№ 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]

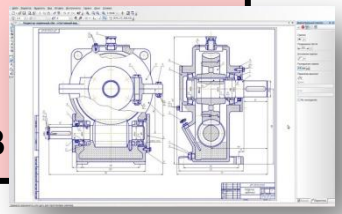
Цифровизация (англ. *Digitalization*) - это процесс переноса в цифровую среду функций и деятельностей (бизнес-процессов), ранее выполнявшихся людьми и организациями.

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.)

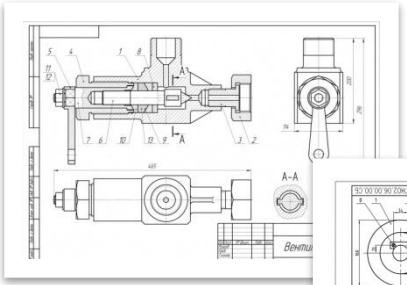
Интернет и распространение компьютерных технологий позволили перейти к интеллектуальным производствам и глобально интегрированным цепочкам поставок.

3-я волна (2000-2020-е гг.)

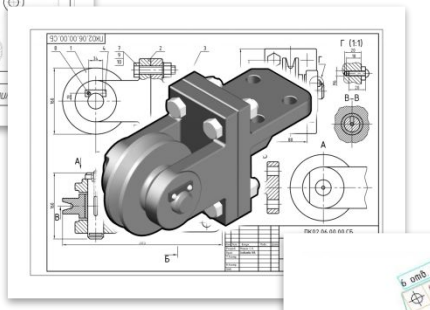
переход к «подключенным вещам» (IoT), преобразованию всех производственных и социальных систем в киберфизические системы

Уровни развития процессов цифровизации проектирования и производства

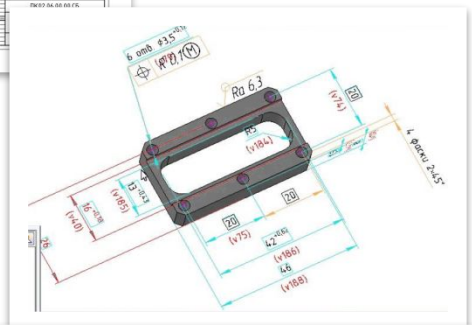
I. Электронный чертеж.



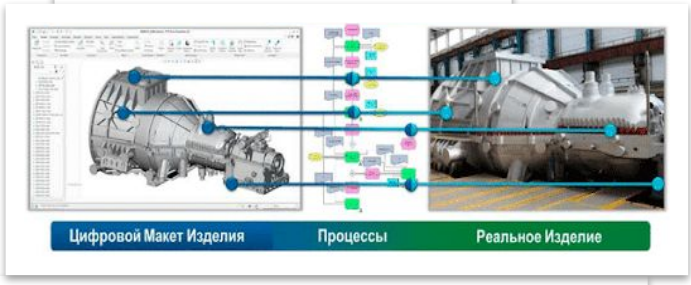
II. Электронная 3D модель и чертеж.



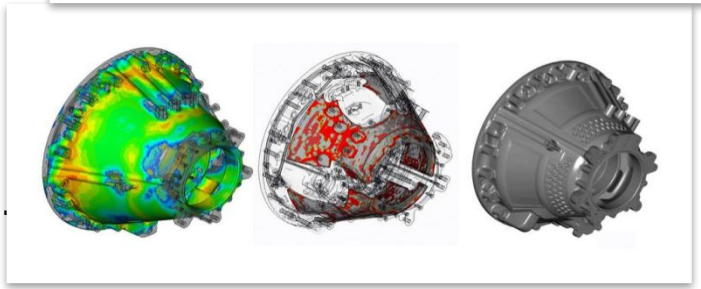
III. Электронная модель с информацией для изготовления – первоисточник (узаконенный носитель) конструкторской и технологической информации.



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



V. Электронная модель – «цифровой двойник».

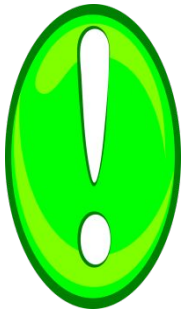


ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК

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.

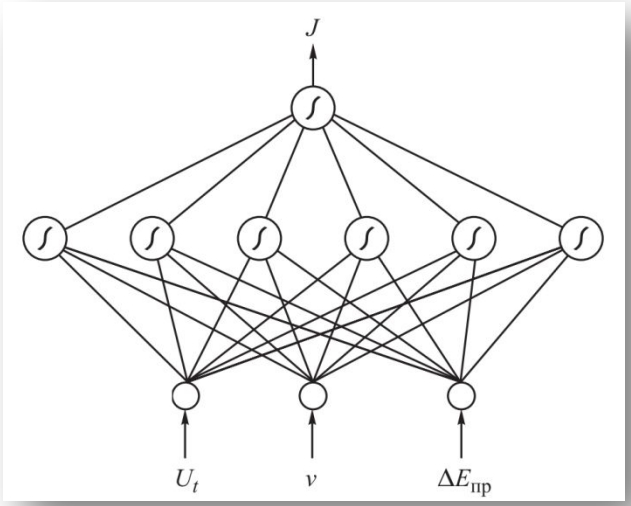
- Он позволяет моделировать процессы производства и производить виртуальные расчеты и испытания.
- При его использовании многократно сокращаются сроки выпуска изделий на рынок, повышается качество, снижается вес, себестоимость, особенно, если идет речь о технически сложной продукции.

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

Пример схемы построения цифрового двойника режущего инструмента

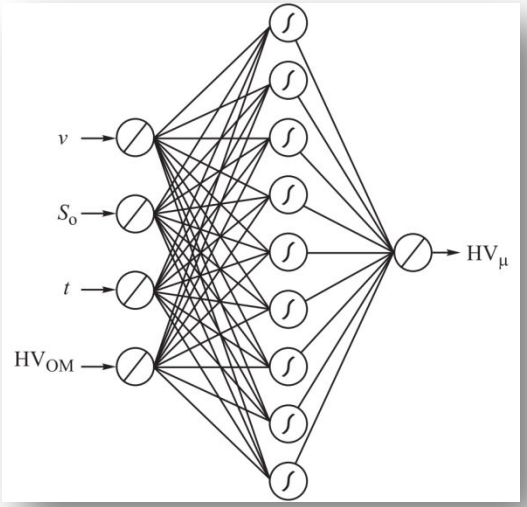
(Ю.Г. Кабалдин и др., Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)

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

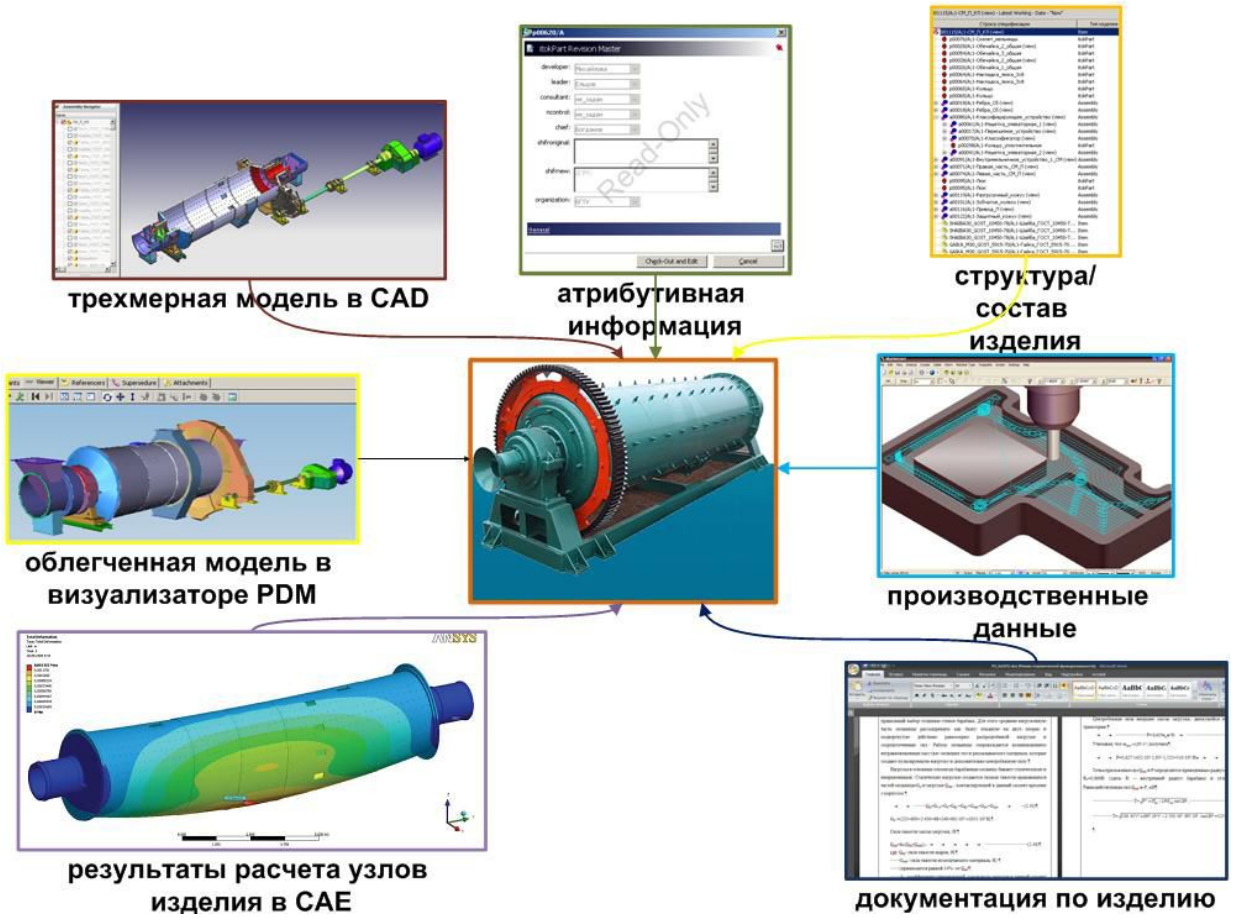
Наименование	Описание
ГОСТ 2.102-2013 ЕСКД. Виды и комплектность конструкторских документов.	Понятия электронной модели детали, электронной модели сборочной единицы, электронной структуры изделия.
ГОСТ 2.051-2013 ЕСКД. ***Электронные документы***.	Общие требования к выполнению электронных конструкторских 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 CAD 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 CAD 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.



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.

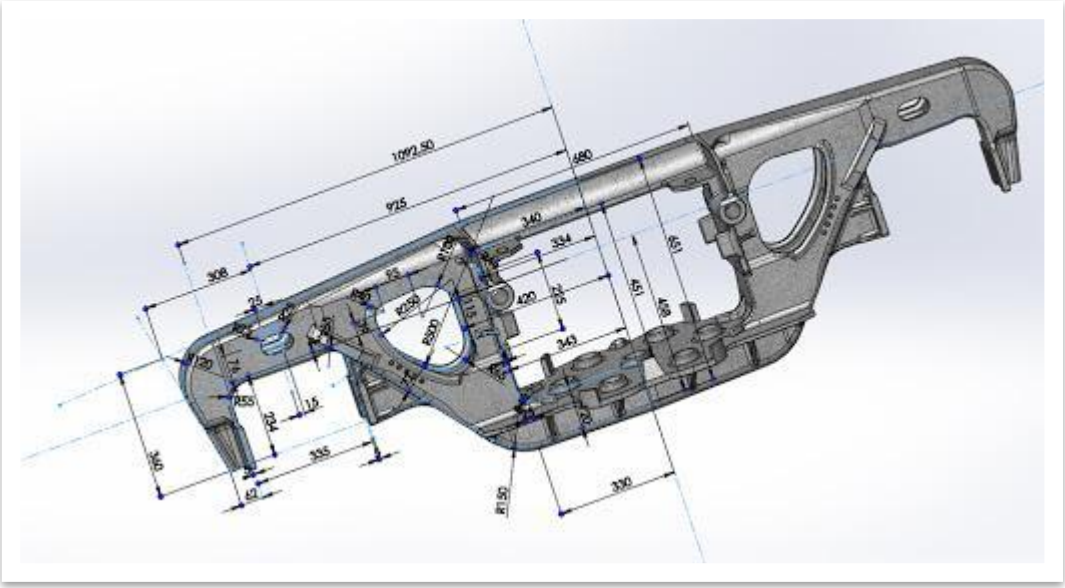
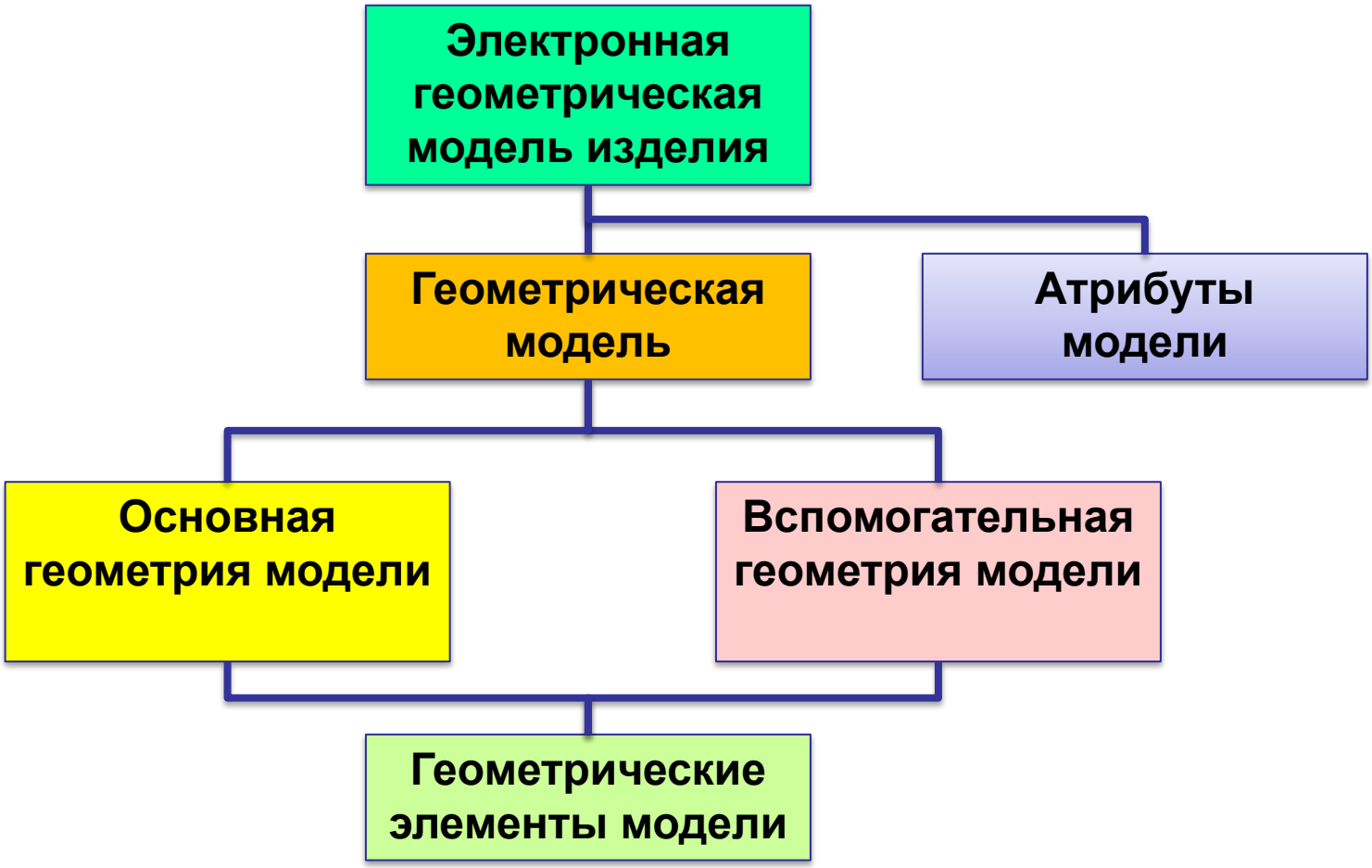
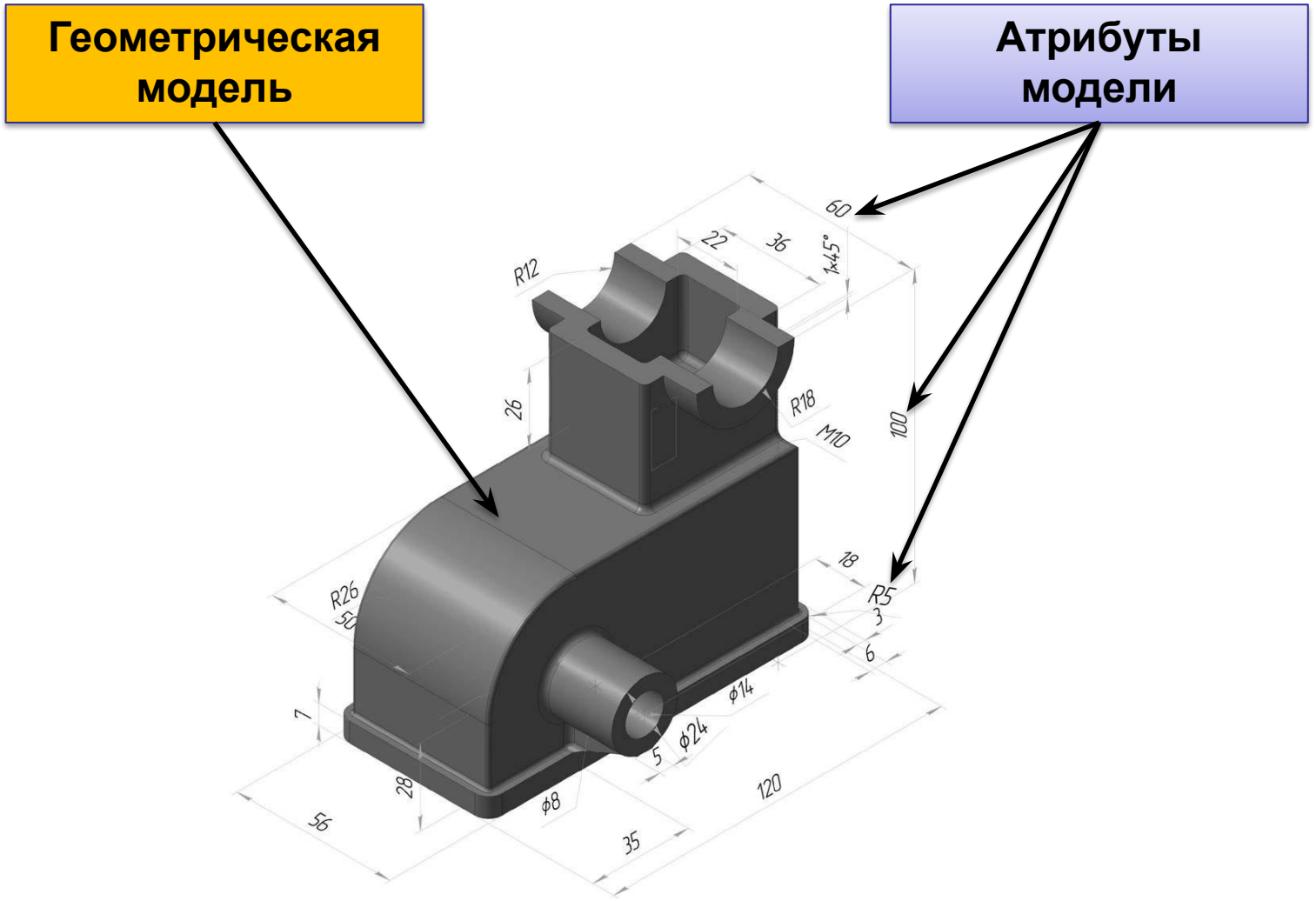


Схема состава ЭГМ изделия

(ГОСТ 2.052)

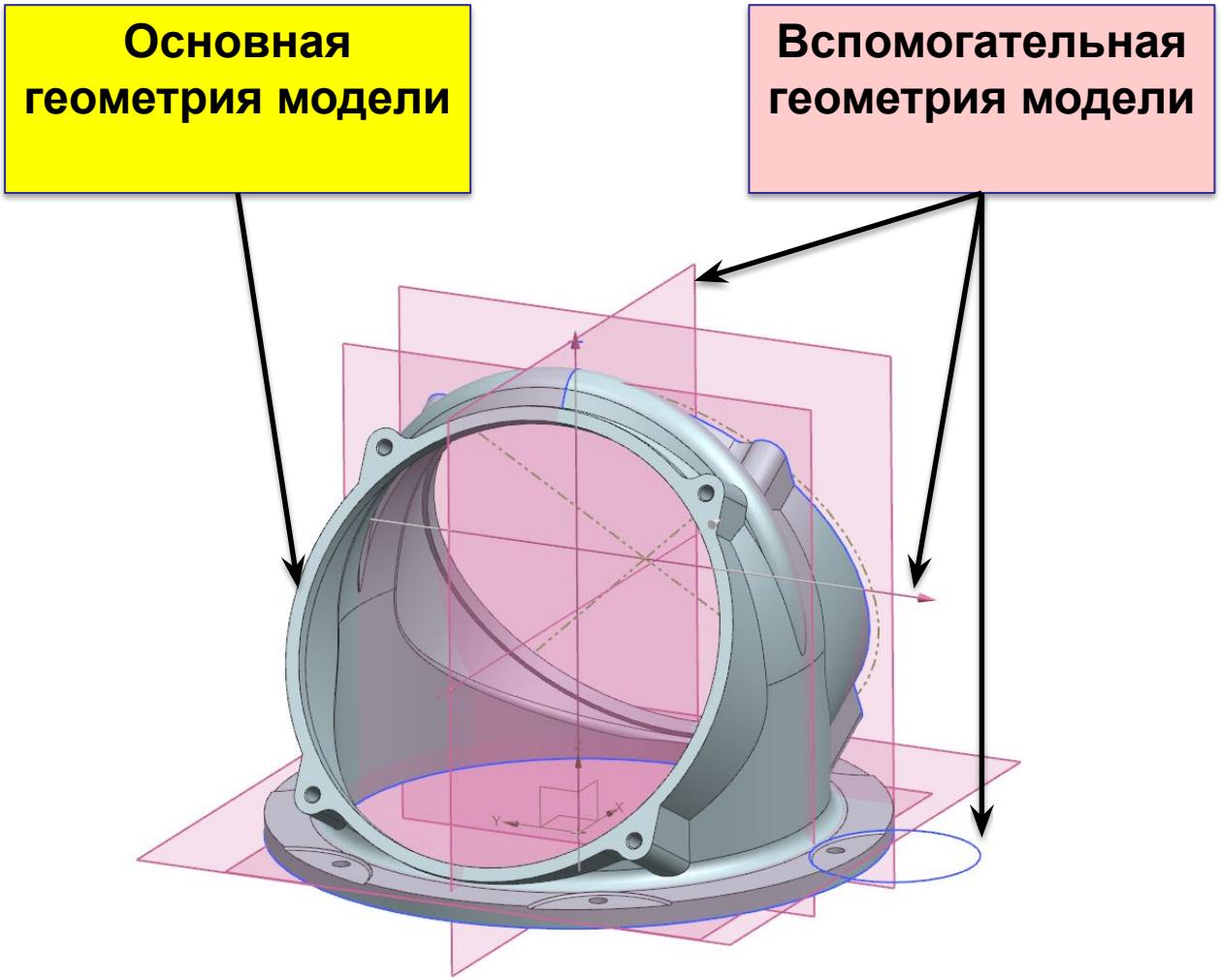


Атрибут геометрической модели – дополнительная неграфическая информация, связанная с геометрическим элементом модели или моделью в целом.



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

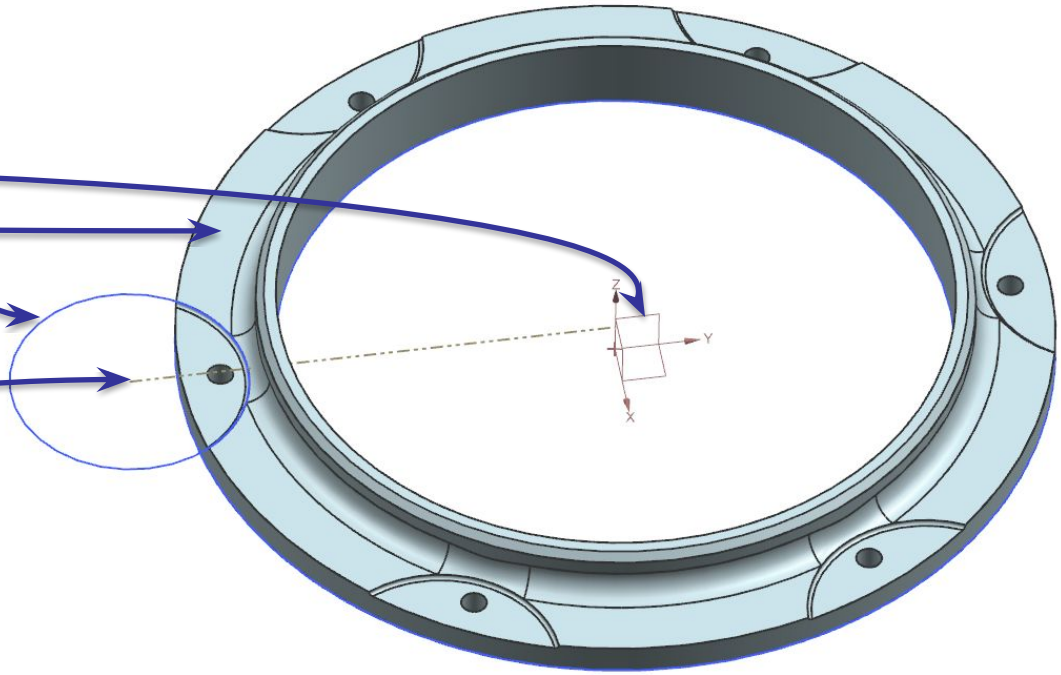
Основная геометрия – совокупность геометрических элементов, которые непосредственно определяют форму моделируемого изделия.



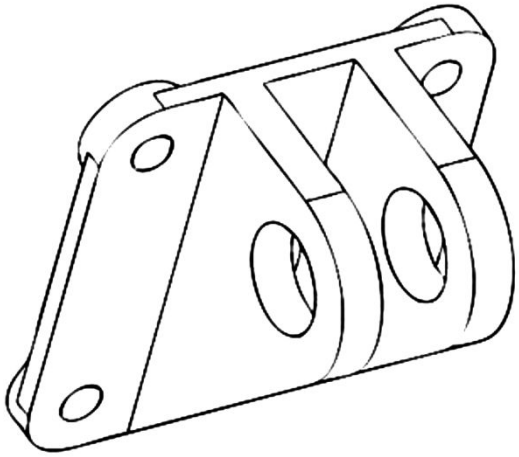
Геометрический элемент – идентифицированный (именованный) геометрический объект.

Геометрические элементы модели

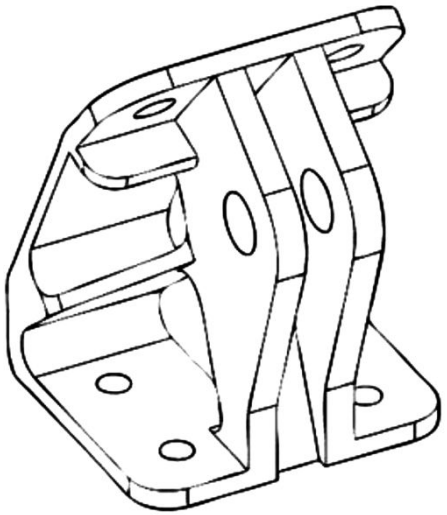
- точка,
- линия,
- плоскость,
- поверхность,
- геометрическая фигура,
- геометрическое тело,
- осевая линия,
- опорные точки сплайна,
- направляющие и образующие линии поверхности и др.



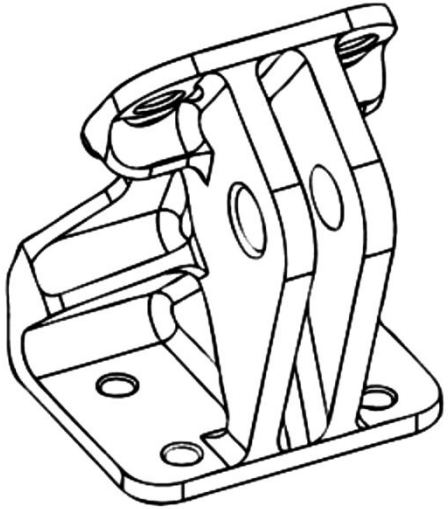
Пример представления электронной модели детали на стадиях разработки



На стадии технического предложения

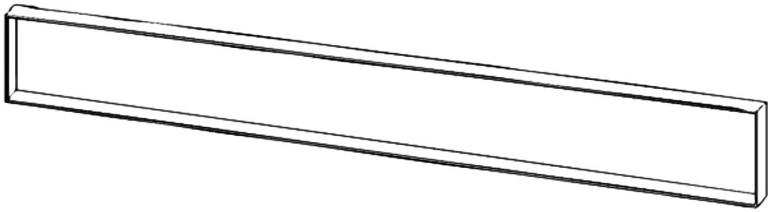


На стадии эскизного проекта

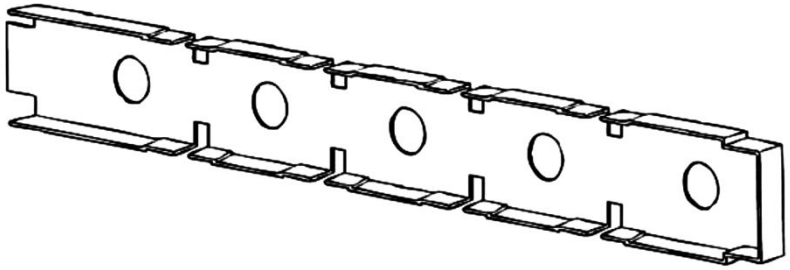


На стадиях технического проекта и рабочей КД

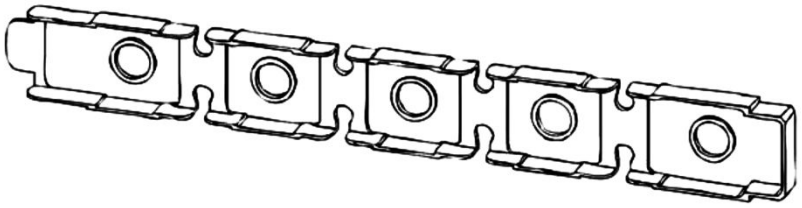
Пример представления электронной модели детали на стадиях разработки



На стадии технического предложения



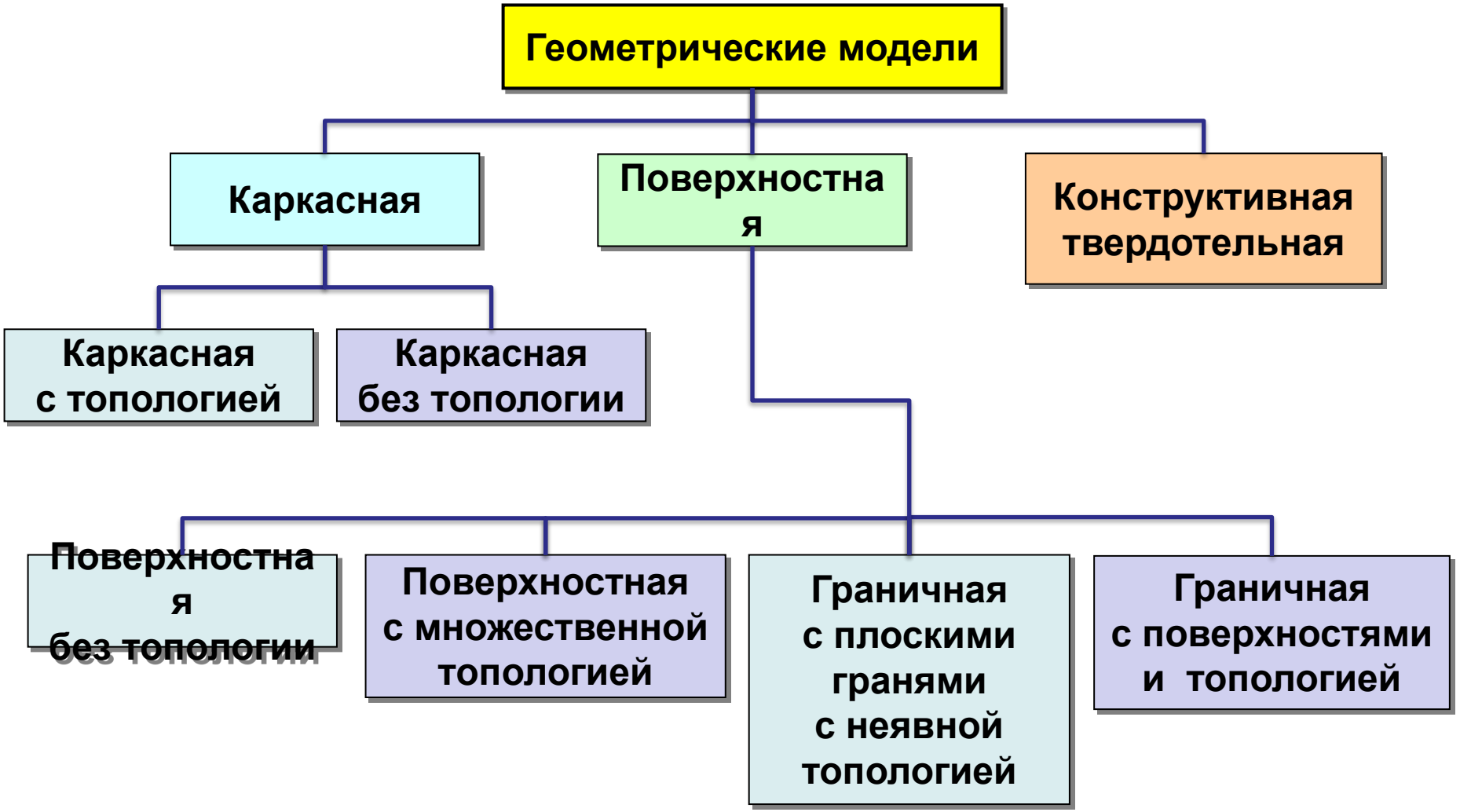
На стадии эскизного проекта



На стадиях технического проекта и рабочей КД

Классификация типов геометрических моделей

(ГОСТ 2.052)



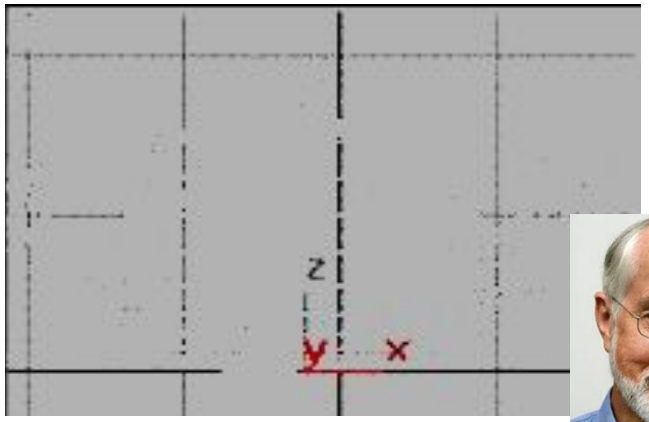
Каркасная (геометрическая) модель – трёхмерная геометрическая модель, представленная совокупностью точек, отрезков и кривых, определяющих в пространстве форму изделия (ГОСТ 2.052).

Каркасная модель

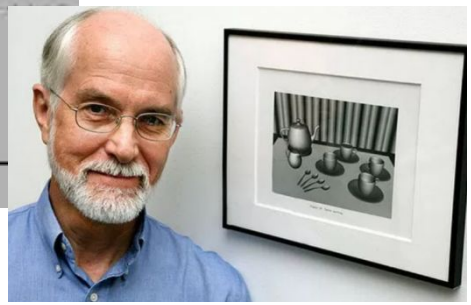
- **Каркасная с топологией**
- **Каркасная без топологии**

Топология каркасной модели – геометрическое расположение линий рёбер относительно вершин.

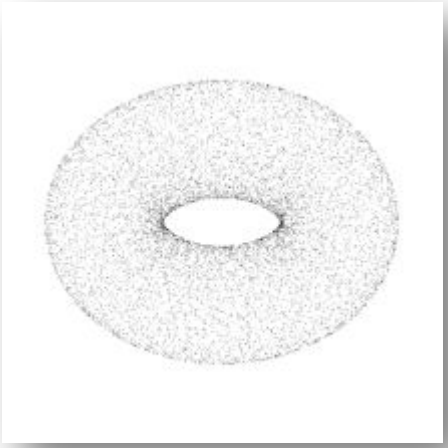
Чайник Юта –первая (и самая популярная) каркасная модель реального объекта (1974 г.)



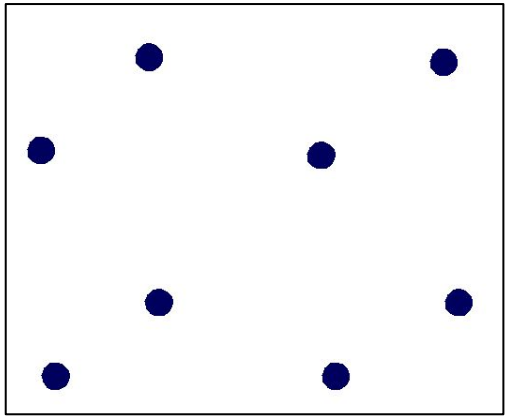
Мартин Ньювелл



(Точечная) каркасная модель без информации о топологии

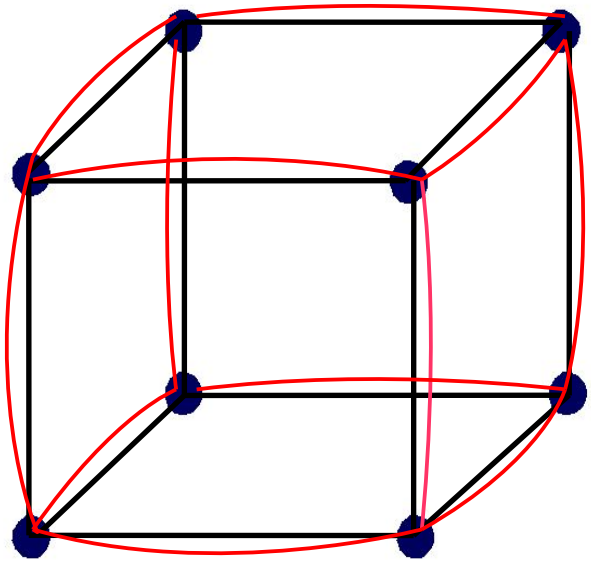


Точечная модель геометрического объекта – совокупность вектора координат вершин объекта и массива атрибутов вершин.

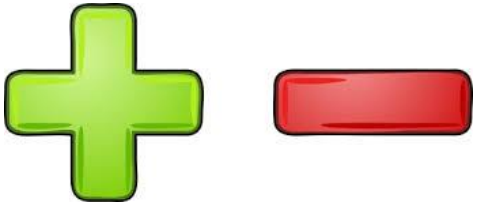


Точечная модель часто называется **облаком точек** и применяется в технологиях бесконтактных измерений.

Формирование каркасной модели на основе точечной



– установление связи между вершинами и формирование рёбер



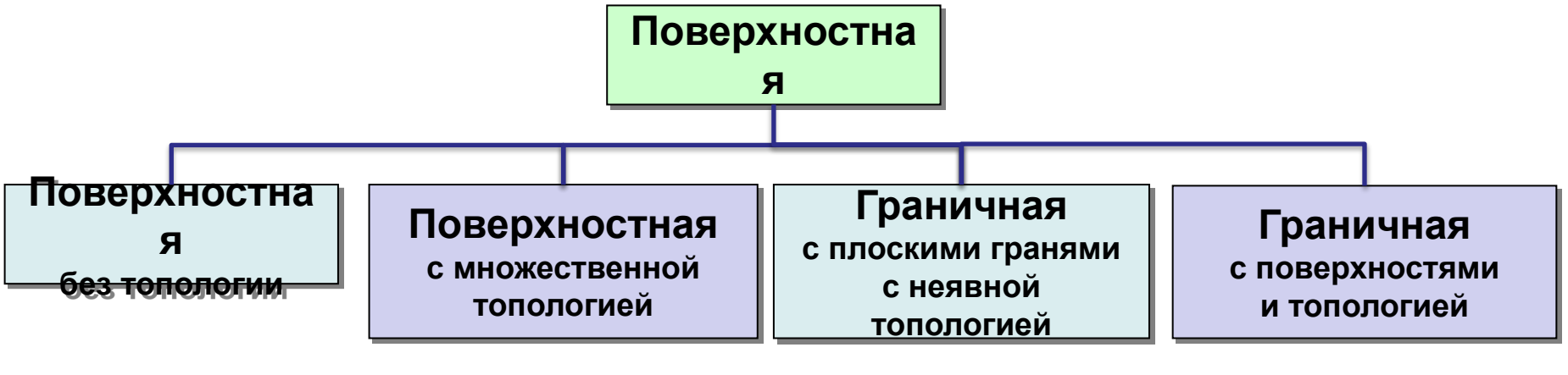
Преимущества каркасной модели

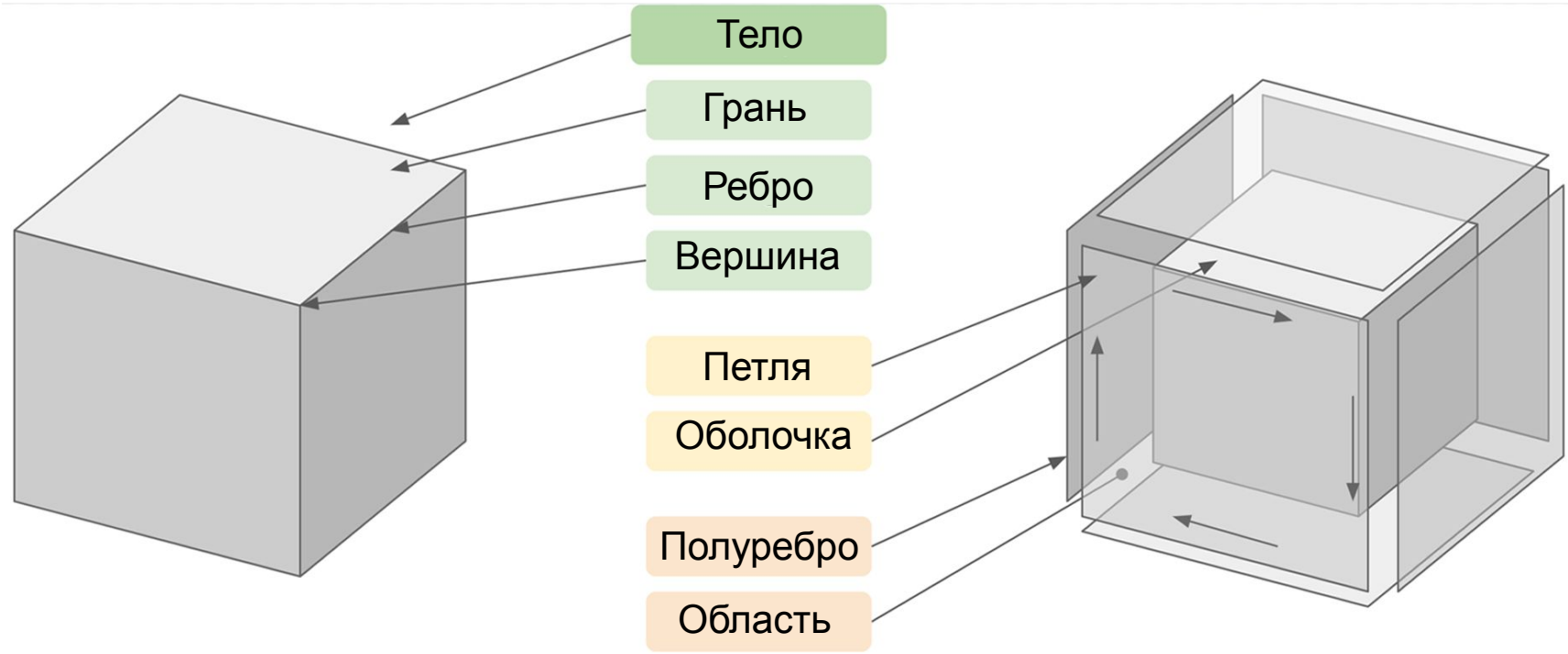
- не требовательна к вычислительным ресурсам,
- легко воспринимается человеком,
- эффективно используется для имитации траектории движения инструмента в пространстве.

Недостатки каркасной модели

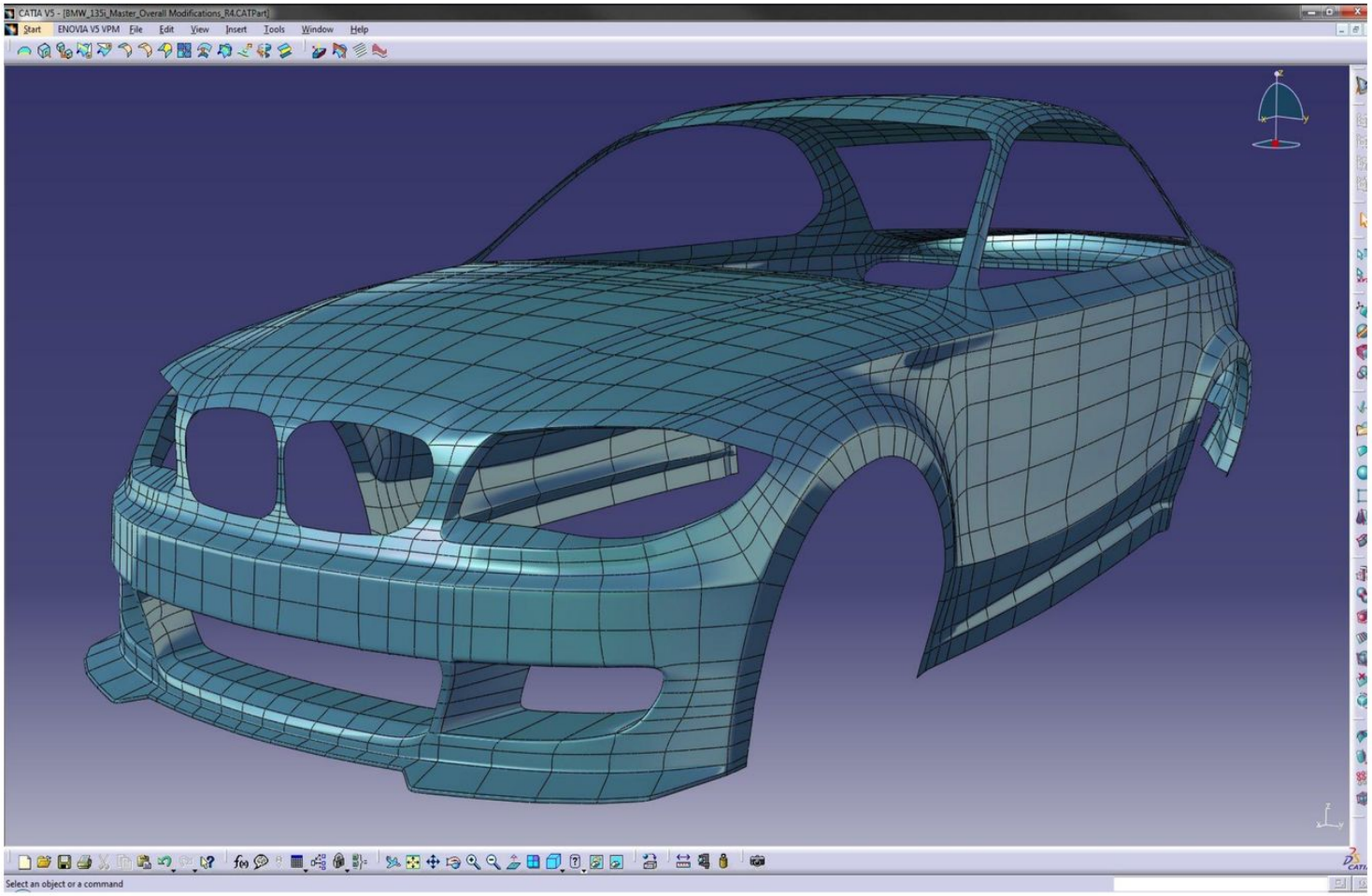
- неоднозначность – для того, чтобы представить модель в каркасном виде, нужно представить все ребра,
- трудно отличить видимые грани от невидимых,
- невозможность обнаружения нежелательных взаимодействий между гранями объекта,
- трудности, связанные с вычислением физических характеристик,
- отсутствие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

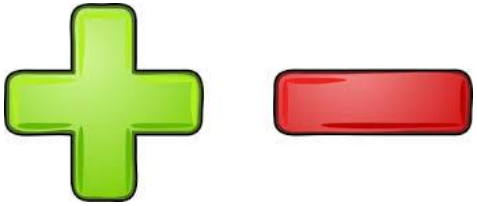
Поверхностная (геометрическая) модель – трёхмерная геометрическая модель изделия, представленная множеством ограниченных поверхностей, определяющих в пространстве форму изделия (ГОСТ 2.052).





Пример создания поверхности с помощью полигональной сетки





Преимущества поверхностной модели

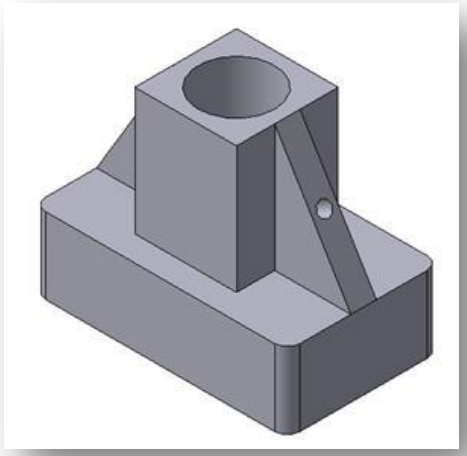
- способность распознавания и изображения сложных криволинейных граней,
- возможность рендеринга тоновых изображений,
- особые построения на поверхности (отверстия).

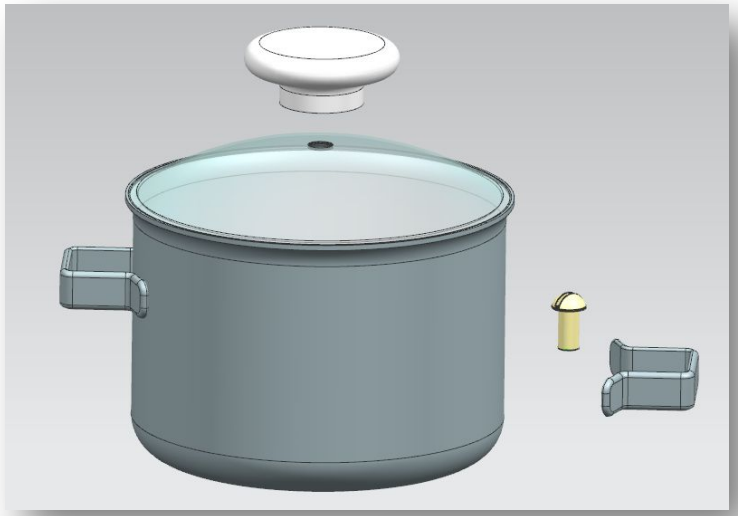
Недостатки поверхностной модели

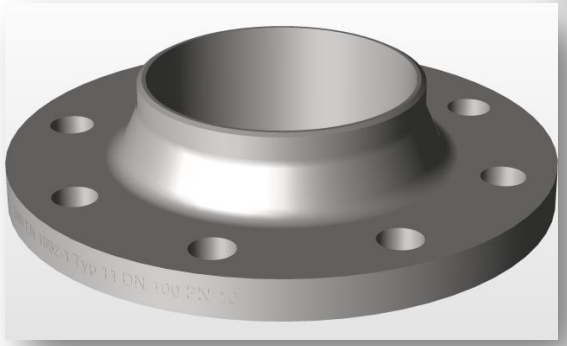
- возникновение неоднозначности при попытке моделирования реального твердого тела,
- недостаточность точности представления некоторых поверхностных моделей для обеспечения надежных данных о трехмерных объемных телах,
- сложность процедур удаления скрытых линий и отображения внутренних областей.

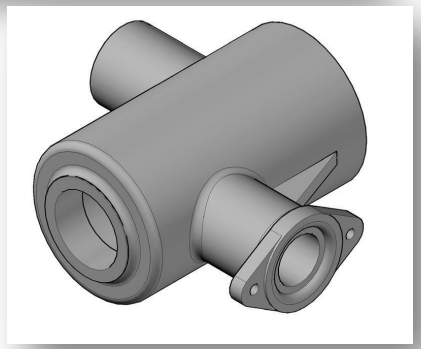
Твёрдотельная (геометрическая) модель – трёхмерная геометрическая модель, представляющая форму изделия как результат композиции множества геометрических элементов с применением операций булевой алгебры к этим геометрическим элементам (ГОСТ 2.052).

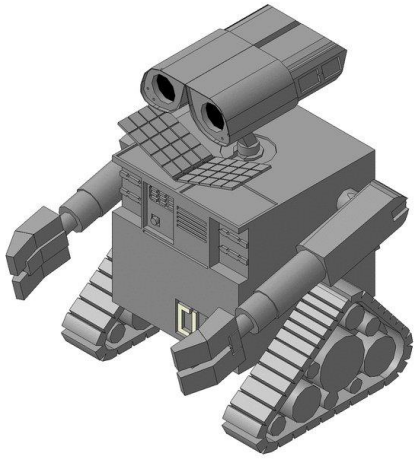
Конструктивная твердотельная геометрия

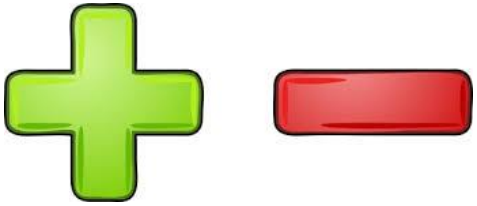












Преимущества твердотельной модели:

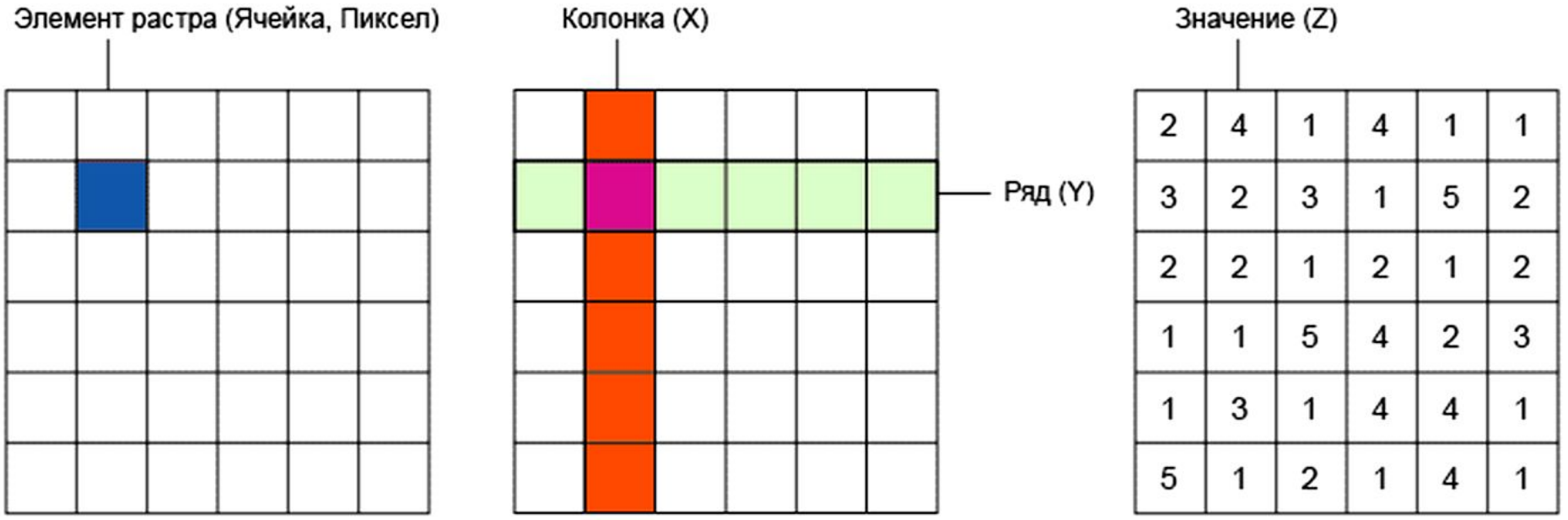
- Полное определение объемной формы с возможностью разграничивать внутреннюю и внешние области объекта.
- Обеспечение автоматического удаления скрытых линий.
- Автоматическое построение 3D разрезов компонентов, что особенно важно при анализе сложных сборочных изделий.
- Применение методов анализа с автоматическим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

Сравнительные возможности трехмерных моделей

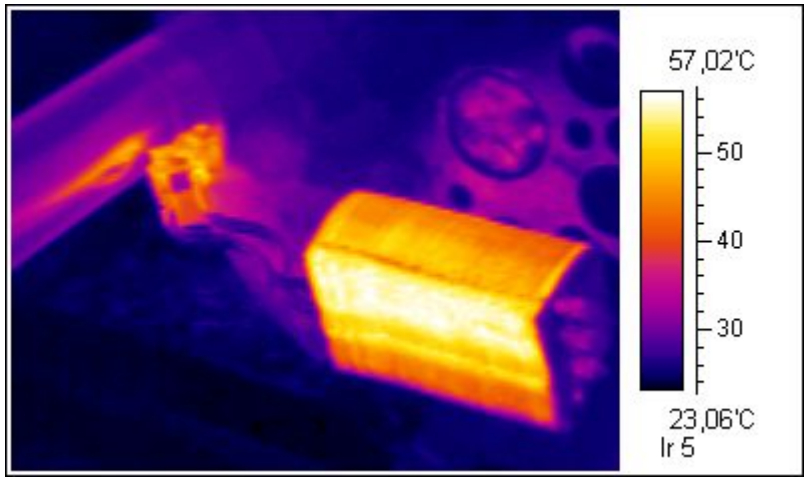
Операция	Каркасная модель	Поверхностная модель	Твердотельная модель
Геометрические расчеты (объем, длина, масса и пр.)	Трудны или невозможны	Трудны или невозможны	Возможны
Генерация видов	Для контроля (нет связи между видами)	Для визуального контроля	Возможна
Удаление невидимых элементов	Вручную	Зависит 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 растра (пикселов) с присвоенными им значениями *атрибута*. Каждой ячейке **растровой модели** соответствует одинаковый по размерам, но разный по характеристикам участок поверхности объекта.

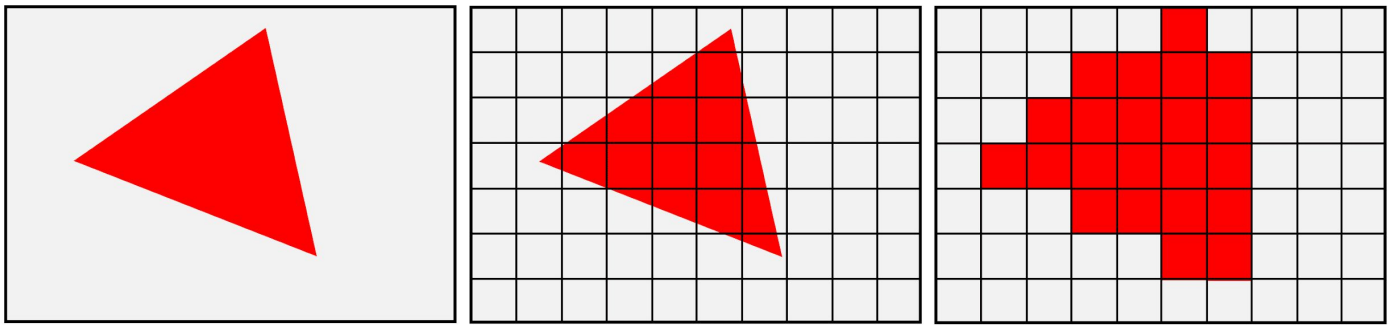


Примеры растровых моделей

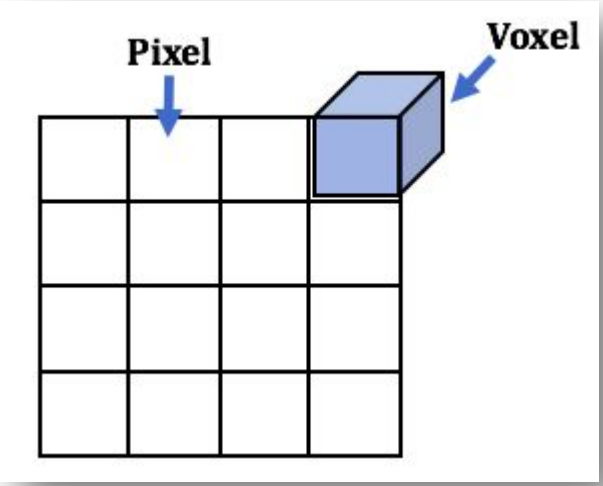


Изображение с тепловизора

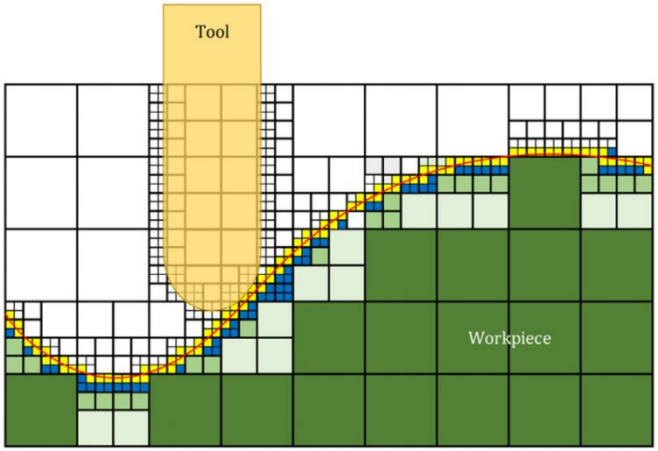
Растеризация фрагмента
поверхностной модели



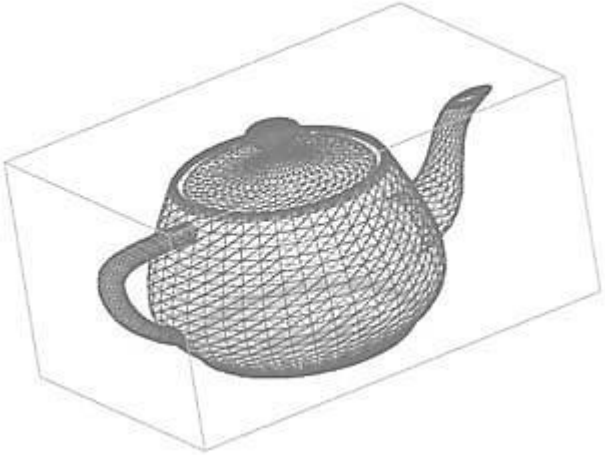
2. Воксельная модель – модель, состоящая из **вокселов** (элементов объёмного изображения, содержащих значение элемента растра в трёхмерном пространстве). Вокселы являются аналогами двумерных пикселей для трёхмерного пространства.



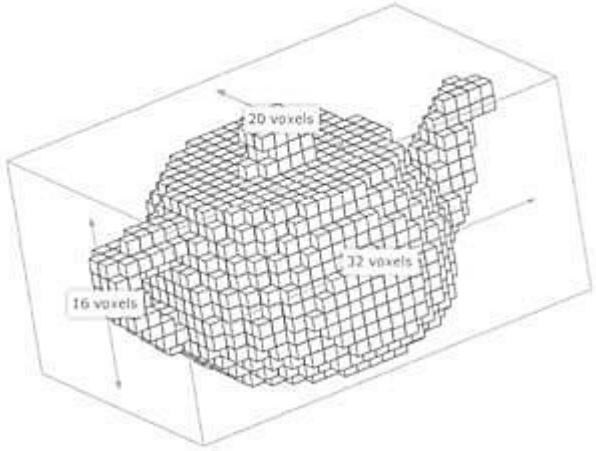
Воксельное представление траектории фрезы в CAM



Поверхностная модель



Воксельная модель



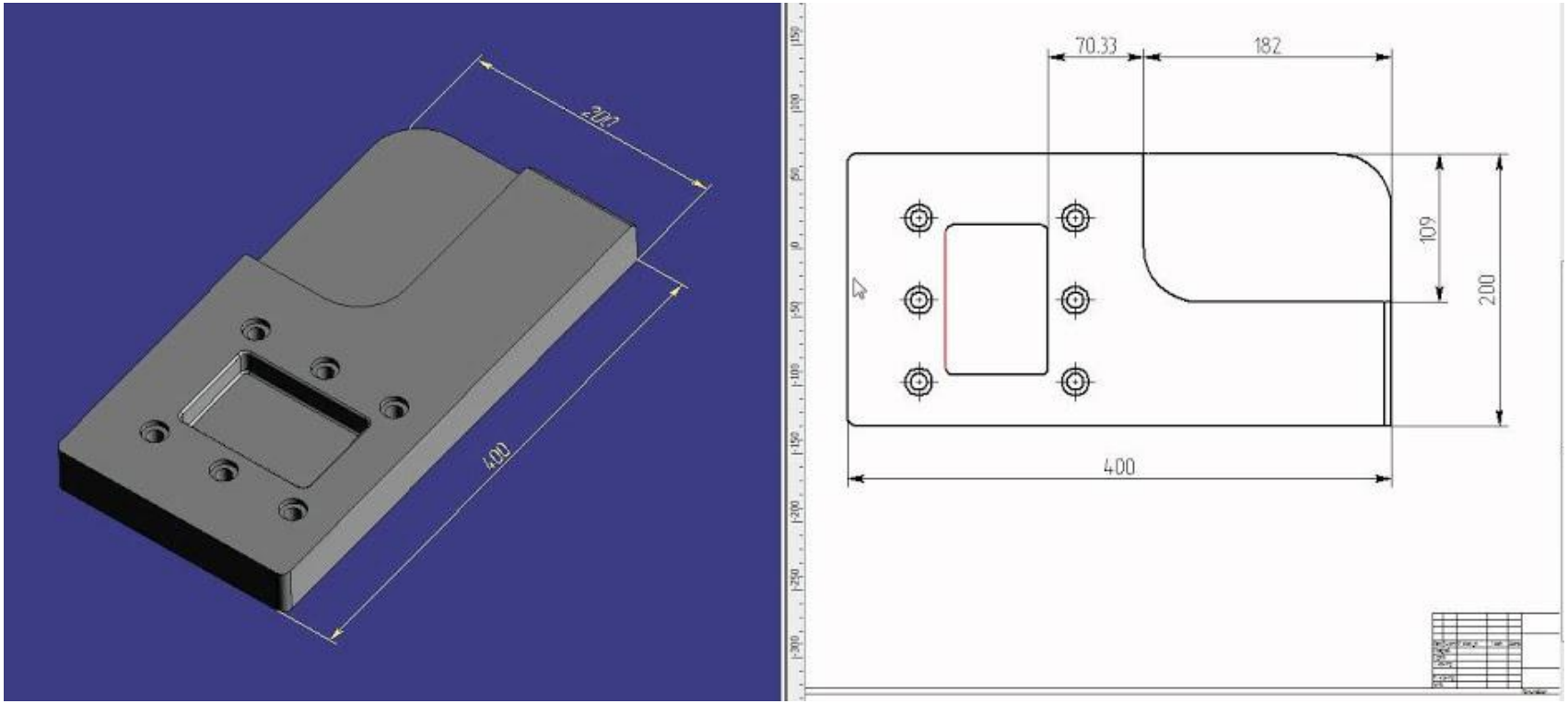
Математические знания, необходимые для изучения геометрических моделей

- 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.



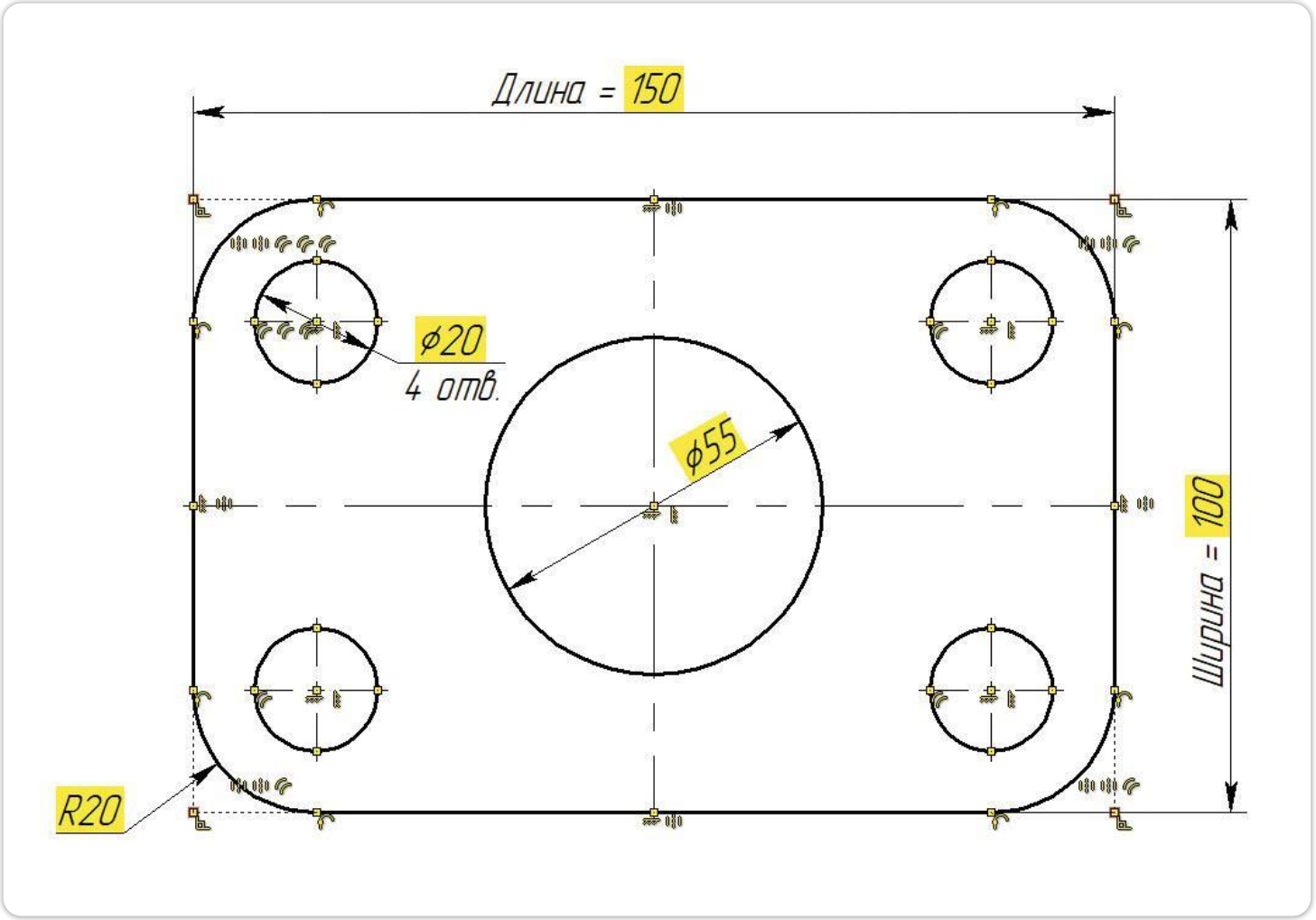
Наследование изменений геометрических элементов

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).

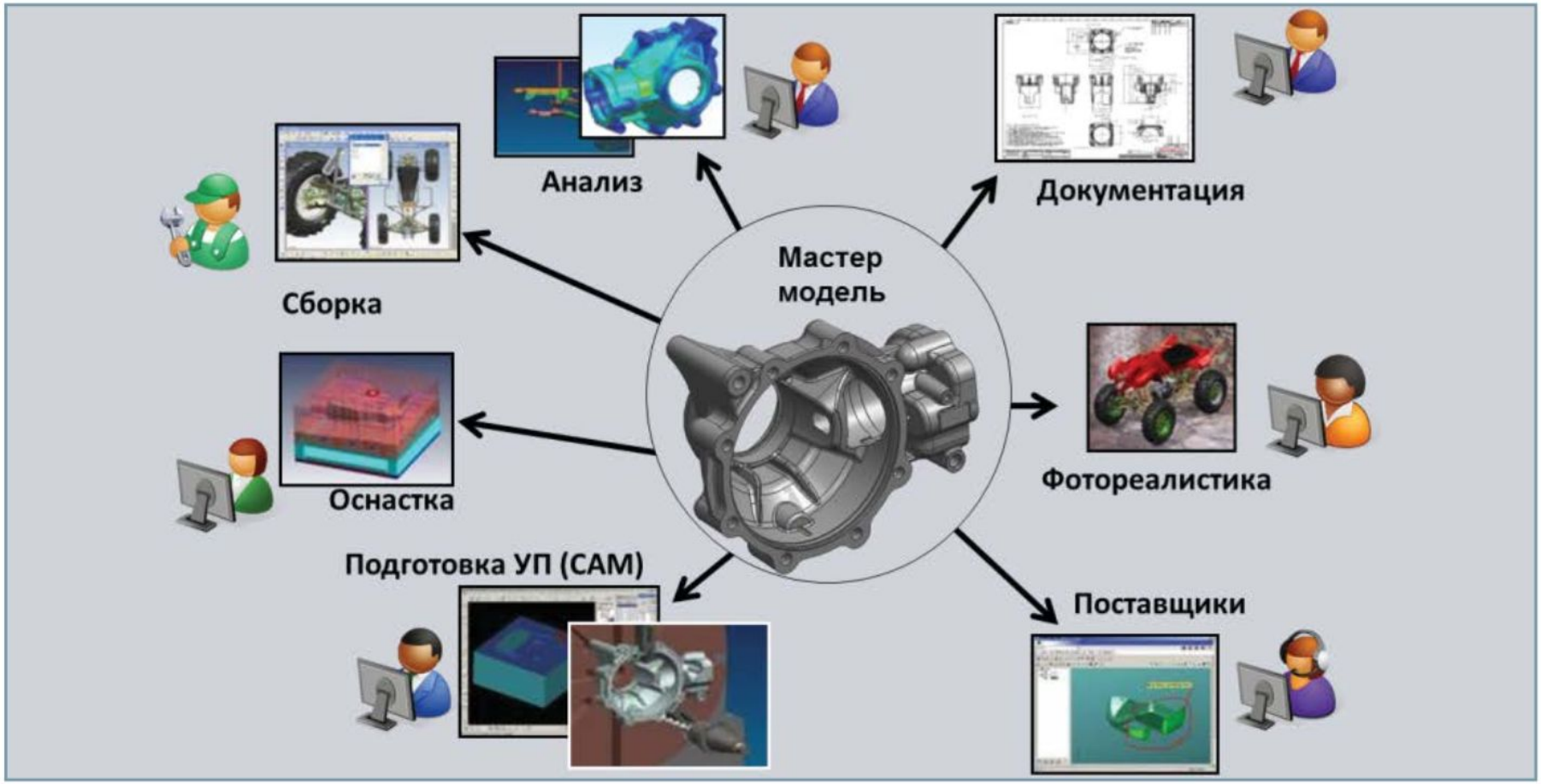
Не ассоциативные геометрические элементы

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.

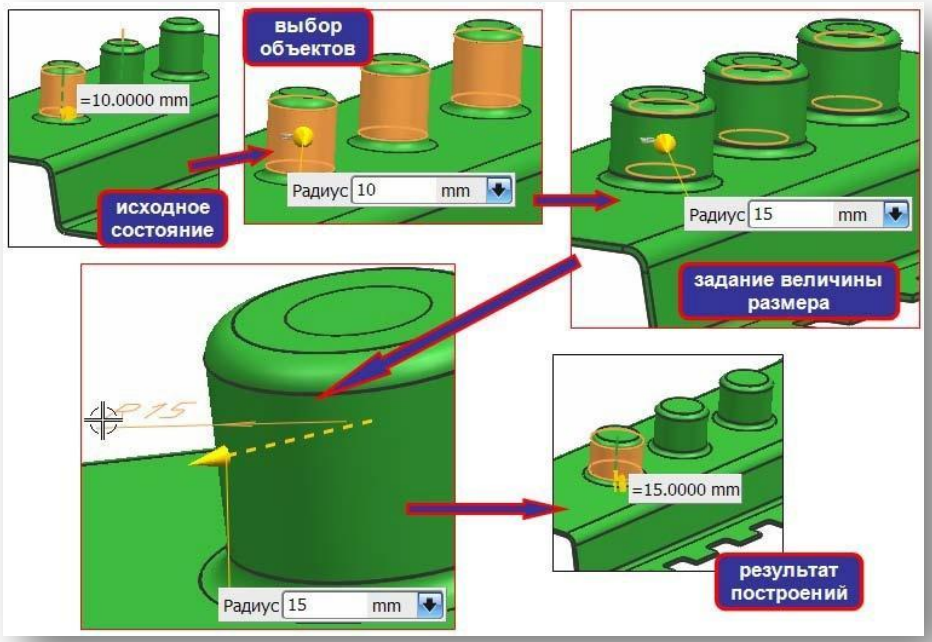


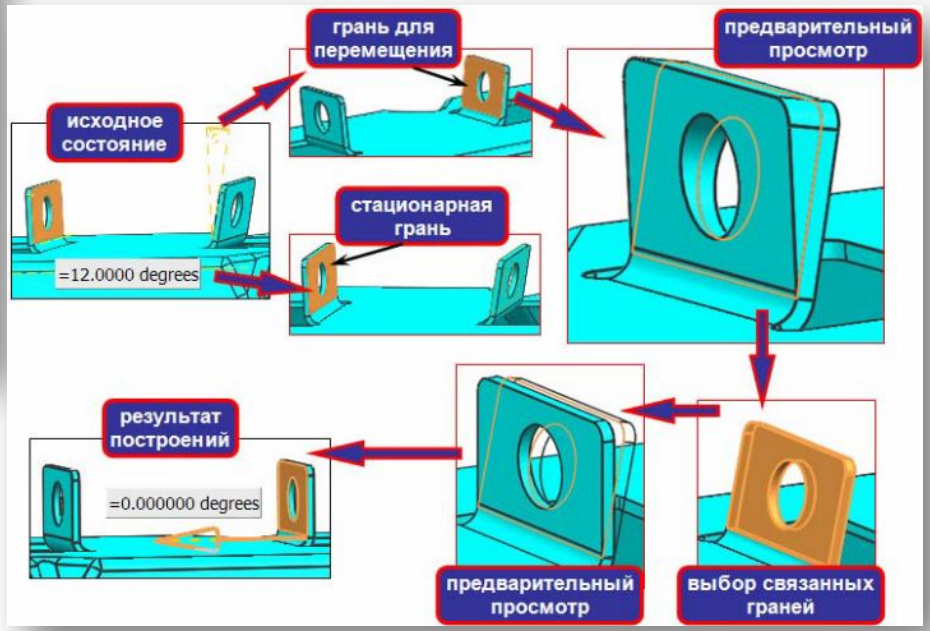
Использование принципа мастер-модели в разных приложениях NX

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

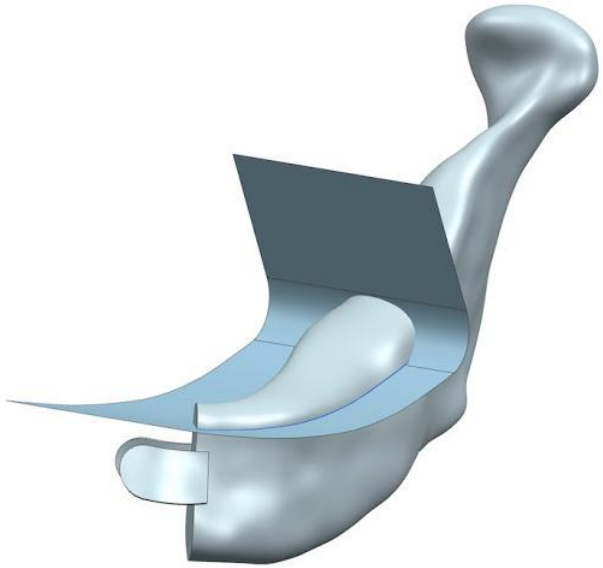
Гибридное моделирование – сочетание твердотельного моделирования, моделирования поверхностей и кривых.

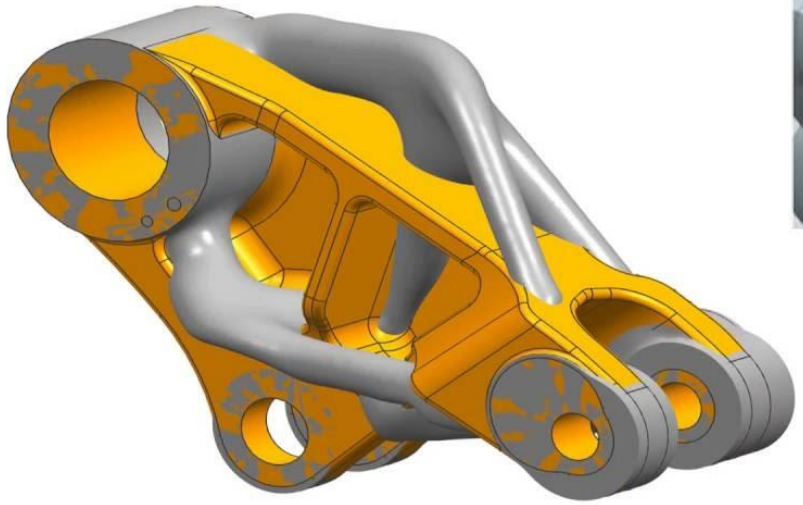
Синхронное моделирование – поэлементное моделирование без дерева построения, позволяющее задавать фиксированные размеры, параметры и правила проектирования в момент создания или редактирования модели, не пользуясь при этом историей её создания.

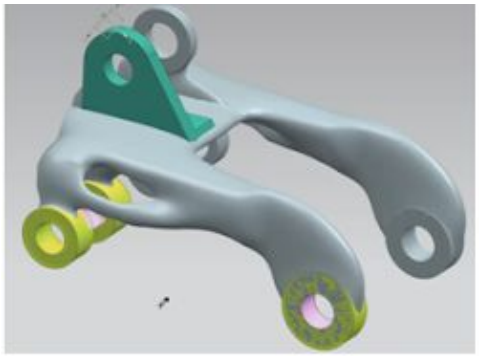


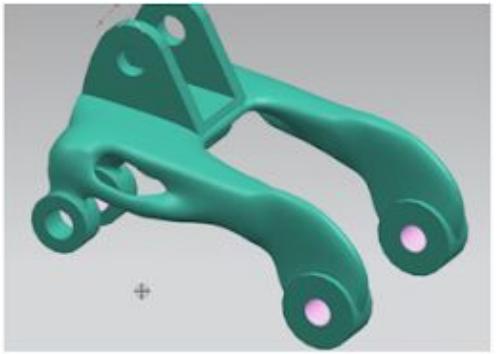


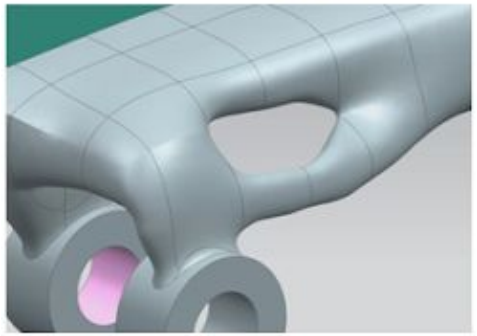
Конвергентное моделирование – моделирование с использованием фасетных и граничных (B-rep) моделей.

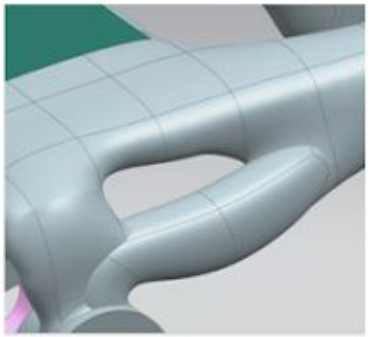












Литература

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-rossiyskoy-ekonomike (дата обращения: 13.02.2020).