

| № 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

- Введение. Эпоха цифровизации.
- Понятие геометрической модели.
- Математические основы геометрических моделей.
- Классификации геометрических моделей.
- Концепции геометрического моделирования.

ЦИФРОВИЗАЦИЯ

Цифровая экономика (англ. *Digital Economy*) – экономика, основанная на замене аналоговых устройств цифровыми и использования создаваемых ими данных для создающих ценности компьютерных вычислений. [Д. Трапскотт, 1995].

Цифровая экономика – это деятельность, в которой ключевыми факторами производства являются данные, представленные в цифровом виде, а их обработка и использование в больших объемах, в том числе непосредственно в момент их образования, позволяют по сравнению с традиционными формами хозяйствования существенно повысить эффективность, качество и производительность в различных видах производства, при хранении, продаже, доставке и потреблении товаров и услуг. [Стратегия развития информационного общества РФ до 2030 года]

Цифровизация (англ. *Digitalization*) - это процесс переноса в цифровую среду функций и деятельности (бизнес-процессов), ранее выполнявшихся людьми и организациями.

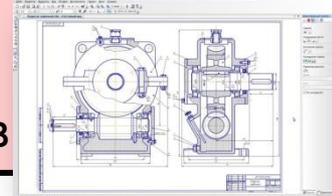
Цифровая трансформация (англ. *Digital Transformation*) – глубокие и всесторонние изменения в производственных и социальных процессах, связанные с тотальной заменой аналоговых технических систем цифровыми и широкомасштабным применением цифровых технологий.

Хронология цифровой трансформации

**1-я волна
(1960-1970-е гг.)**



цифровизация и автоматизация отдельных видов деятельности в цепочке создания стоимости, от обработки заказов и оплаты счетов до автоматизированного проектирования и планирования производственных ресурсов



**2-я волна
(1980-1990-е гг.)**



Интернет и распространение компьютерных технологий позволили перейти к интеллектуальным производствам и глобально интегрированным цепочкам поставок.



**3-я волна
(2000-2020-е гг.)**

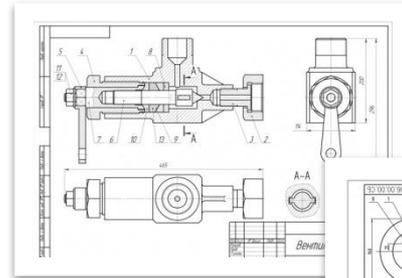


переход к «подключенным вещам» (IoT), преобразованию всех производственных и социальных систем в киберфизические системы

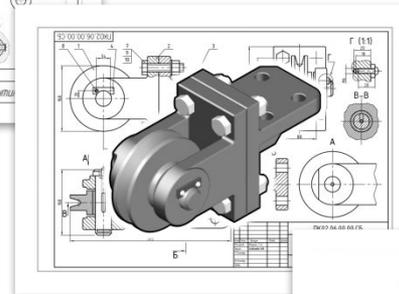


Уровни развития процессов цифровизации проектирования и производства

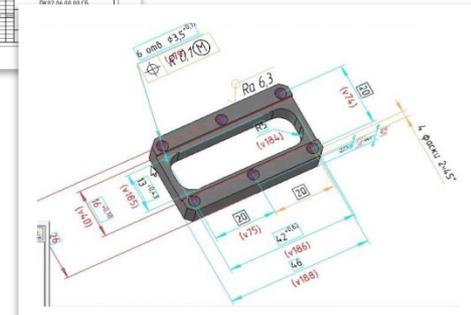
I. Электронный чертеж.



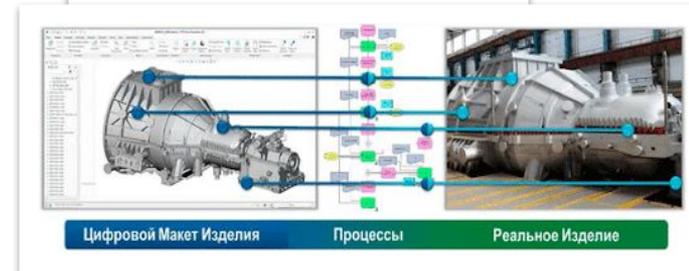
II. Электронная 3D модель и чертеж.



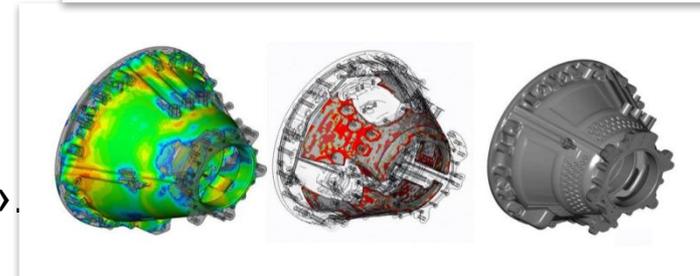
III. Электронная модель с информацией для изготовления – первоисточник (узаконенный носитель) конструкторской и технологической информации.



IV. Электронная модель и электронный состав, распространенные по всем службам предприятия.



V. Электронная модель – «цифровой двойник».



ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК

Цифровой двойник (ЦД) (англ. *Digital Twin*) — цифровая копия физического объекта или процесса, помогающая оптимизировать эффективность бизнеса.

Существующие определения ЦД:



«интегрированная модель изделия, содержащая информацию обо всех дефектах и регулярно обновляемая в процессе физического использования»



«цифровая модель, полученная на основании информации с датчиков, установленных на физическом объекте, которая позволяет симулировать поведение объекта в реальном мире»



«постоянно меняющийся цифровой профиль, содержащий исторические и наиболее актуальные данные о физическом объекте или процессе, что позволяет оптимизировать эффективность бизнеса»



Преимущество «цифрового двойника» заключается в том, что он идентичен реальному изделию и насыщен физическими свойствами. Это кардинально другой, высокоэффективный уровень конструкторско-технологической подготовки производства.

- ❖ Он позволяет моделировать процессы производства и производить виртуальные расчеты и испытания.
- ❖ При его использовании многократно сокращаются сроки выпуска изделий на рынок, повышается качество, снижается вес, себестоимость, особенно, если идет речь о технически сложной продукции.

Цифровой двойник применяется на всех стадиях жизненного цикла изделия, включающих в себя разработку, изготовление и эксплуатацию:

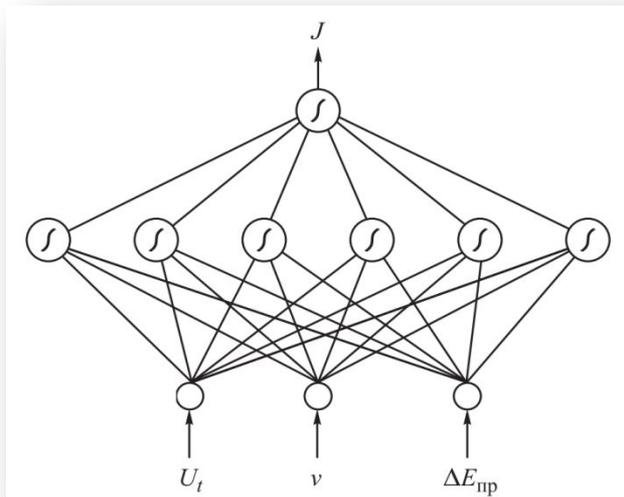


Пример схемы построения цифрового двойника режущего инструмента

(Ю.Г. Кабалдин и др., Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)

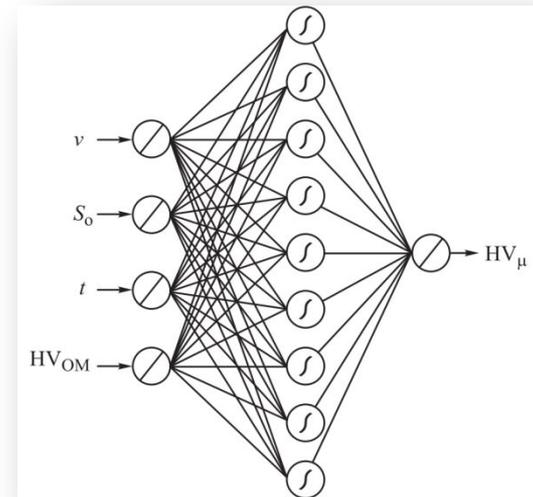


Замена сложной многомерной функциональной зависимости износостойкости J режущей части инструмента нейросетевой структурой:



U_t – термо-ЭДС естественной термопары;
 v – скорость резания;
 $\Delta E_{пр}$ – предельная энергия разрушения покрытия.

Модель выбора инструментального покрытия при заданных режимах и условиях обработки:



HV_{OM} – микротвёрдость обрабатываемого материала;
 S_o , t – подача и глубина резания;
 HV_{μ} – микротвёрдость материала покрытия.

Типичный состав цифрового двойника изделия



Начальный уровень цифрового двойника изделия – **электронный макет изделия**

Нормативная база ЕСКД по работе с электронными документами

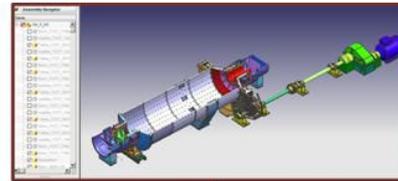
| Наименование | Описание |
|--|--|
| ГОСТ 2.102-2013 ЕСКД. Виды и комплектность конструкторских документов. | Понятия электронной модели детали, электронной модели сборочной единицы, электронной структуры изделия. |
| ГОСТ 2.051-2013 ЕСКД. Электронные документы. | Общие требования к выполнению электронных конструкторских документов, их структура, виды. |
| ГОСТ 2.052-2015 ЕСКД. Электронная модель изделия. | Общие требования к выполнению электронных моделей изделия (деталей и сборочных единиц). Основные понятия и терминология компьютерного моделирования. |
| ГОСТ 2.053-2013 ЕСКД. Электронная структура изделия. | Общие требования к электронной структуре изделия. |
| ГОСТ 2.054-2013 ЕСКД. Электронное описание изделия. | Понятия об информационных технических системах (PLM, PDM и др.) для хранения, учета и описание электронной конструкторской документации. |
| ГОСТ 2.055-2014 ЕСКД. Электронная спецификация. | Понятия электронной спецификации и сводных ведомостей. |
| ГОСТ 2.056-2014 ЕСКД. Электронная модель детали. | Требования к выполнению и оформлению моделей деталей и представлению их в САД системах (в дополнение к ГОСТ 2.052-2015). |
| ГОСТ 2.057-2014 ЕСКД. Электронная модель сборочной единицы. | Требования к выполнению и оформлению моделей сборочных единиц и представлению их в САД системах (в дополнение к ГОСТ 2.052-2015) |
| ГОСТ 2.058-2016 ЕСКД. Правила выполнения реквизитной части электронных КД. | Правила выполнения в электронной форме реквизитной части электронных конструкторских документов. |

Электронный макет изделия

ЭМИ – совокупность *электронных моделей* и *электронных документов*, определяющих состав, форму и свойства изделия или его составной части в объеме, определяемом стадией его жизненного цикла (ГОСТ 2.052).

Содержит

- ✓ электронные модели изделия и его компонентов;
- ✓ модели и/или чертежи технологической оснастки;
- ✓ различную атрибутивную информацию;
- ✓ нормативные документы;
- ✓ технические требования;
- ✓ техническую, эксплуатационную и пр. документацию, связанную с изделием.



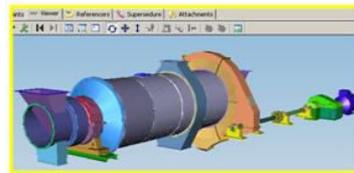
трехмерная модель в CAD



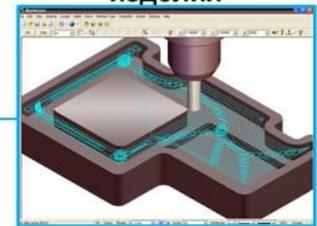
атрибутивная информация



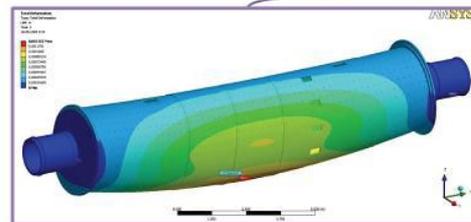
структура/состав изделия



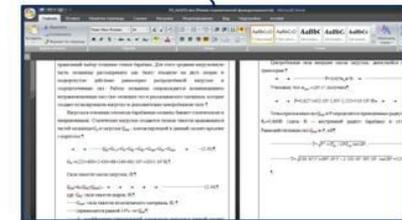
облегченная модель в визуализаторе PDM



производственные данные



результаты расчета узлов изделия в CAE



документация по изделию

Электронная модель изделия – модель изделия, выполненная в компьютерной среде (ГОСТ 2.052).

Электронная геометрическая модель (ЭГМ) изделия – электронная модель изделия, описывающая преимущественно геометрическую форму, размеры и иные свойства изделия, зависящие от его формы и размеров (ГОСТ 2.052).

Электронная модель сборочной единицы – документ, содержащий ЭГМ сборочной единицы, соответствующие ЭГМ составных частей, свойства, характеристики и другие данные, необходимые для сборки (изготовления) и контроля.

Электронная модель детали – документ, содержащий ЭГМ детали и требования к её изготовлению и контролю.

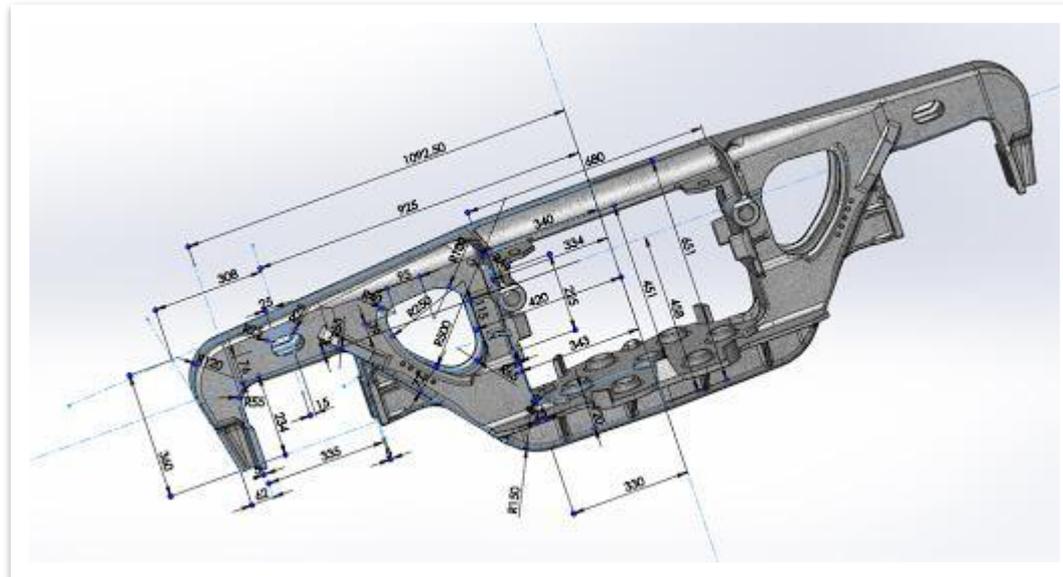
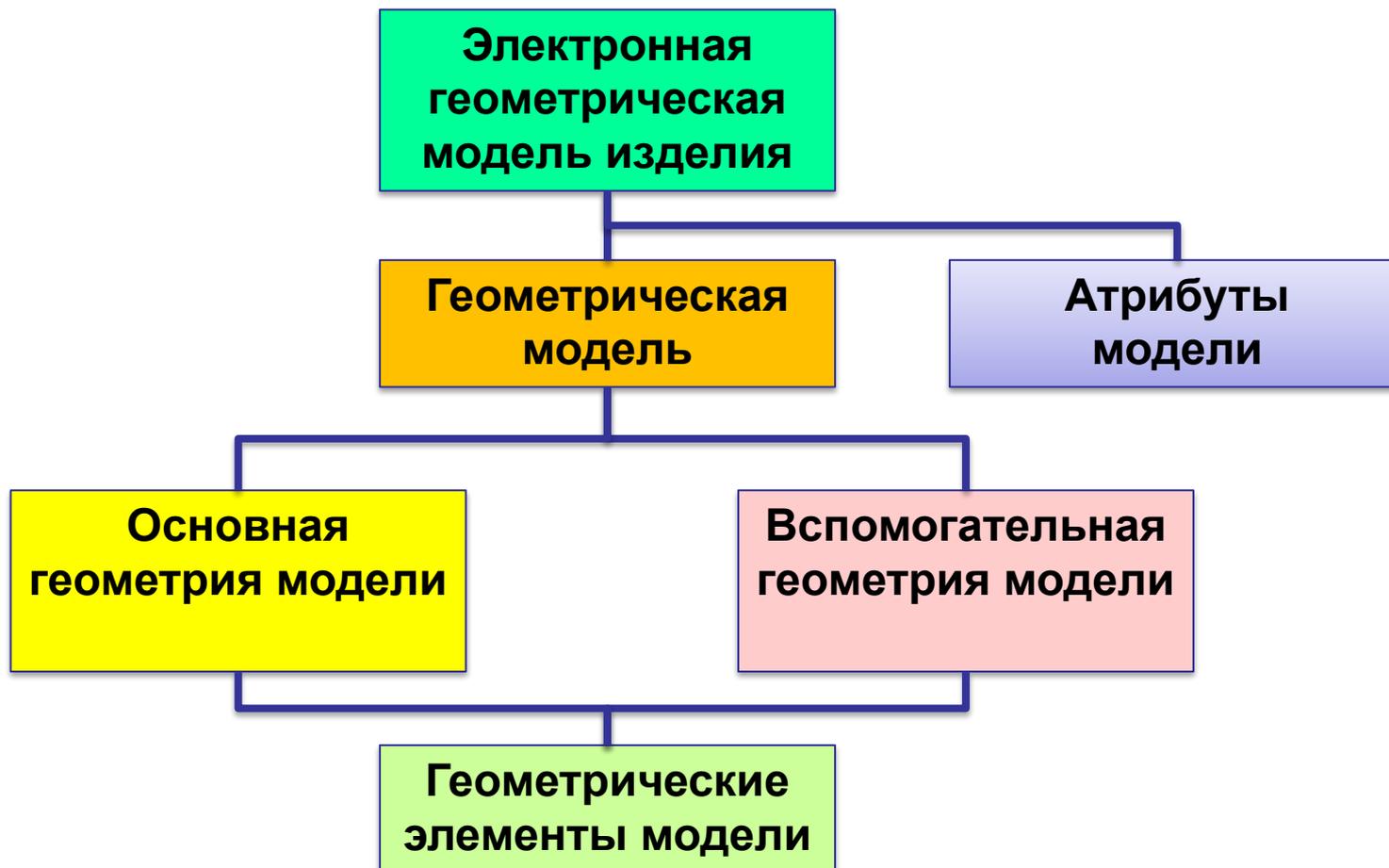
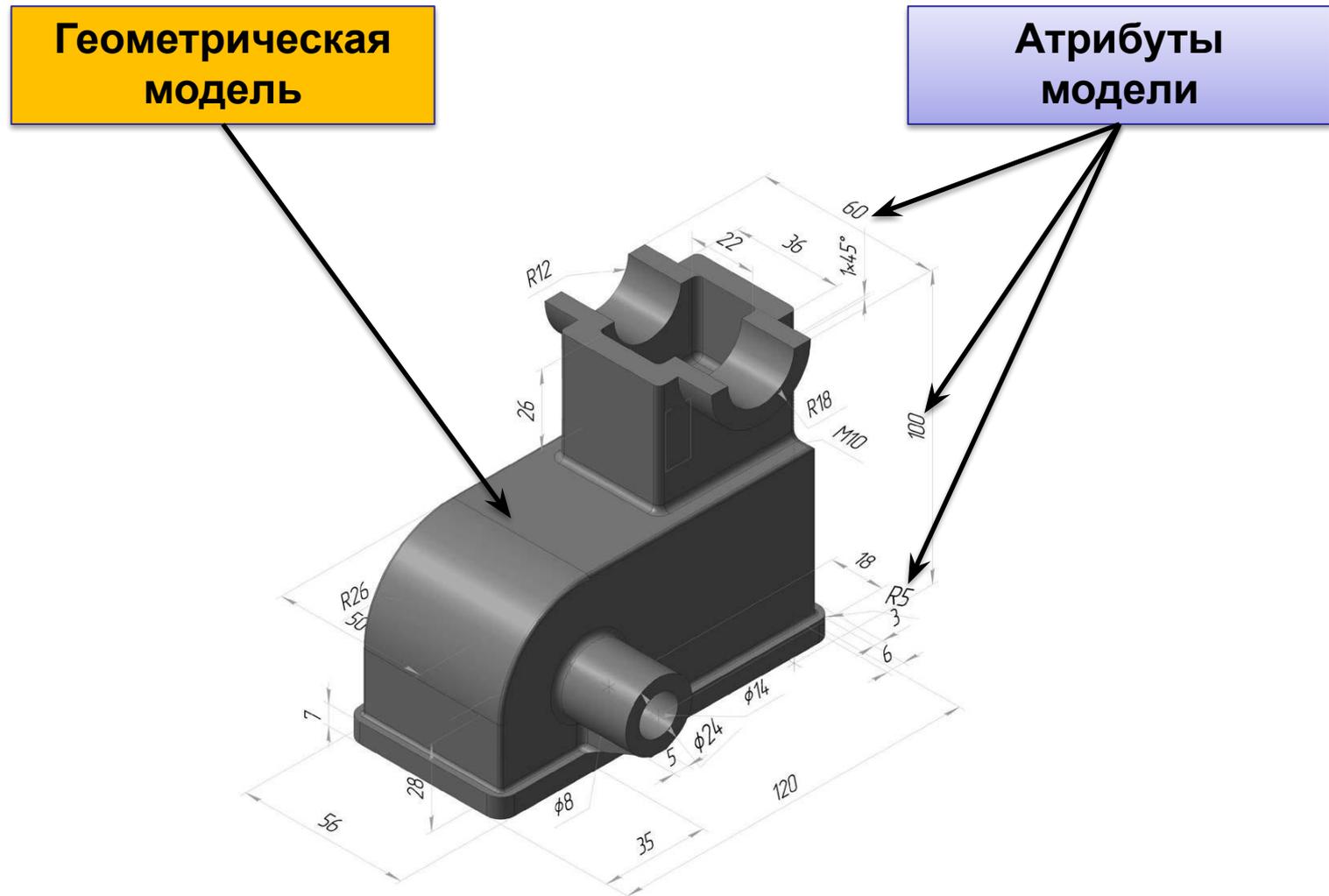


Схема состава ЭГМ изделия

(ГОСТ 2.052)

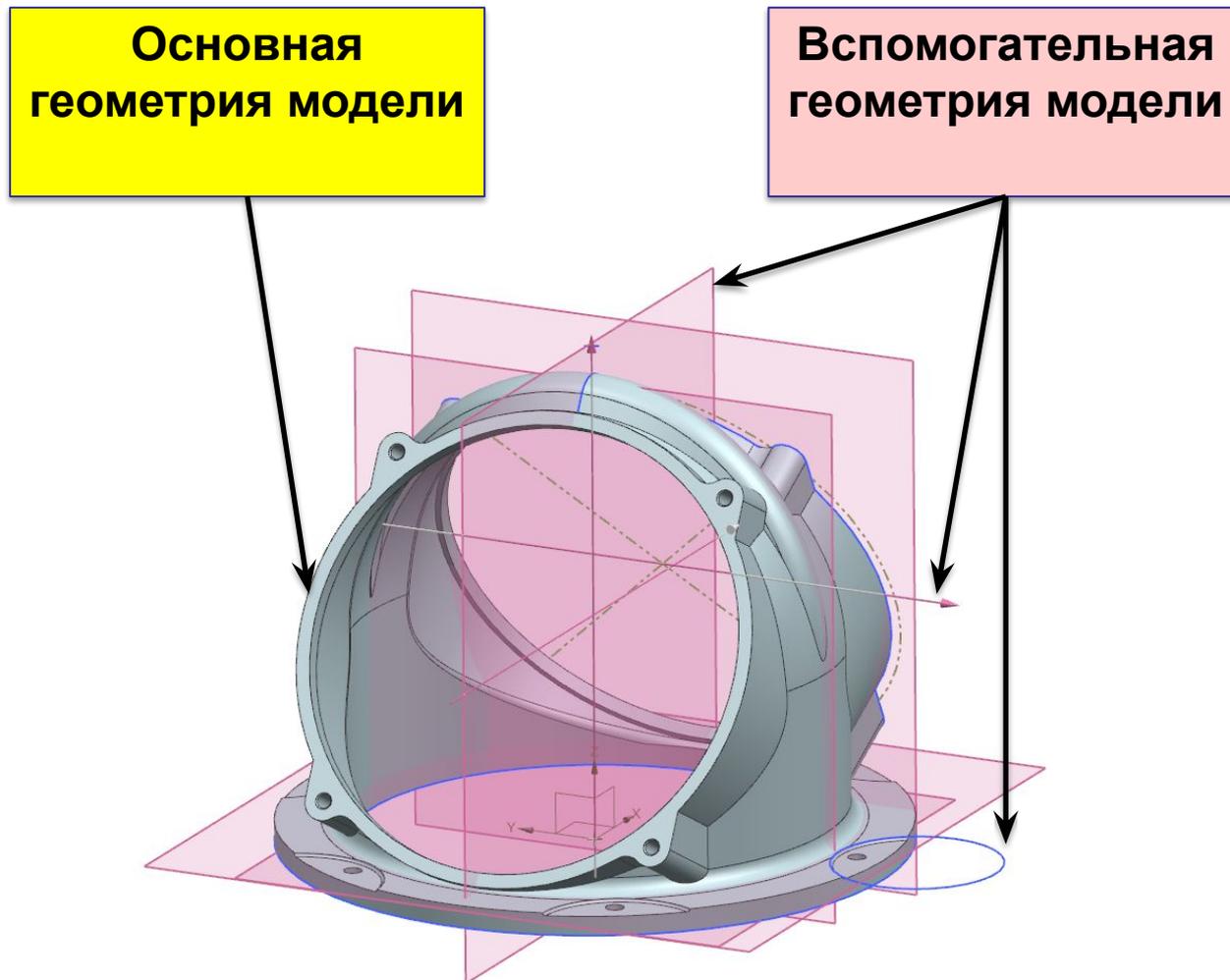


Атрибут геометрической модели – дополнительная неграфическая информация, связанная с геометрическим элементом модели или моделью в целом.



Вспомогательная геометрия – совокупность геометрических элементов, которые не являются элементами моделируемого изделия.

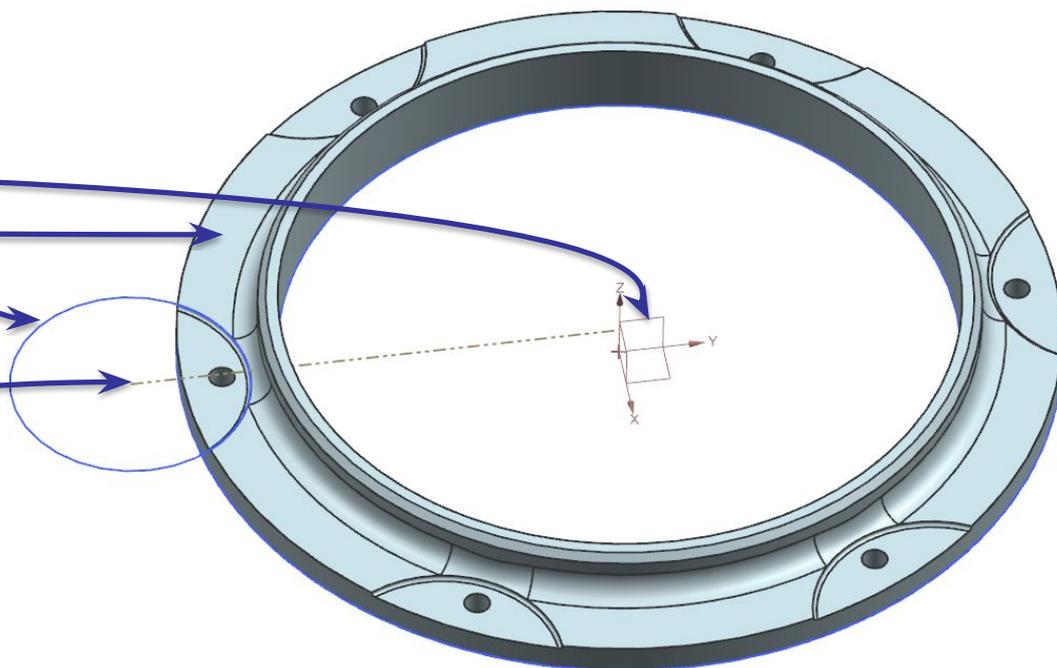
Основная геометрия – совокупность геометрических элементов, которые непосредственно определяют форму моделируемого изделия.



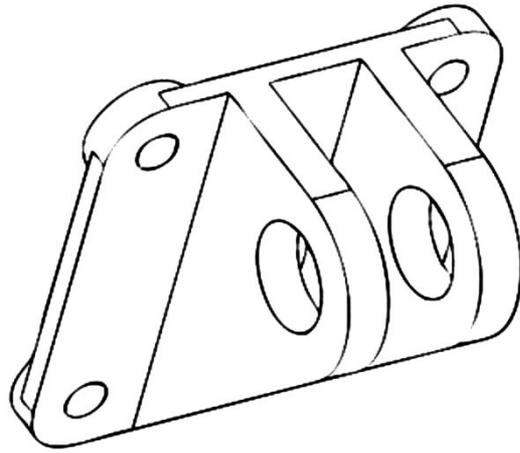
Геометрический элемент – идентифицированный (именованный) геометрический объект.

**Геометрические
элементы модели**

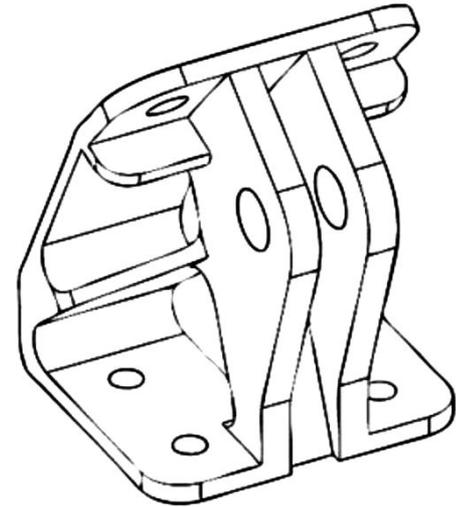
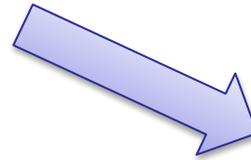
- точка,
- линия,
- плоскость,
- поверхность,
- геометрическая фигура,
- геометрическое тело,
- осевая линия,
- опорные точки сплайна,
- направляющие и образующие линии поверхности и др.



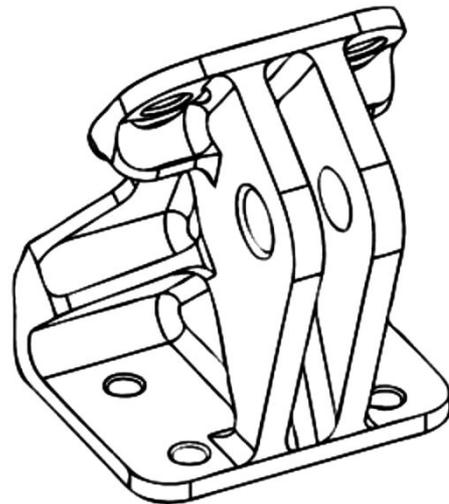
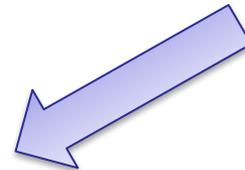
Пример представления электронной модели детали на стадиях разработки



На стадии технического предложения

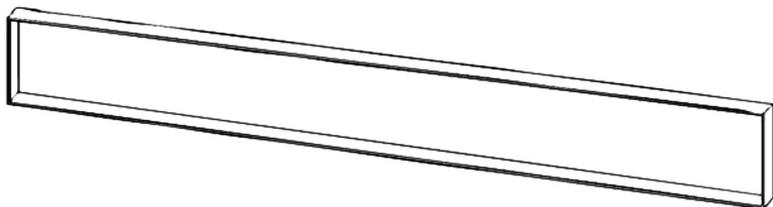


На стадии эскизного проекта

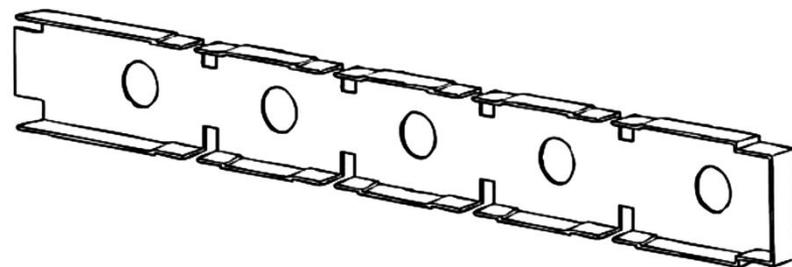
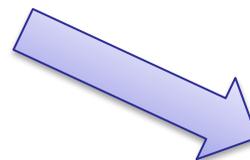


На стадиях технического проекта и рабочей КД

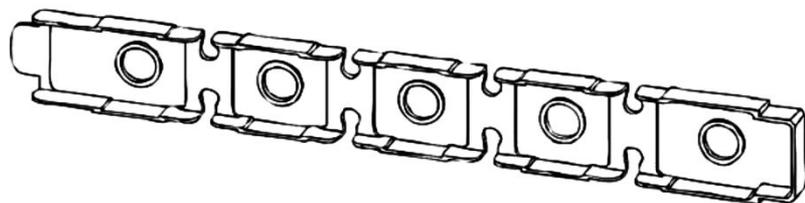
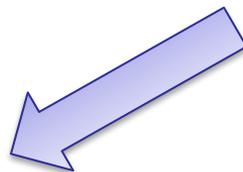
Пример представления электронной модели детали на стадиях разработки



На стадии технического предложения



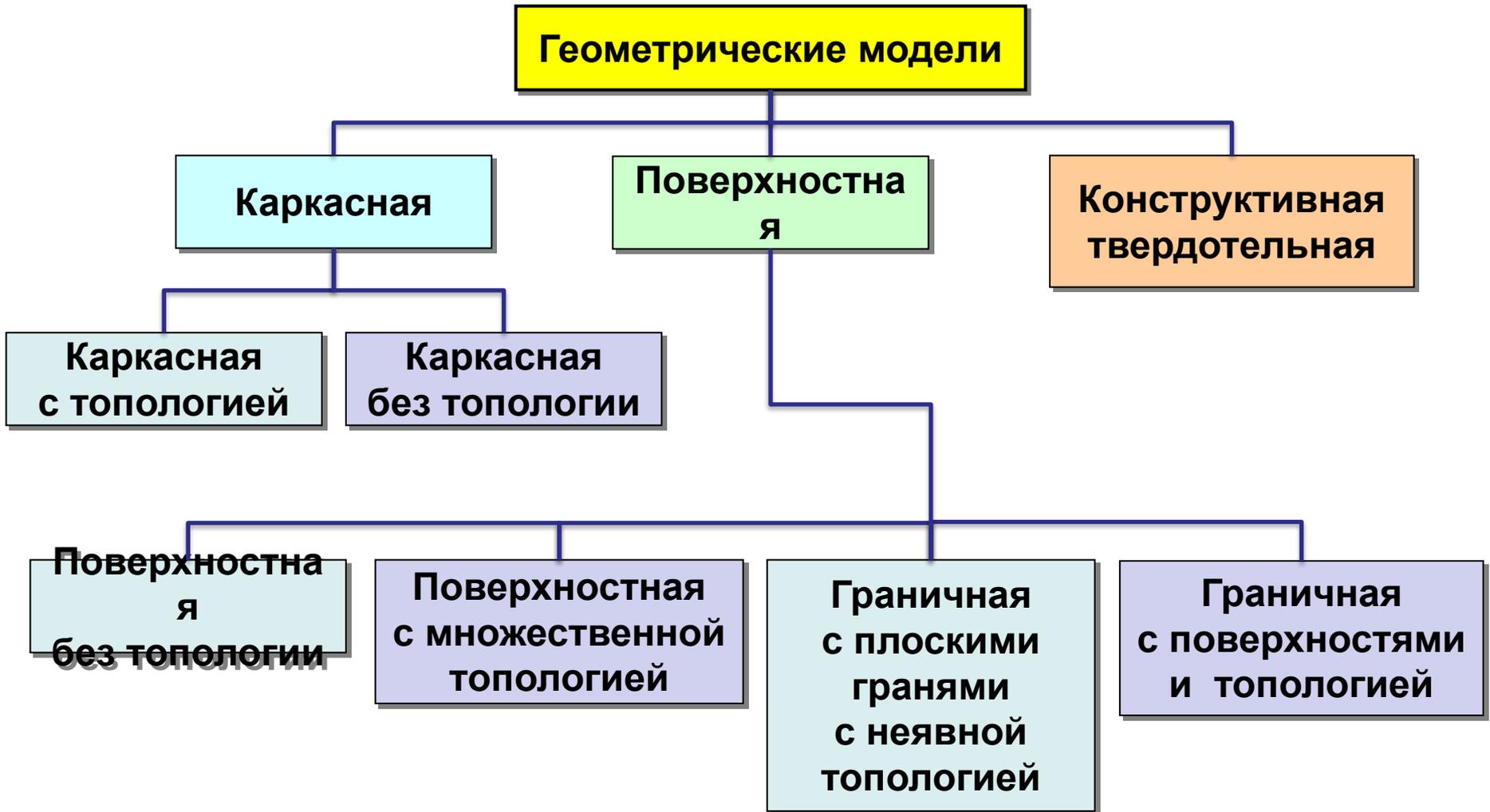
На стадии эскизного проекта



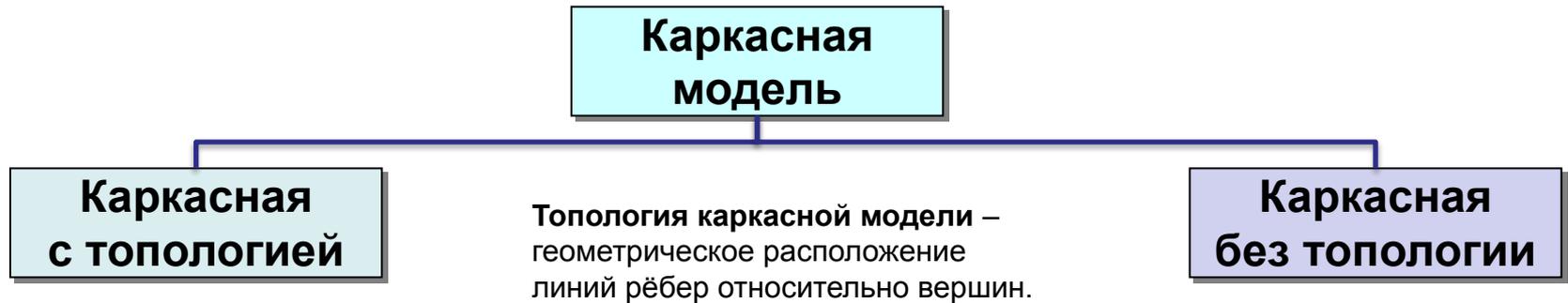
На стадиях технического проекта и рабочей КД

Классификация типов геометрических моделей

(ГОСТ 2.052)

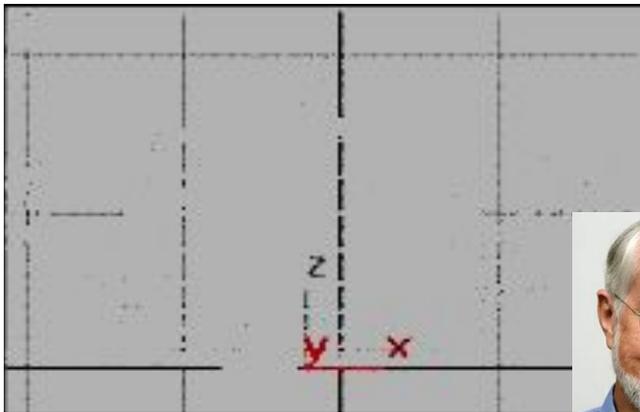


Каркасная (геометрическая) модель – трёхмерная геометрическая модель, представленная совокупностью точек, отрезков и кривых, определяющих в пространстве форму изделия (ГОСТ 2.052).

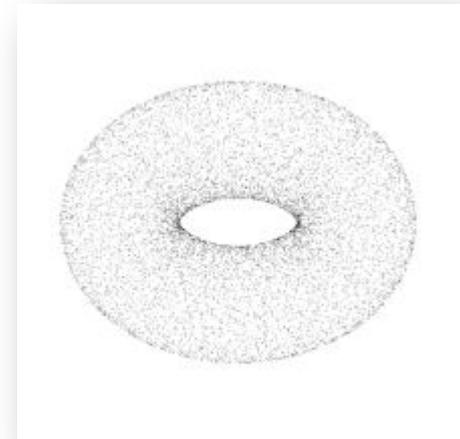
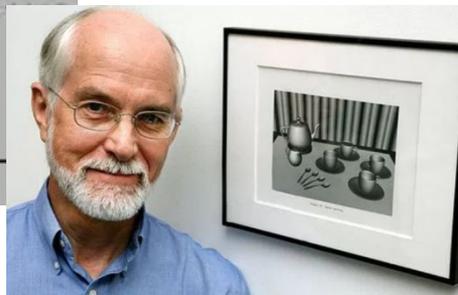


Чайник Юта – первая (и самая популярная) каркасная модель реального объекта (1974 г.)

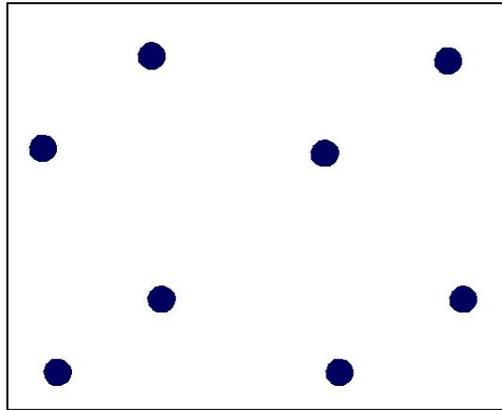
(Точечная) каркасная модель без информации о топологии



Мартин Ньювелл

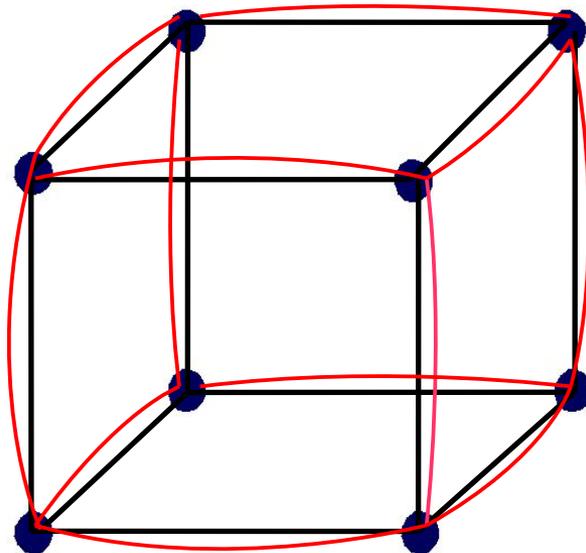


Точечная модель геометрического объекта – совокупность вектора координат вершин объекта и массива атрибутов вершин.

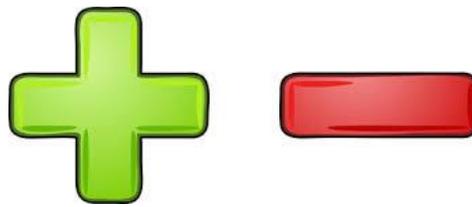


Точечная модель часто называется **облаком точек** и применяется в технологиях бесконтактных измерений.

Формирование каркасной модели на основе точечной



– установление связи между вершинами и формирование рёбер



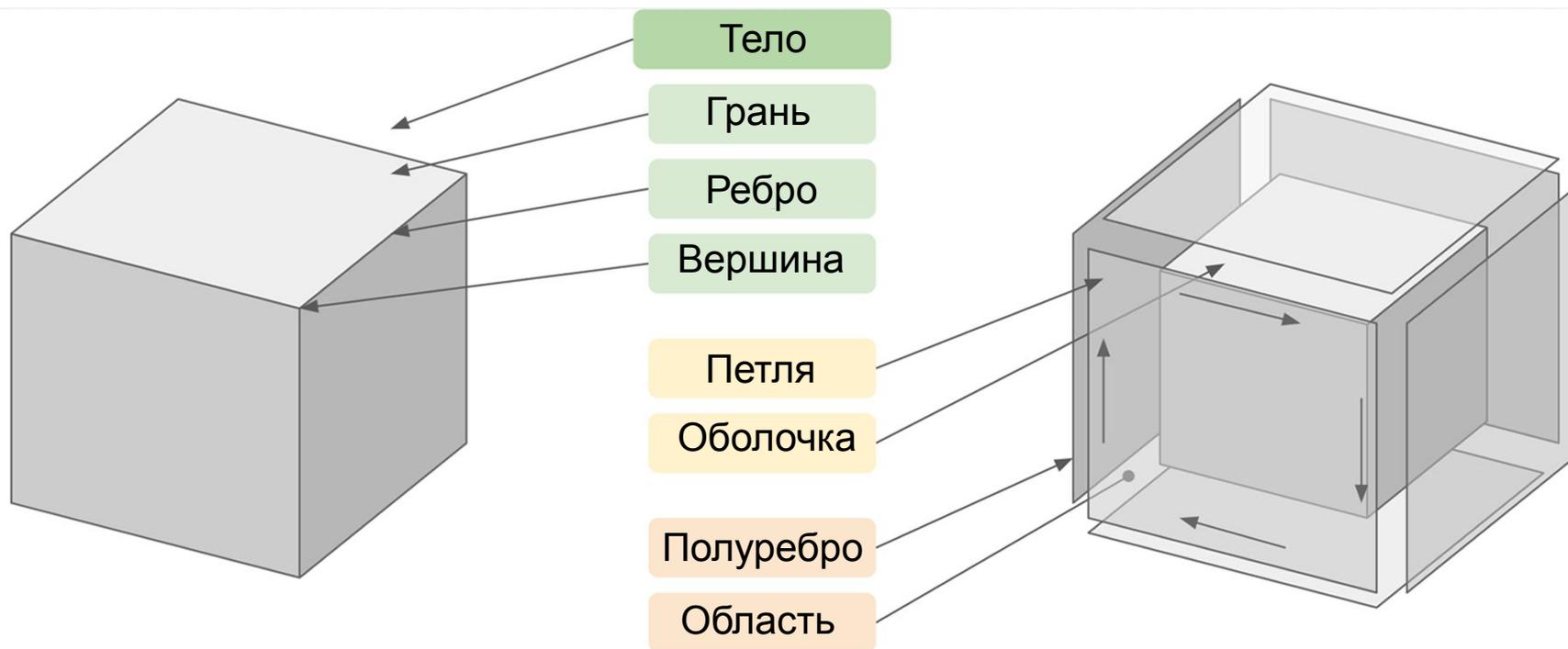
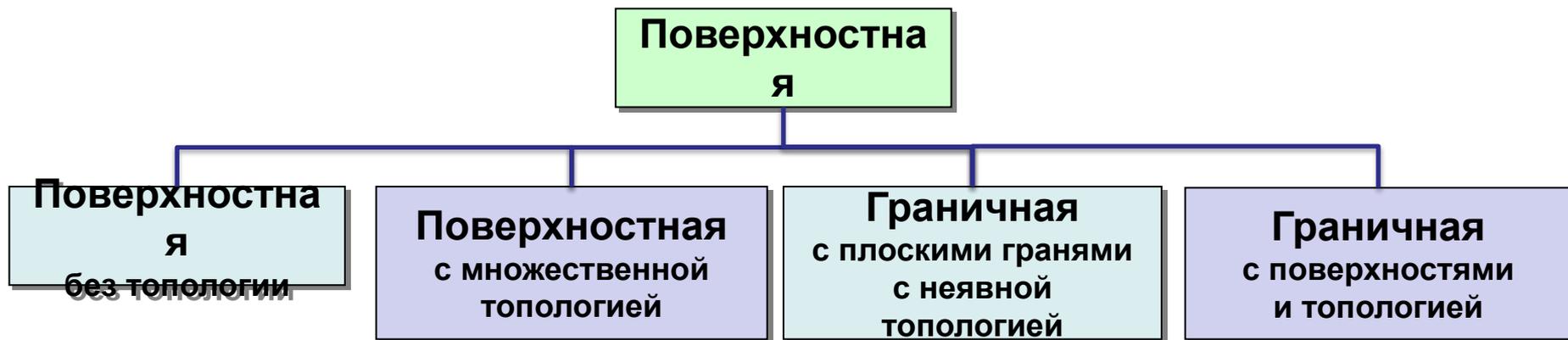
Преимущества каркасной модели

- не требовательна к вычислительным ресурсам,
- легко воспринимается человеком,
- эффективно используется для имитации траектории движения инструмента в пространстве.

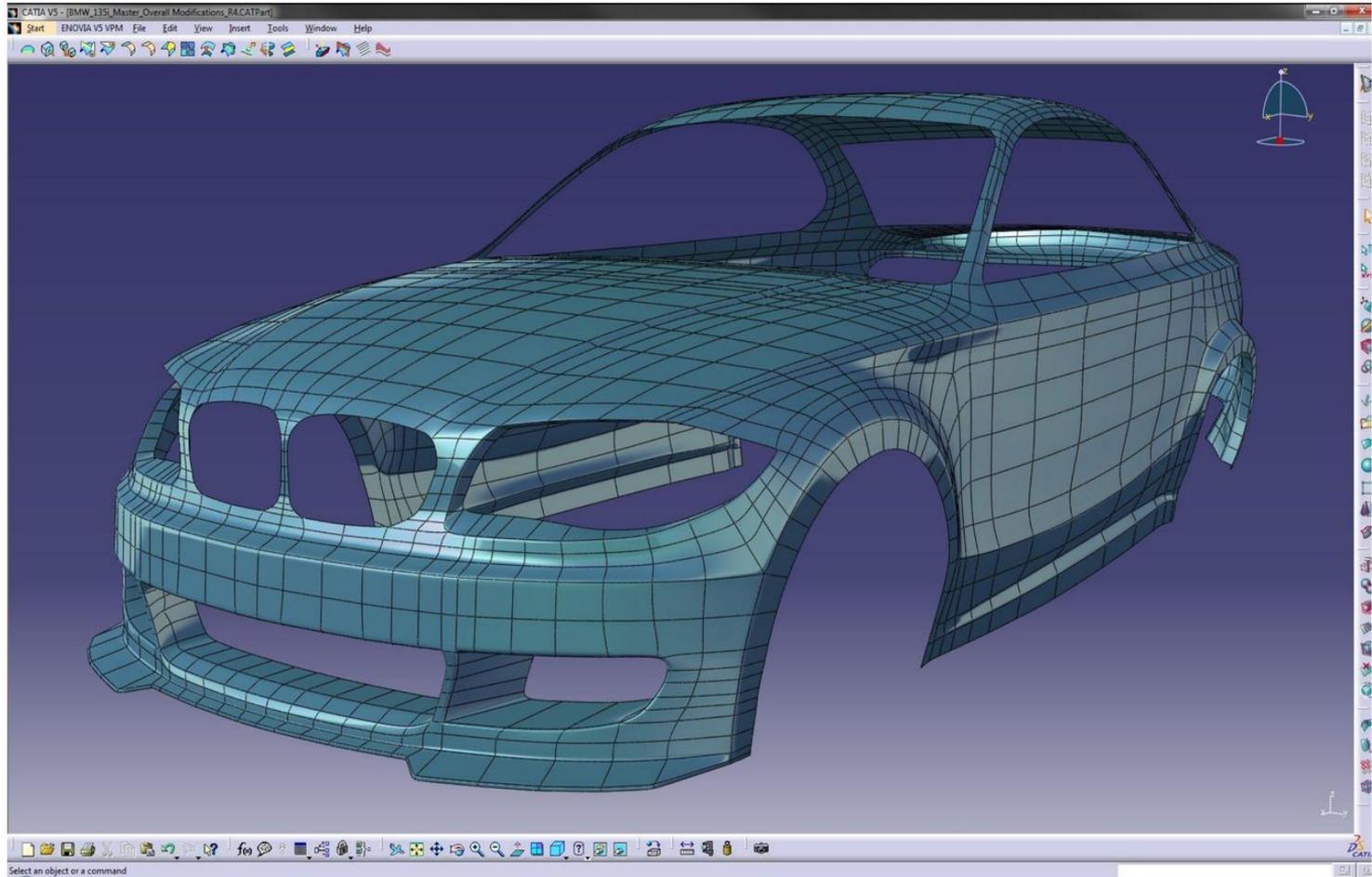
Недостатки каркасной модели

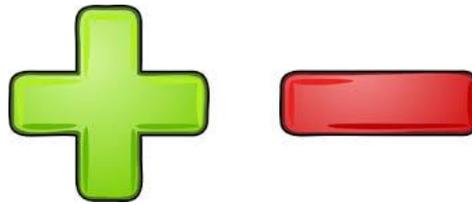
- неоднозначность – для того, чтобы представить модель в каркасном виде, нужно представить все ребра,
- трудно отличить видимые грани от невидимых,
- невозможность обнаружения нежелательных взаимодействий между гранями объекта,
- трудности, связанные с вычислением физических характеристик,
- отсутствие средств рендеринга полутоновых изображений (поскольку затенению должны подвергаться грани, а не ребра).

Поверхностная (геометрическая) модель – трёхмерная геометрическая модель изделия, представленная множеством ограниченных поверхностей, определяющих в пространстве форму изделия (ГОСТ 2.052).



Пример создания поверхности с помощью полигональной сетки





Преимущества поверхностной модели

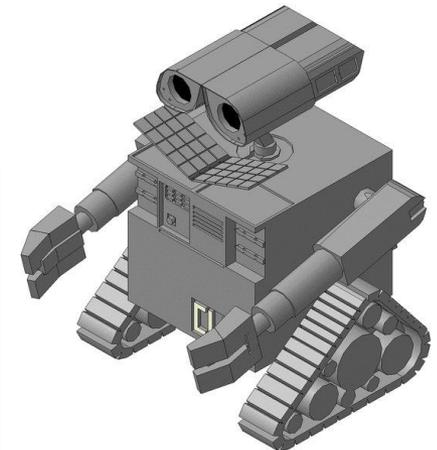
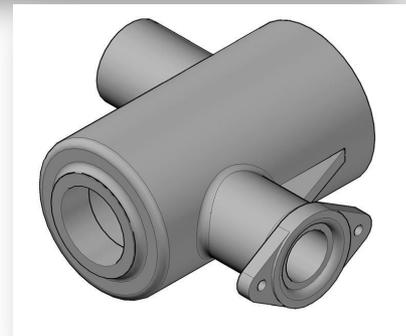
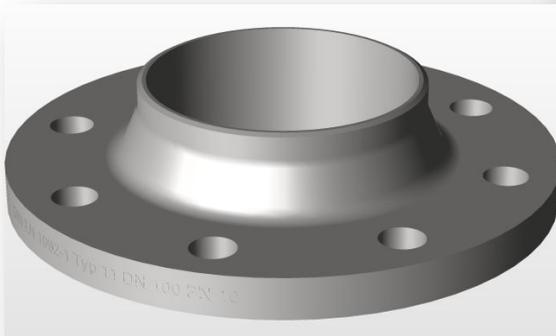
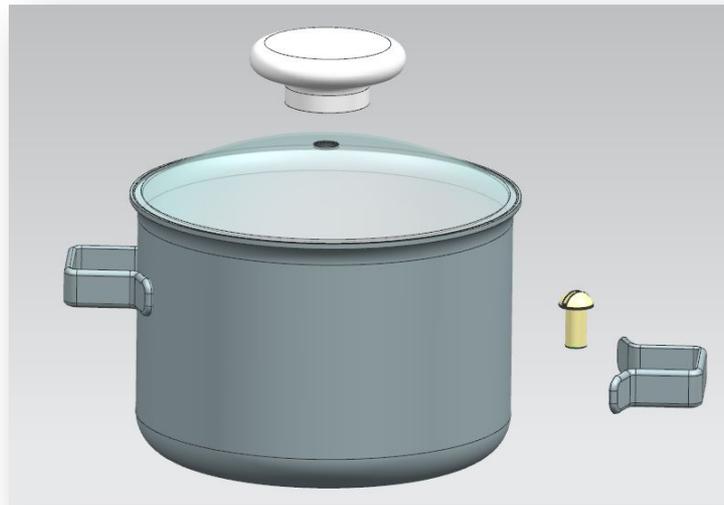
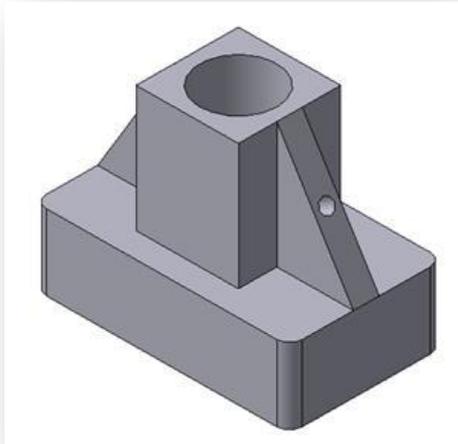
- способность распознавания и изображения сложных криволинейных граней,
- возможность рендеринга тоновых изображений,
- особые построения на поверхности (отверстия).

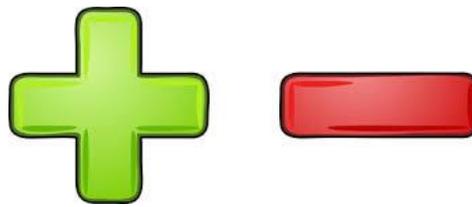
Недостатки поверхностной модели

- возникновение неоднозначности при попытке моделирования реального твердого тела,
- недостаточность точности представления некоторых поверхностных моделей для обеспечения надежных данных о трехмерных объемных телах,
- сложность процедур удаления скрытых линий и отображения внутренних областей.

Твёрдотельная (геометрическая) модель – трёхмерная геометрическая модель, представляющая форму изделия как результат композиции множества геометрических элементов с применением операций булевой алгебры к этим геометрическим элементам (ГОСТ 2.052).

**Конструктивная
твёрдотельная
геометрия**





Преимущества твердотельной модели:

- Полное определение объемной формы с возможностью разграничивать внутреннюю и внешние области объекта.
- Обеспечение автоматического удаления скрытых линий.
- Автоматическое построение 3D разрезов компонентов, что особенно важно при анализе сложных сборочных изделий.
- Применение методов анализа с автоматическим получением точных масс-инерционных характеристик.
- Получение фотореалистичных изображений объектов.
- Возможность имитации динамики механизмов, процедур генерации траектории движения инструмента, функционирования роботов.

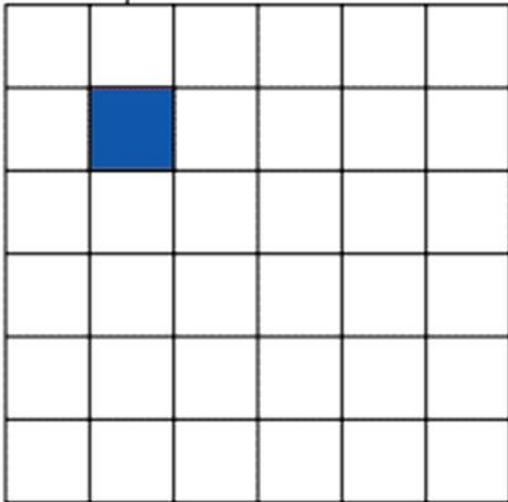
Сравнительные возможности трехмерных моделей

| Операция | Каркасная модель | Поверхностная модель | Твердотельная модель |
|--|---|---|--|
| Геометрические расчеты (объем, длина, масса и пр.) | Трудны или невозможны | Трудны или невозможны | Возможны |
| Генерация видов | Для контроля (нет связи между видами) | Для визуального контроля | Возможна |
| Удаление невидимых элементов | Вручную | Зависит от способа задания поверхности | Возможно |
| Разрезы | Вручную | Вручную для большинства моделей | Возможны даже со штриховкой |
| ЧПУ | Для контроля | Возможна автоматизация | Возможна автоматизация |
| Размеры, допуски | Для контроля | Возможны | Возможны |
| Проверка пересечений | Визуальная (заключение объектов в параллелепипеды) | Визуальная (объемы не определены) | Возможна |
| Возможность изготовления объекта | Гарантии возможности изготовления нет | Гарантии возможности изготовления нет | Можно проверить возможность изготовления |
| Измерения | Некоторые виды (например, расстояния между точками) | Некоторые виды (например, расстояния между точками и вычисления площадей) | Все измерения (потенциально могут выполняться точно) |

Виды представления геометрических моделей, не вошедшие в стандарты

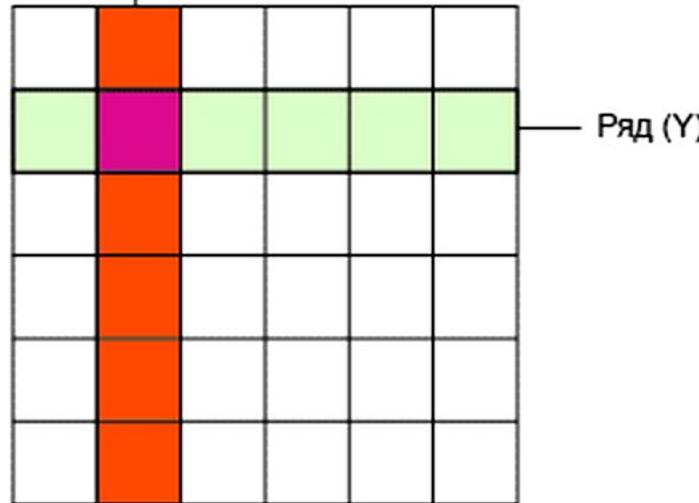
1. Растровая модель – это цифровое представление пространственных объектов в виде совокупности ячеек раstra (пикселей) с присвоенными им значениями *атрибута*. Каждой ячейке **растровой модели** соответствует одинаковый по размерам, но разный по характеристикам участок поверхности объекта.

Элемент раstra (Ячейка, Пиксел)



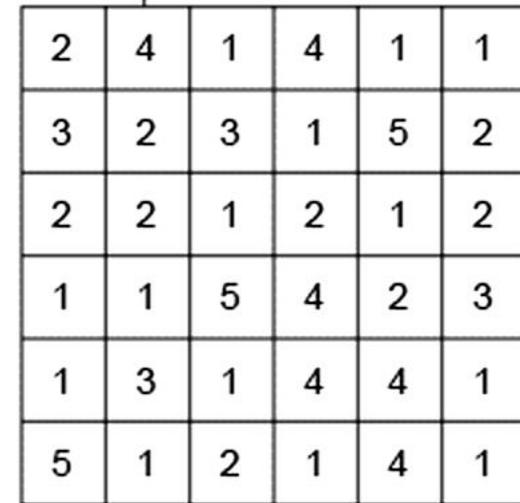
| | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Колонка (X)



| | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Значение (Z)



| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 4 | 1 | 4 | 1 | 1 |
| 3 | 2 | 3 | 1 | 5 | 2 |
| 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 1 | 1 | 5 | 4 | 2 | 3 |
| 1 | 3 | 1 | 4 | 4 | 1 |
| 5 | 1 | 2 | 1 | 4 | 1 |

Примеры растровых моделей

Растровое изображение

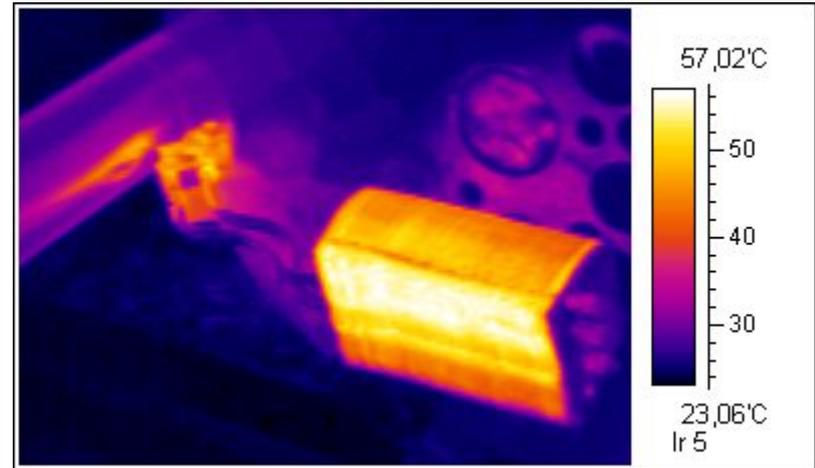
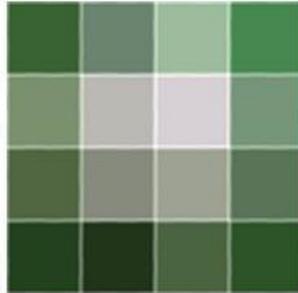
400x400



40x40

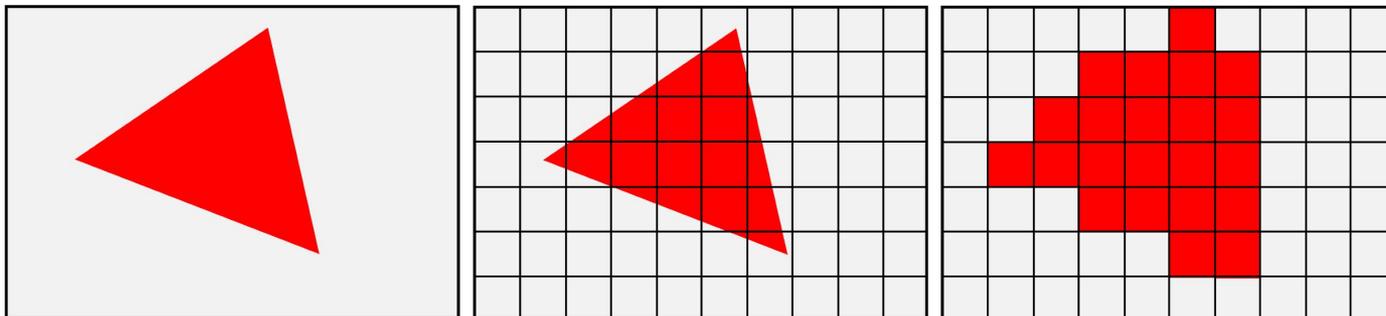


4x4

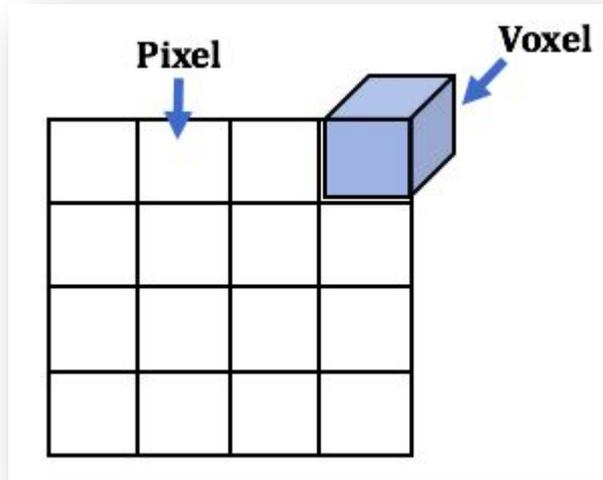


Изображение с тепловизора

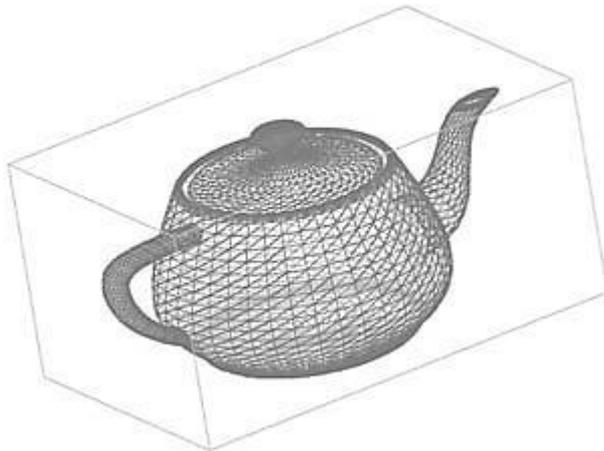
Растрезация фрагмента поверхностной модели



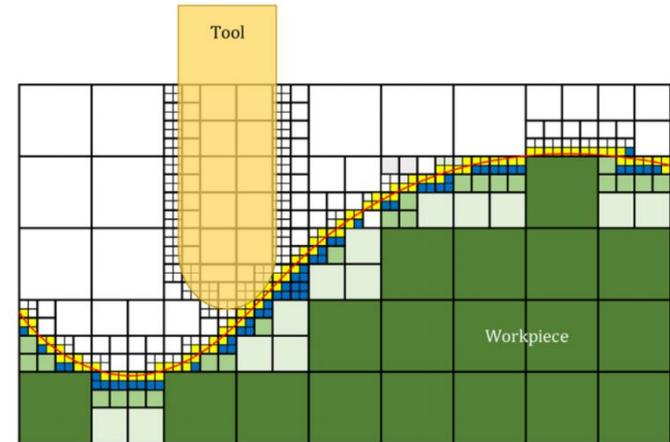
2. Воксельная модель – модель, состоящая из **вокселей** (элементов объёмного изображения, содержащих значение элемента растра в трёхмерном пространстве). Воксели являются аналогами двумерных пикселей для трёхмерного пространства.



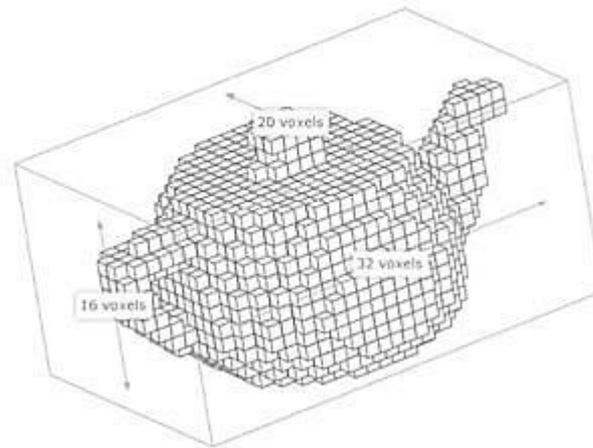
Поверхностная модель



Воксельное представление траектории фрезы в САМ



Воксельная модель



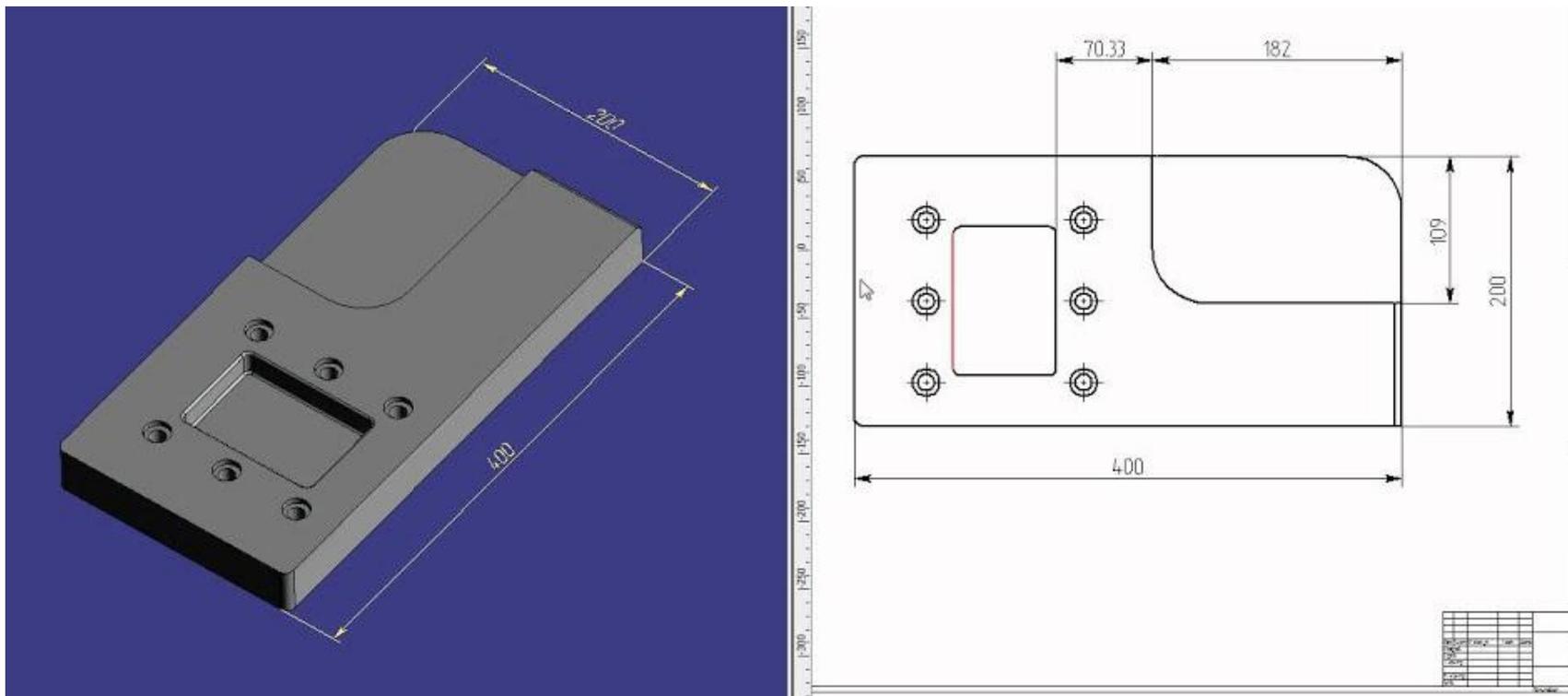
Математические знания, необходимые для изучения геометрических моделей

- Векторная алгебра
- Матричные операции
- Формы математического представления кривых и поверхностей
- Дифференциальная геометрия кривых и поверхностей
- Аппроксимация и интерполяция кривых и поверхностей
- Сведения из элементарной геометрии на плоскости и в пространстве

Современные концепции и понятия геометрического моделирования

- Ассоциативность.
- Параметризация.
- Мастер-модель.
- Создание открытой модели, позволяющей ее оптимизировать.
- Включение в геометрическую модель требований к изготовлению изделия.
- Проектирование поверхностей любой сложности.
- Гибридное моделирование.
- Синхронное моделирование.
- Конвергентное моделирование.
- ...

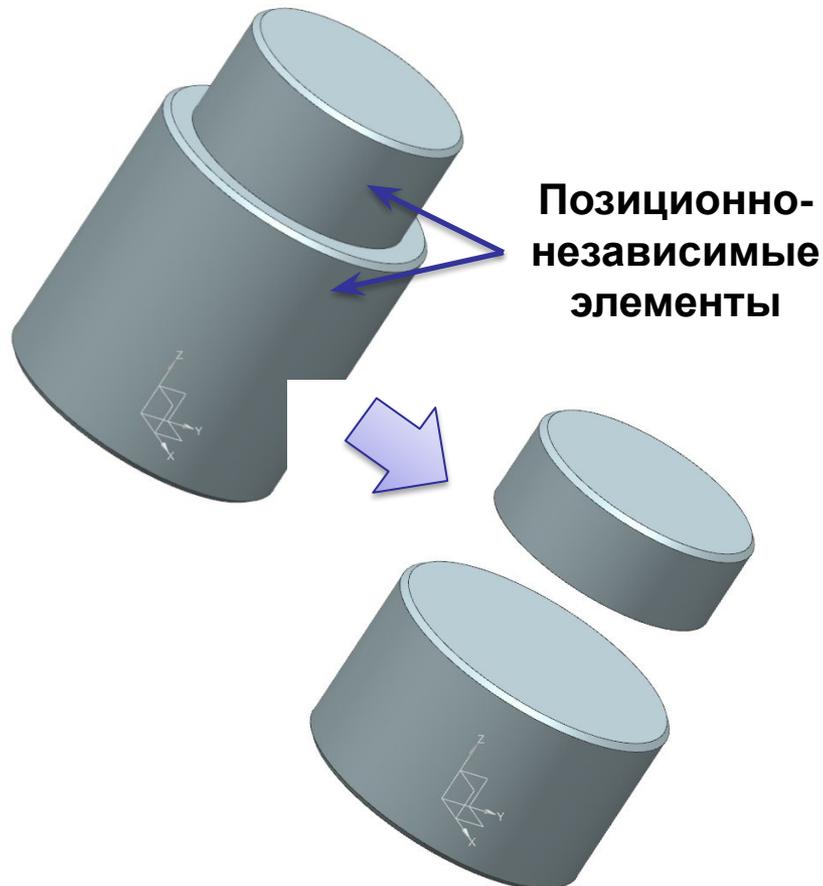
Ассоциативность (данных) – поддержание целостности взаимосвязанных представлений проектируемого изделия, таких как его трехмерная модель, чертеж, сетка для конечно-элементного анализа и др. **Ассоциативность** базируется на принципах наследования.



Наследование изменений геометрических элементов

Ассоциативность (моделей) – способность системы запоминать логические связи между операциями построения и геометрическими объектами, которые использовались в качестве опорных в данной операции. (т. е. на которые производились ссылки при построении).

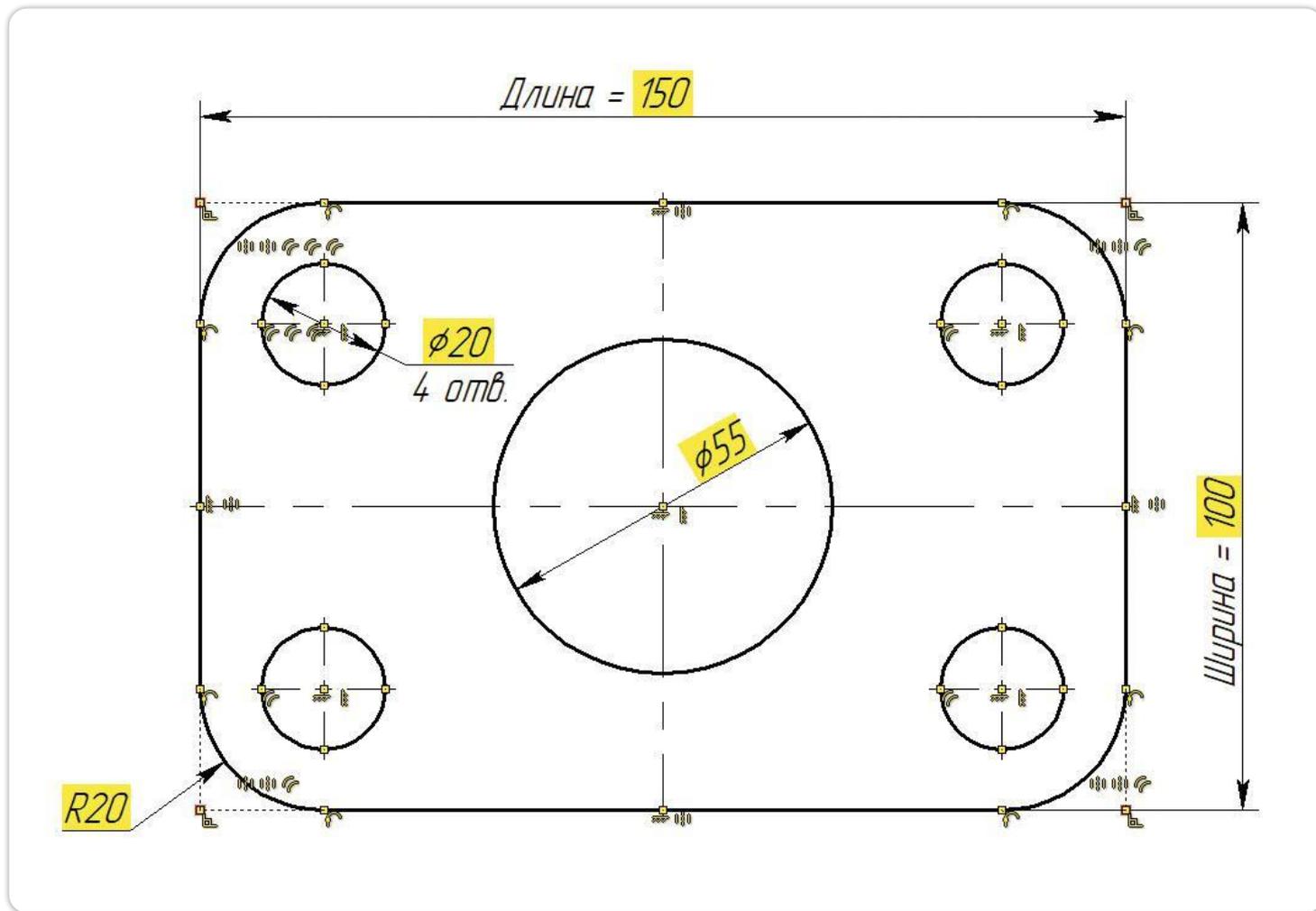
**Не ассоциативные
геометрические элементы**



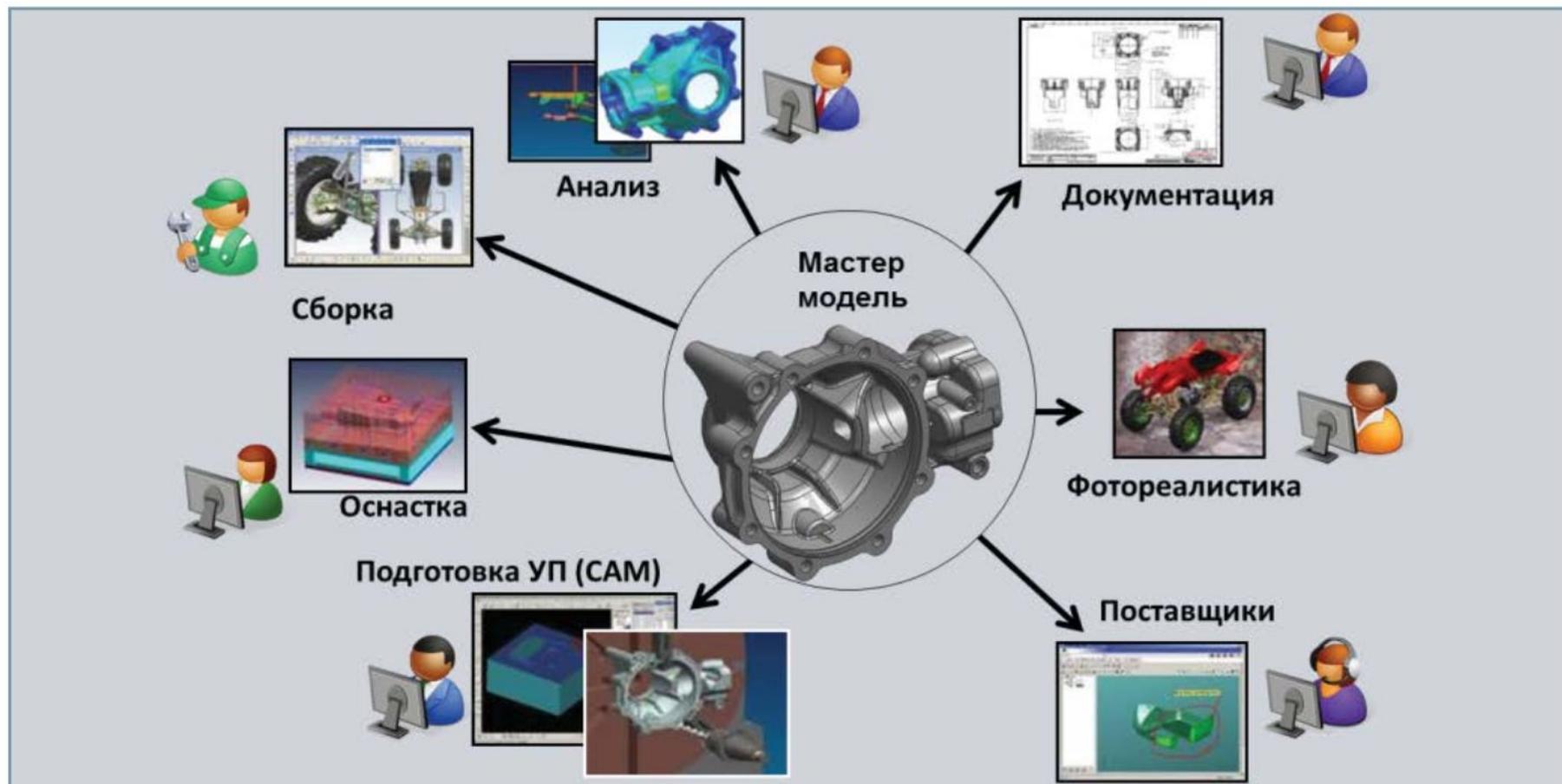
**Ассоциативные
геометрические элементы**



Параметризация – это моделирование с использованием параметров элементов модели и соотношений между этими параметрами.



Мастер-модель – модель, которая служит источником данных для потребителей, но при этом они работают с её ассоциативно связанной копией.

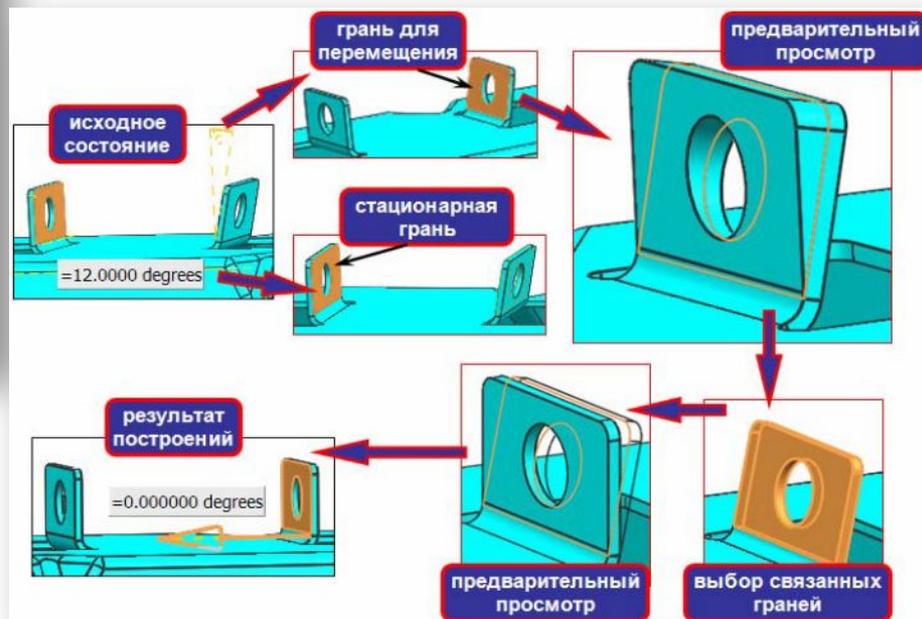
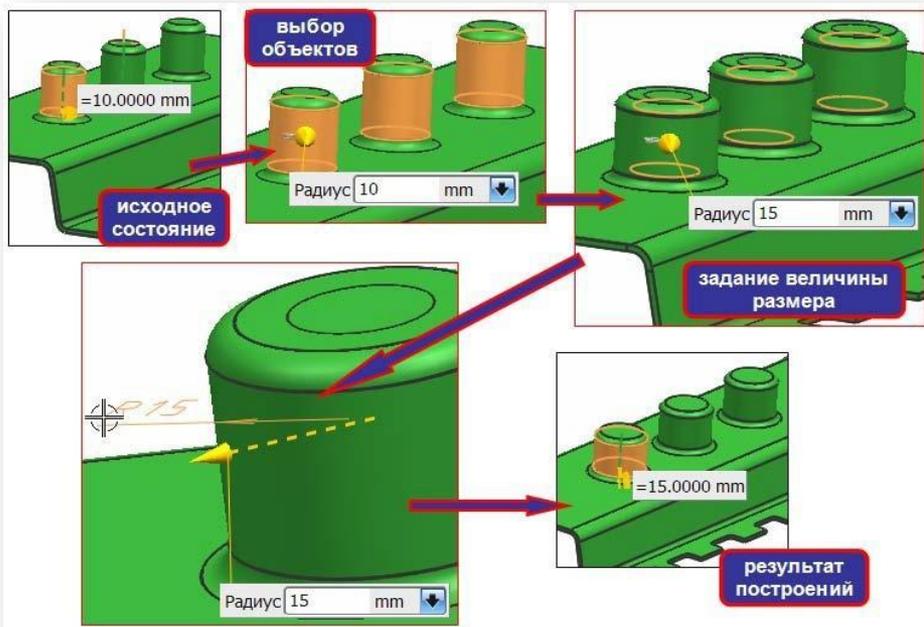


Использование принципа мастер-модели в разных приложениях NX

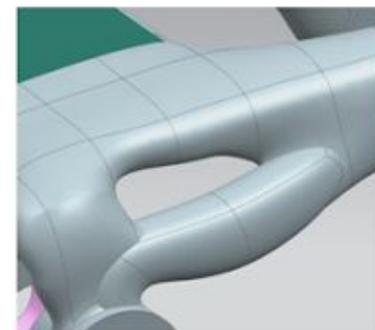
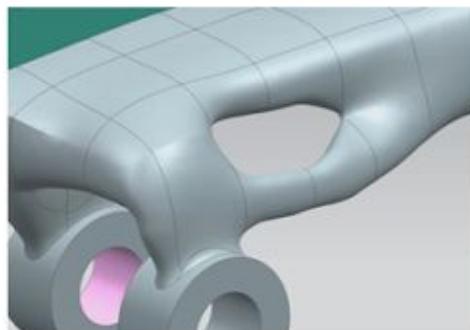
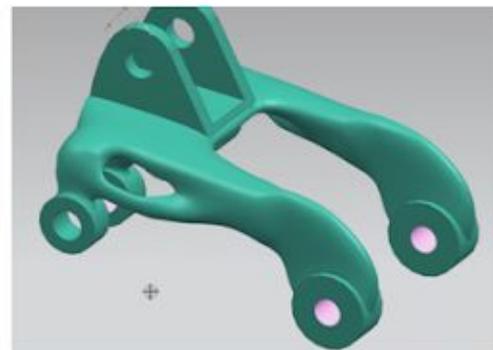
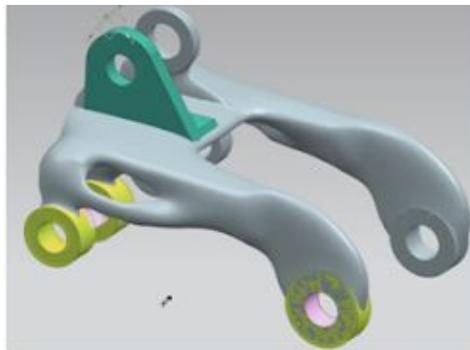
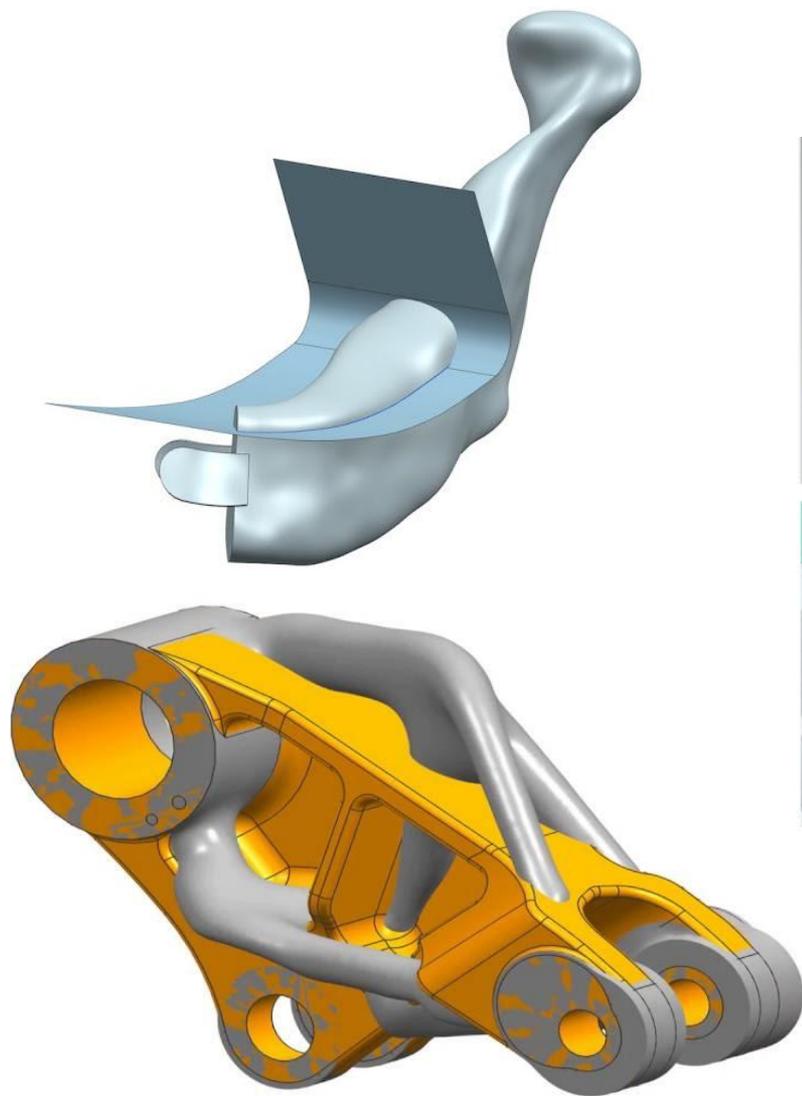
(Ведмидь П. А., Сулинов А. В. Программирование обработки в NX CAM, 2014)

Гибридное моделирование – сочетание твердотельного моделирования, моделирования поверхностей и кривых.

Синхронное моделирование – поэлементное моделирование без дерева построения, позволяющее задавать фиксированные размеры, параметры и правила проектирования в момент создания или редактирования модели, не пользуясь при этом историей её создания.



Конвергентное моделирование – моделирование с использованием фасетных и граничных (B-гер) моделей.



Литература

1. Плотников, В. А. Цифровизация производства: теоретическая сущность и перспективы развития в российской экономике // Известия СПбГЭУ, 2018. - №4 (112). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovizatsiya-proizvodstva-teoreticheskaya-suschnost-i-perspektivy-razvitiya-v-rossiyskoj-ekonomike> (дата обращения: 13.02.2020).