модели.
- Ограничены возможности редактирования модели из-за отсутствия достаточной степени свободы (возможность редактирования параметров каждого элемента по очереди).
- Сложность и непрозрачность для пользователя.
- Дерево построения может быть очень сложным, пересчет модели потребует много времени.
- Решение о том, какие параметры менять происходит только в процессе построения.



Параметризация геометрических моделей

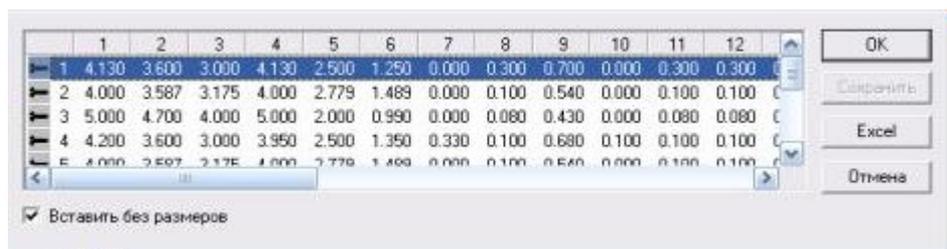
Эскизная параметризация (вариационная параметризация, variational) предусматривает установление связей между элементами, наложение ограничений и задание переменных, выражений и зависимостей самим пользователем системы геометрического моделирования в диалоговом режиме или автоматически — с помощью алгоритмов искусственного интеллекта, как в синхронном моделировании.



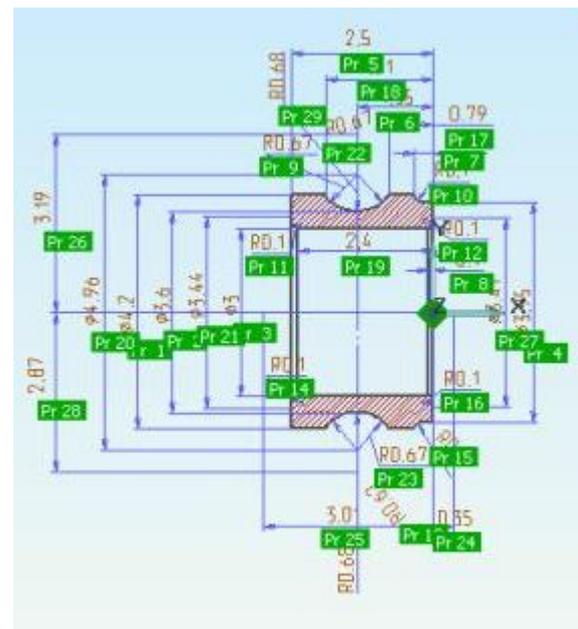
Параметризация геометрических моделей

Табличная параметризация заключается в создании таблицы параметров типовых деталей. Создание нового экземпляра детали производится путём выбора из таблицы типоразмеров.

Возможности табличной параметризации ограничены, поскольку задание произвольных новых значений параметров и геометрических отношений обычно невозможно. Табличная параметризация находит широкое применение во всех параметрических САПР, поскольку позволяет существенно упростить и ускорить создание библиотек стандартных и типовых деталей, а также их применение в процессе конструкторского проектирования.



Имя экземпляра	d16	d17	F199	F248	F372	ПРИМЕЧАНИЕ	СТАНДАРТ
	ДЛИНА БОЛТА	ДИАМЕТР БО.	ШЕСТИГРАНН.	ЗВЕЗДОЧКА	[ФАСКА_1]		
BOLT	15.0000	4.5000	Y	Y	Y	Шестигранник	БОЛТ5х15
BOLT_5_28	28.0000	5.0000	N	Y	N	Звёздочка	БОЛТ5х28
BOLT_5_24	24.0000	5.0000	N	Y	N	Звёздочка	БОЛТ5х24
BOLT_5_18	18.0000	5.0000	N	Y	N	Звёздочка	БОЛТ5х18
BOLT_6_30	30.0000	6.0000	Y	N	Y	Шестигранник	БОЛТ6х30
BOLT_6_40	40.0000	6.0000	Y	N	Y	Шестигранник	БОЛТ6х40
BOLT_6_30	30.0000	6.0000	Y	N	Y	Шестигранник	БОЛТ6х30
BOLT_6_30	30.0000	6.0000	Y	N	Y	Шестигранник	БОЛТ6х30
BOLT_4_15	15.0000	4.0000	Y	N	Y	Шестигранник	БОЛТ4х15
BOLT_5_30	30.0000	5.0000	Y	N	Y	Шестигранник	БОЛТ5х30



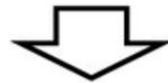
4.8 Данные в САПР

Данные чертежа:

- Векторное описание линий;
- Пояснительные данные (размеры, символы, комментарии)

- Данные 3D модели

Описание этих данных в САПР хранится в **собственных файловых форматах**, соответствующих собственной структуре данных.

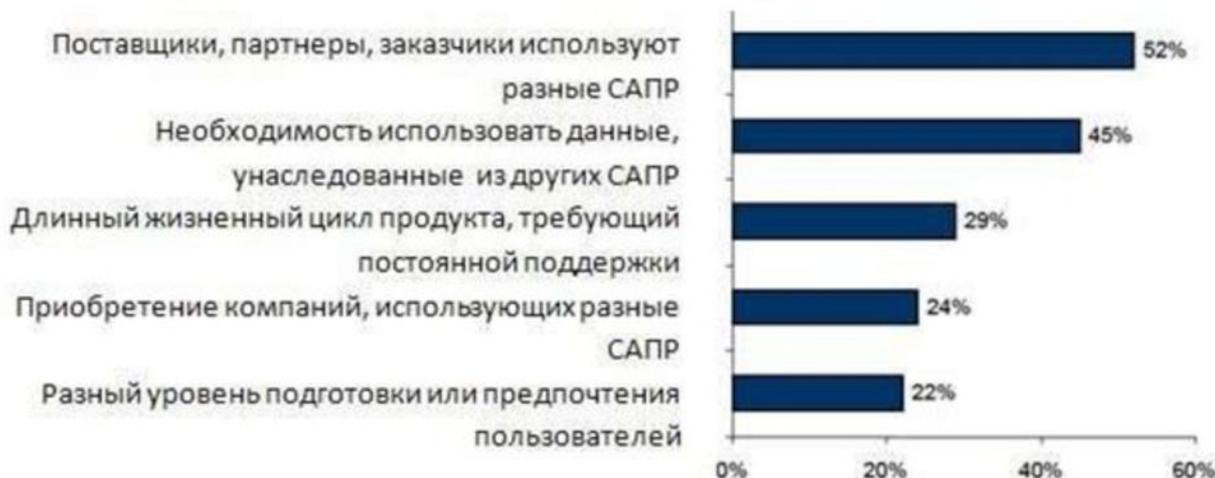


Проблема одновременного использования данных

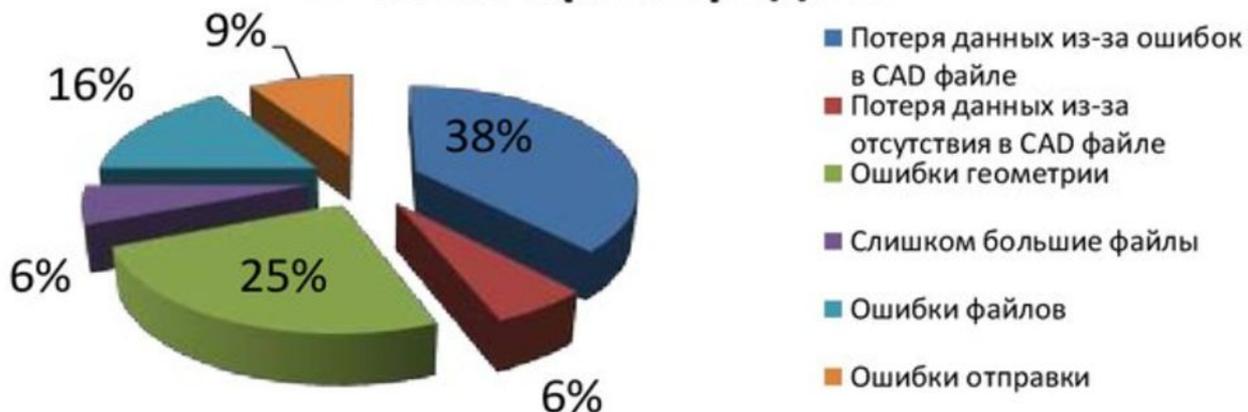
НЕОБХОДИМОСТЬ РАЗНЫХ САПР

По данным 2010 года **42%** компаний использовали в повседневной работе более **пяти** форматов САПР одновременно

Причины использования разных САПР

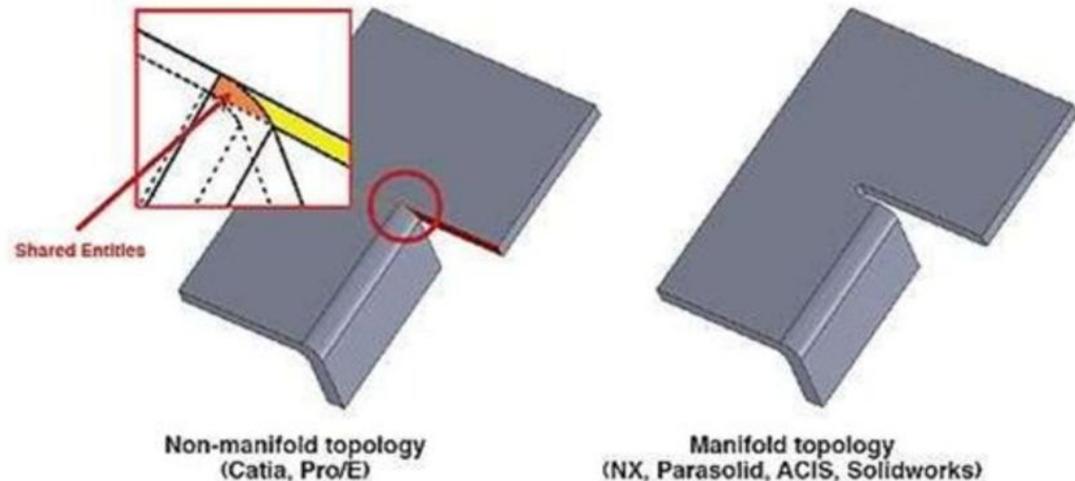


Ошибки при передаче



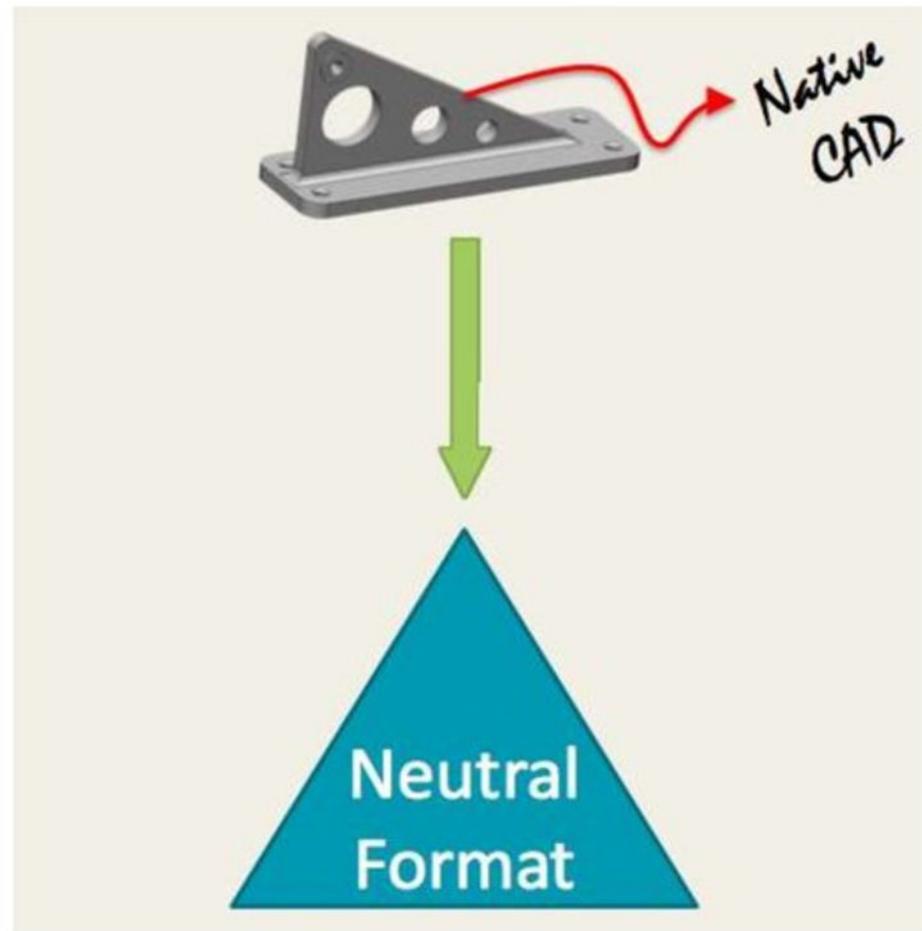
КОНВЕРТЕРЫ

- Позволяют **быстро** и **максимально корректно** преобразовать данные **различных типов** из одного формата САПР в другой



НЕЙТРАЛЬНЫЕ ФАЙЛЫ

- Характеризуются **универсальным** способом кодирования информации
- Не позволяют сохранить данные о **топологии** модели и **параметризации**



ФОРМАТ DXF

Формат **DXF** (Drawing eXchange Format) – формат обмена чертежами.

Транслятор в **DXF** имеется в любой современной CAD системе.

Опубликован в 1982 г как инструмент **импорта AutoCAD 1.0** в качестве альтернативы закрытому «родному» **dwg**.

DXF ФАЙЛ

Текстовый ASCII файл,
состоящий из 5 разделов:

- **заголовок** (описание среды),
- **таблица** (данные о слоях, типах и стилях),
- **блок** (группы элементов),
- **элемент** (данные о каждом элементе)
- **конец.**

```
1 0
2 SECTION
3 2
4 HEADER
5 9
6 $ACADVER
7 1
8 AC1021
9 9
10 $ACADMINTVER
11 70
12 25
13 9
14 $DWGCODEPAGE
15 3
16 ANSI_1251
17 9
18 $INSBASE
19 10
```

```
1184 ENDSEC
1185 0
1186 SECTION
1187 2
1188 TABLES
1189 0
1190 TABLE
1191 2
1192 VPORT
1193 5
1194 8
1195 330
1196 0
1197 100
1198 AcDbSymbolTable
1199 70
```

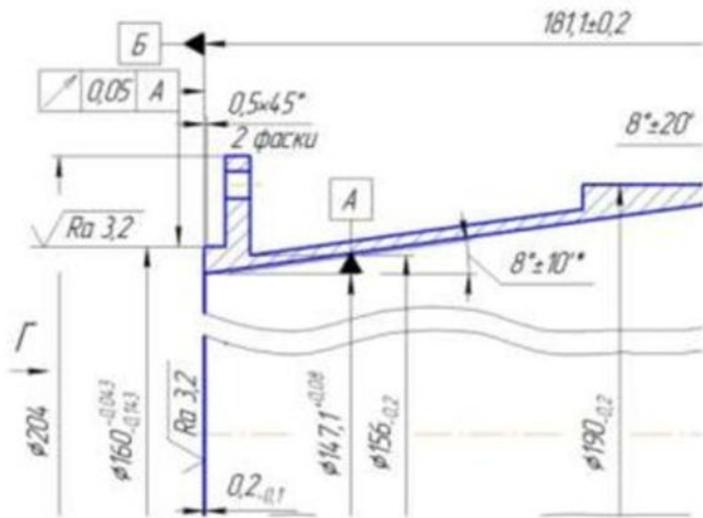
```
1934 TABLE
1935 2
1936 BLOCK_RECORD
1937 5
1938 1
1939 330
1940 0
1941 100
1942 AcDbSymbolTable
1943 70
1944 46
1945 0
1946 BLOCK_RECORD
1947 5
```

```
2996 BLOCKS
2997 0
2998 BLOCK
2999 5
3000 20
3001 330
3002 1F
3003 100
3004 AcDbEntity
3005 8
3006 0
3007 100
3008 AcDbBlockBegin
3009 2
3010 *Model_Space
3011 70
3012 0
3013 10
3014 0.0
3015 20
3016 0.0
3017 30
3018 0.0
3019 3
3020 *Model_Space
```

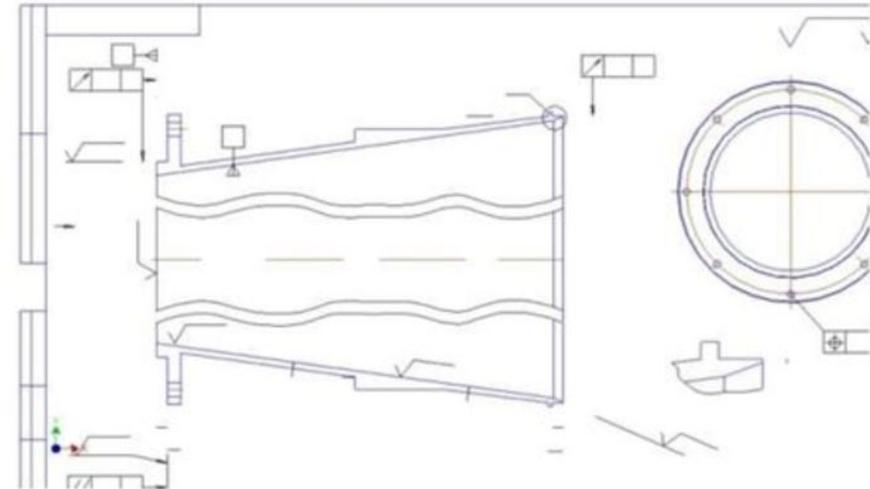
```
76143 0
76144 ENDSEC
76145 0
76146 EOF
```

ПРОБЛЕМЫ КОНВЕРТАЦИИ

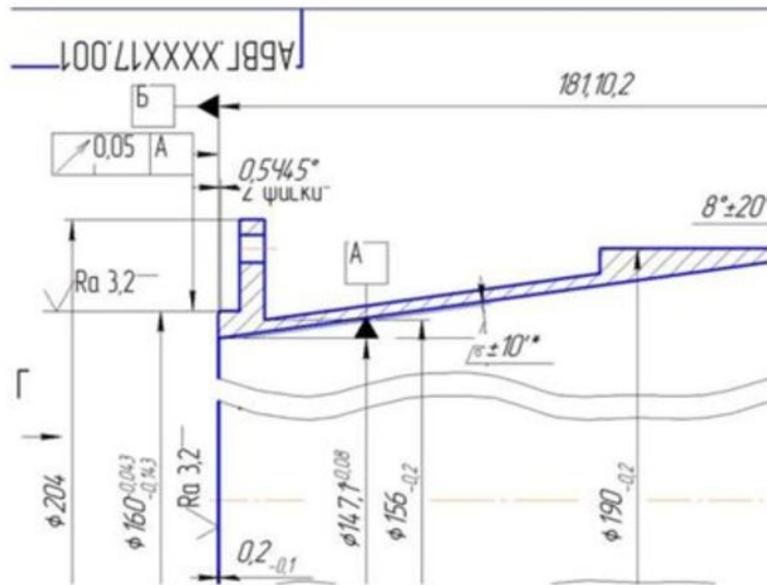
Оригинал КОМПАС



IGES to Inventor



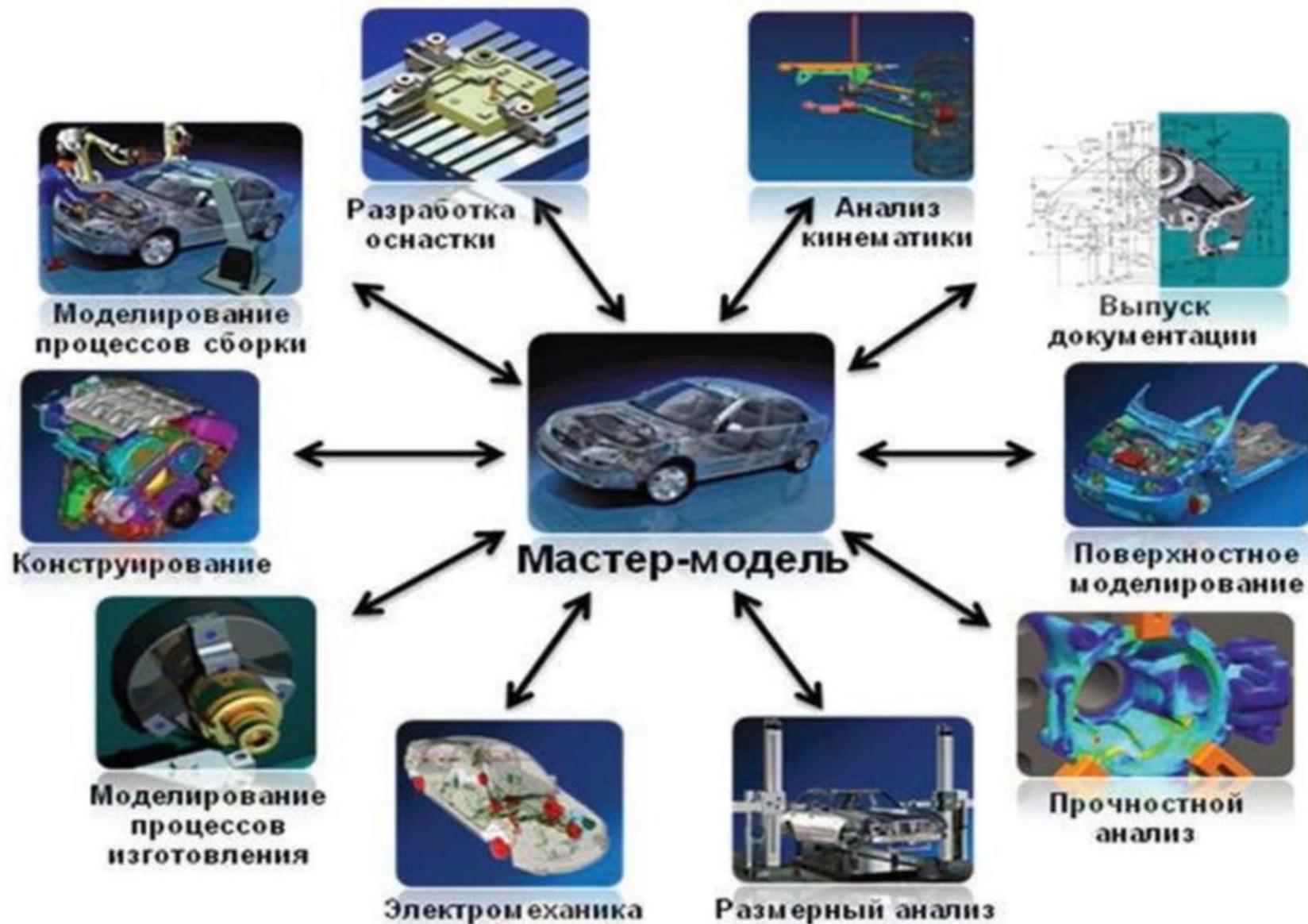
DXF to КОМПАС



DXF to SolidWorks



ПЕРЕДАЧА 3D ГЕОМЕТРИИ



ФОРМАТ IGES

- **IGES** (Initial Graphics Exchange Specification) – первый стандартный формат обмена данными между САПР.
- Опубликован в 1980г и принят в качестве стандарта в 1981г.
- Поддерживается три **представления файлов**: фиксированный ASCII (80 символов в строке), сжатый ASCII, бинарный.

Версии:

- 1.0** обмен чертежами;
- 2.0** + данные МКЭ и печатные платы;
- 3.0** + макрокоманды стандартных библиотек
- 4.0** + тела CSG (полученные булевыми операциями над примитивами)
- 5.0** + поддержка BRep (твердое тело как набор ограничивающих поверхностей)

Текущая – **5.3**

ПРИМЕР IGES ФАЙЛА

```
1H,,1H;,4HSLOT,37H$1SDUA2:[IGESLIB.BDRAFT.B2I]SLOT.IGS;;
17HBravo3 BravoDRAFT,31HBravo3->IGES V3.002 (02-Oct-87),32,38,6,38,15,
4HSLOT,1.,1,4HINCH,8,0.08,13H871006.192927,1.E-06,6.,
31HD. A. Harrod, Tel. 313/995-6333,24HAPPLICON - Ann Arbor, MI,4,0;
116 1 0 1 0 0 0 0 0 1D 1
116 1 5 1 0 0 0 0 0 0D 2
116 2 0 1 0 0 0 0 0 1D 3
116 1 5 1 0 0 0 0 0 0D 4
100 3 0 1 0 0 0 0 0 1D 5
100 1 2 1 0 0 0 0 0 0D 6
100 4 0 1 0 0 0 0 0 1D 7
100 1 2 1 0 0 0 0 0 0D 8
110 5 0 1 0 0 0 0 0 1D 9
110 1 3 1 0 0 0 0 0 0D 10
110 6 0 1 0 0 0 0 0 1D 11
110 1 3 1 0 0 0 0 0 0D 12
116,0.,0.,0.,0,0,0,0; 1P 1
116,5.,0.,0.,0,0,0,0; 3P 2
100,0.,0.,0.,0.,1.,0.,-1.,0,0; 5P 3
100,0.,5.,0.,5.,-1.,5.,1.,0,0; 7P 4
110,0.,-1.,0.,5.,-1.,0.,0,0; 9P 5
110,0.,1.,0.,5.,1.,0.,0,0; 11P 6
S 1G 4D 12P 6 T 1
```

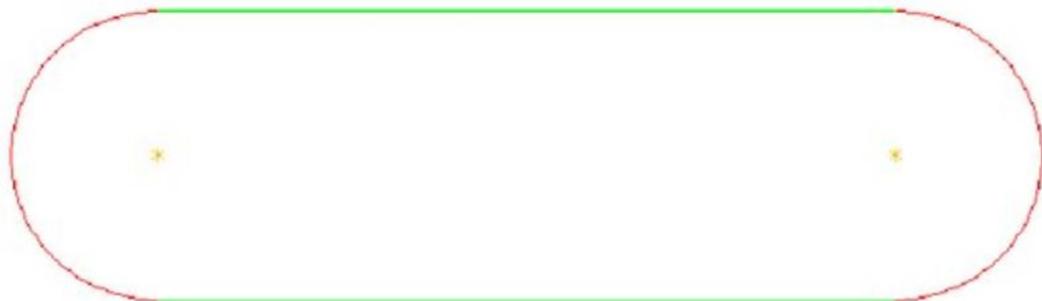
← Начало

← Глобальные данные

← Запись в каталоге

← Параметрические данные

← Конец



ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОРМАТА IGES

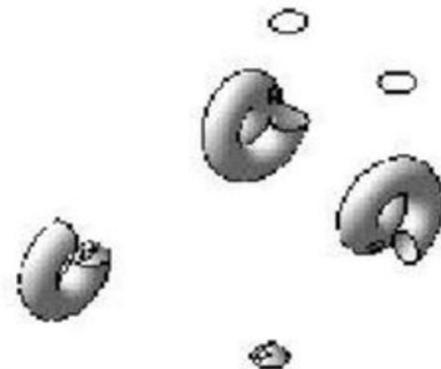
- Различные способы представления одного элемента в системе и в IGES: **дважды** выполняется **преобразование** с использованием параметрического уравнения. При каждом преобразовании происходит **искажение данных**.
- Необходимость преобразовать элемент, **не имеющий явного описания**, в ближайший доступный вид. Может привести к сбою в системе или утрате элемента при конвертации, особенно при использовании разных версий формата.

ПРОБЛЕМЫ КОНВЕРТАЦИИ 3D ГЕОМЕТРИИ

Исходная модель Inventor



IGES to КОМПАС



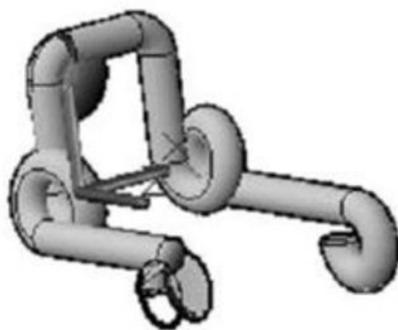
IGES to ProE



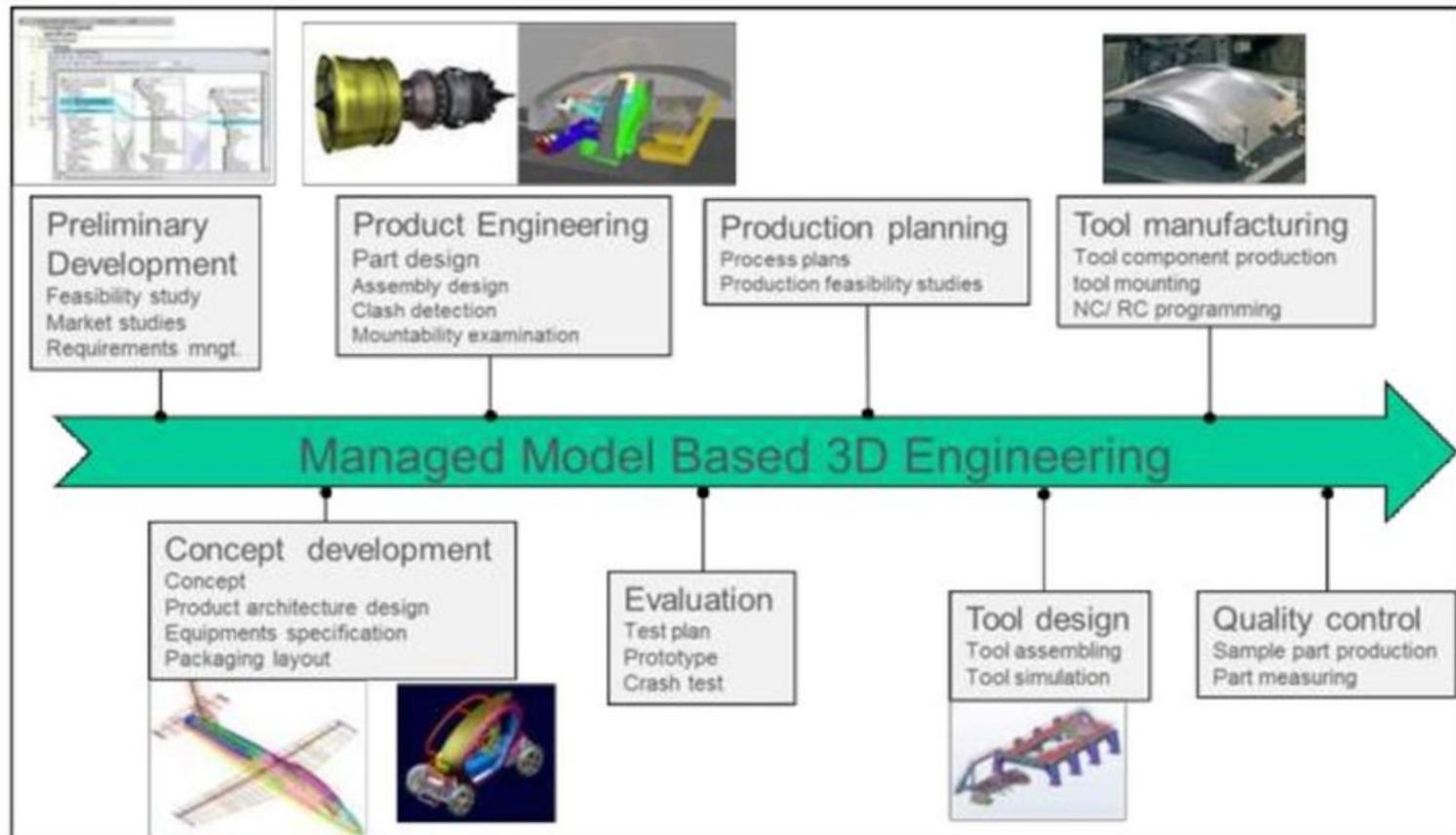
IGES to SolidWorks



IGES to AutoCAD



ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ ОБ ИЗДЕЛИИ



- Необходима для организации сквозного управления жизненным циклом

ТРЕБОВАНИЯ К ФОРМАТУ

- Передача точной **геометрии** и **полной структуры** изделия
- Передача метаданных и **PMI-аннотаций**;
- Обеспечение **корреляции** между исходной и конечной моделями.
- Охват **всей информации** о продукте.
- Комбинирование **различных систем-источников**.
- Обеспечение возможности доступа к данным через **длительный период времени**

ФОРМАТ STEP

- Стандарт **STEP** (Standard to Exchange of Product model data) ориентирован на данные о всем жизненном цикле продукта (проектирование, производство, контроль качества и поддержка).
- Целью создания **PDES** (Product Data Exchange Specification) – устранить потребность в чертежах и других бумажных документах при обмене информацией на разных стадиях ЖЦ.
- Является стандартом обмена данными в системе стандартов технологий **CALS**

ПРИНЦИПЫ STEP

- Ориентация на **данные о продукте**, включая величины допусков, технологические особенности, КЭ модели и тех. требования формы.
- Информация о **приложении** должна храниться **отдельно** от информации о **форме**.
- Для определения структуры данных используется формальный язык **EXPRESS**, позволяющий однозначно интерпретировать файл.

STEP ФАЙЛ

- Файл содержит разделы:
- Стандарт - ISO-10303-21
- Header – выходные данные файла;
- Data – содержит нумерованный список сущностей модели с указанием ссылок на типы объектов и величины атрибутов.

```
ISO-10303-21;
HEADER;
FILE_DESCRIPTION (( 'STEP AP214' ),
  '1' );
FILE_NAME ('bills_hanger.STEP',
  '2012-12-20T15:33:07',
  ( '1' ),
  ( ' ' ),
  'SwSTEP 2.0',
  'Solidworks 2009',
  '' );
FILE_SCHEMA (( 'AUTOMOTIVE_DESIGN' ));
ENDSEC;

DATA;
#1 = ORIENTED_EDGE ( 'NONE', *, *, #146, .F. );
#2 = EDGE_CURVE ( 'NONE', #212, #211, #253, .T. );
#3 = ORIENTED_EDGE ( 'NONE', *, *, #2, .F. );
#4 = EDGE_LOOP ( 'NONE', ( #1, #1351 ) );
#5 = ORIENTED_EDGE ( 'NONE', *, *, #210, .F. );
#6 = EDGE_LOOP ( 'NONE', ( #5, #3 ) );
#7 = VERTEX_POINT ( 'NONE', #248 );
#8 = ORIENTED_EDGE ( 'NONE', *, *, #9, .F. );
#9 = EDGE_CURVE ( 'NONE', #10, #7, #247, .T. );
#10 = VERTEX_POINT ( 'NONE', #243 );
```

ВОЗМОЖНОСТИ НЕЙТРАЛЬНЫХ ФОРМАТОВ

Область применения	STEP	3D XML	JT	3D PDF
Просмотр	●	● ●	● ● ●	● ● ●
Обмен данными	● ● ●	●	● ●	●
Цифровой макет	●	● ●	● ● ●	●
Документирование и архивирование	● ●	●	● ●	● ● ●
Переносимый PLM-документ	●	●	●	● ● ●

Обозначения: ● ● ● – очень хорошо,
● ● – весьма прилично, ● – подходит с оговорками