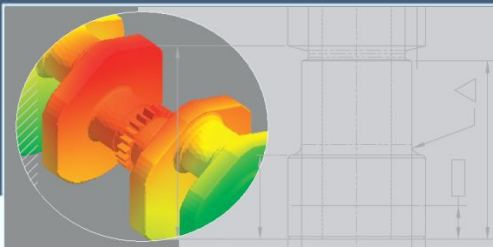


# Метод конечных элементов в САЕ-системах

- Основные этапы конечно-элементного анализа
- Задание закреплений и рабочих нагрузок
- Создание конечно-элементной сетки
- Процессорная и постпроцессорная стадии моделирования



## Основные этапы конечно-элементного анализа

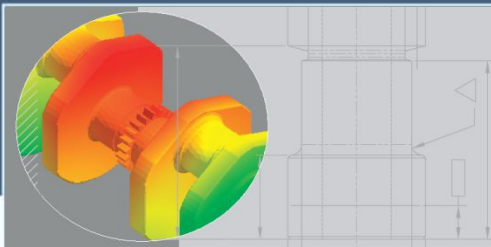
Моделируемый объект в процессе эксплуатации подвергается механическому воздействию со стороны других элементов механизма и со стороны среды в которой он находится.

В процессе моделирования важно учитывать все возможные варианты нагрузок, граничные условия и попытаться использовать материалы с другими свойствами.

Содержание процесса моделирования в общем случае определяется следующими факторами:

- размерами и формой модели;
- типом исследования и связанными параметрами;
- свойствами материала;
- нагрузками и граничными условиями.

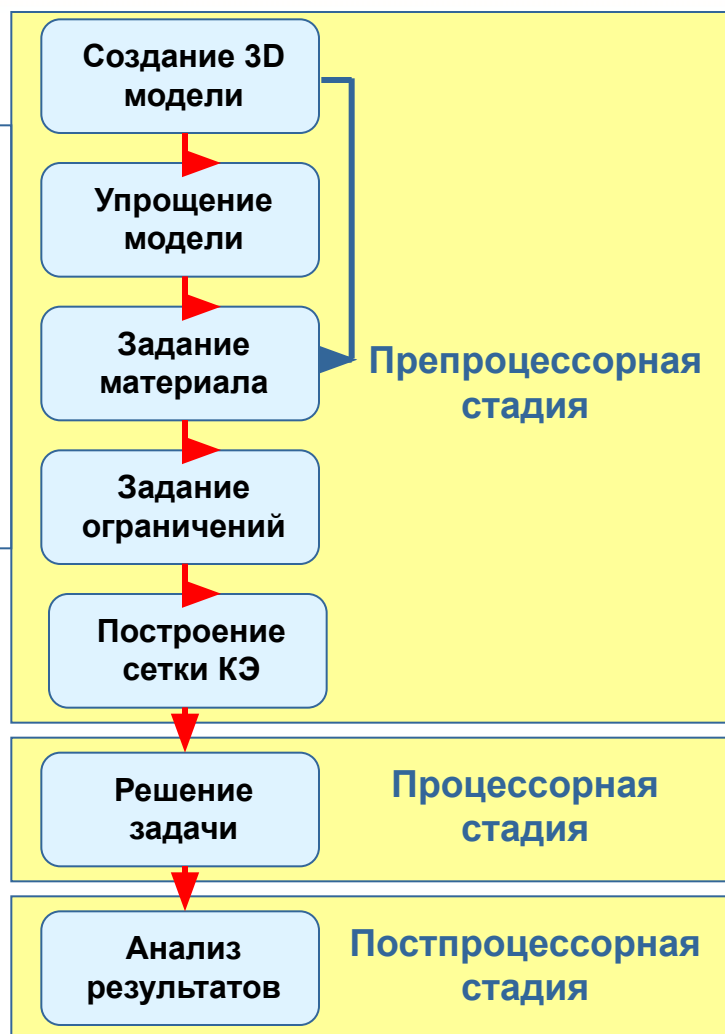


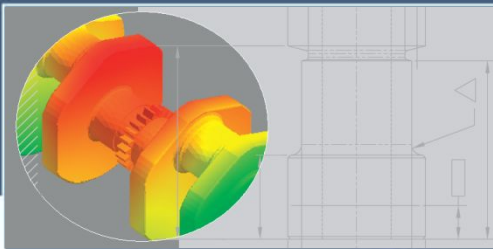


# Основные этапы конечно-элементного анализа

Процедура конечно-элементного анализа состоит из трех основных стадий:

- Препроцессорная стадия;
- Процессорная стадия;
- Постпроцессорная стадия.





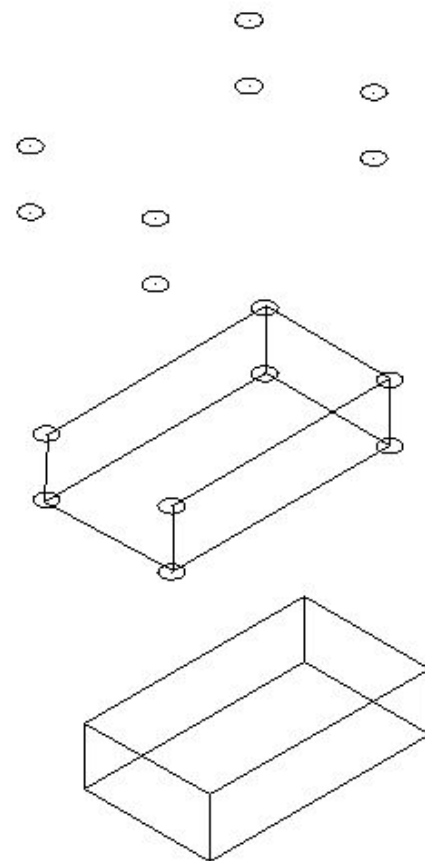
# Основные этапы конечно-элементного анализа

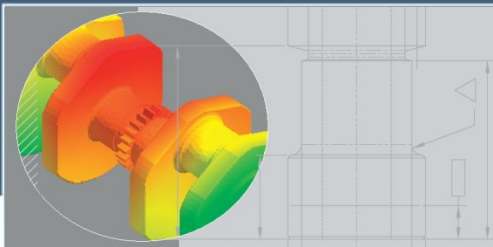
## Создание 3D моделей

Системы конечно-элементного анализа (CAE-системы Cosmos-M, ANSYS и др.) имеют в составе программного обеспечения графические редакторы, которые позволяют создавать геометрические модели различных объектов. Но трудоемкость создания геометрических моделей средствами этих редакторов весьма велика.

CAD-системы имеют более развитые инструменты геометрического моделирования, которые позволяют создавать геометрические модели различных объектов в кратчайшие сроки. Поэтому создание 3-D моделей обычно выполняется средствами CAD-системы с последующим экспортом – импортом моделей в CAE-системы.

Предпочтительным является использование интегрированных систем проектирования класса SolidWorks и др.



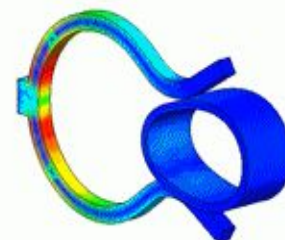
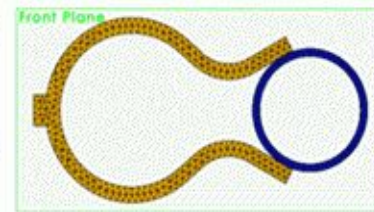
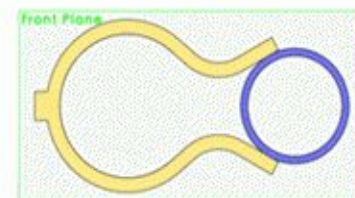


# Основные этапы конечно-элементного анализа

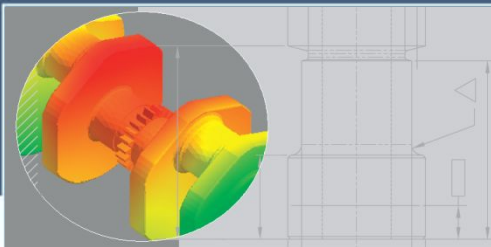
## Упрощение модели

Упрощение 2D можно использовать при статическом, нелинейном, термическом анализе, исследовании напряженно-деформированного состояния сосудов давления и в других случаях, когда градиент деформаций и напряжений является постоянным вдоль одной из осей.

Такой способ упрощения позволяет использовать плоские конечные элементы и тем самым снизить размерность решаемой задачи и время ее решения.





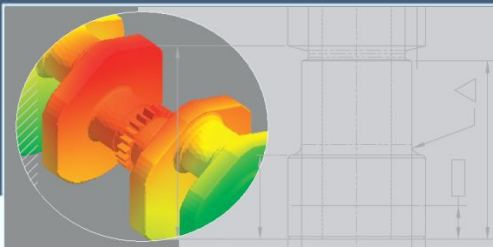


# Основные этапы конечно-элементного анализа

## Задание материала

Перед началом исследования, устанавливаются все необходимые свойства материала, требуемые для соответствующего типа анализа. Например, модуль упругости требуется для статического, частотного и анализа продольной устойчивости, а теплопроводность требуется для термического анализа.

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	2.1e+011	Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент Пуассона	0.28	Не применимо
Модуль сдвига	7.9e+010	Н/м <sup>2</sup>
Плотность	7700	кг/м <sup>3</sup>
Предел прочности при растяжении	723825600	Н/м <sup>2</sup>
Предел прочности при сжатии в X		Н/м <sup>2</sup>
Предел текучести	620422000	Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент теплового расширения	1.3e-005	/К
Теплопроводность	50	Вт/(м·К)
Удельная теплоемкость	460	Дж/(кг·К)
Коэффициент демпфирования материала		Не применимо



# Основные этапы конечно-элементного анализа

## Задание материала

**Модуль упругости (Модуль Юнга)** – равен отношению напряжения и соответствующей деформации вдоль данной оси.

**Модуль сдвига (Модуль жесткости)** – определяется отношением напряжения сдвига в плоскости к значению ассоциированного напряжения сдвига.

**Коэффициент Пуассона** – определяется отношением продольного сжатия по оси Y к продольной деформации по оси X.

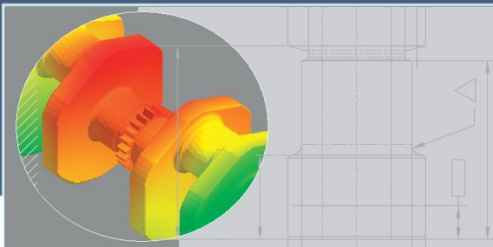
**Плотность** – отношение массы на единицу объема вещества. В качестве единиц измерения плотности в системе СИ используется  $\text{кг/м}^3$ .

**Коэффициент линейного расширения** – определяется изменением длины при изменении температуры на один градус.

**Теплопроводность** – определяется скоростью передачи тепловой энергии через единицу толщины материала на единицу разности температур.

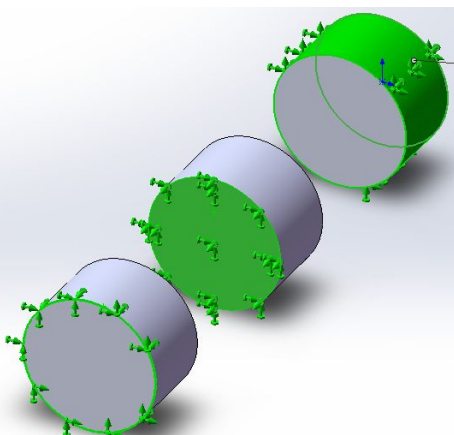
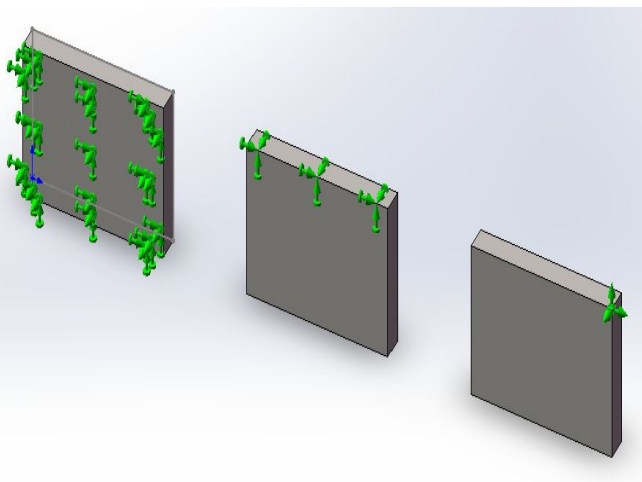
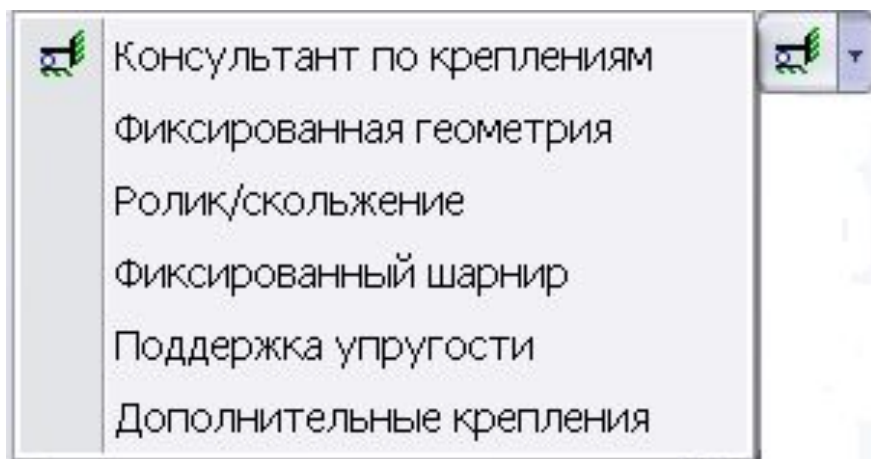
**Удельная теплоемкость** – количество теплоты, требуемое для повышения температуры единицы массы материала на один градус.

**Коэффициент демпфирования материала** – определяет скорость затухания вынужденных колебаний в материале детали.



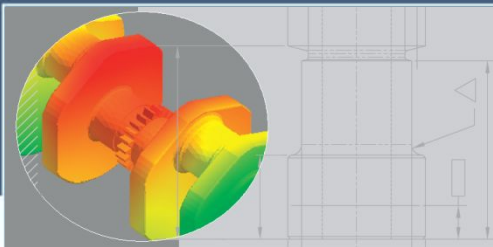
# Задание закреплений

Закрепление модели позволяет установить нулевые или ненулевые перемещения на вершинах, кромках или гранях для использования в статических, частотных, потери устойчивости, динамических и нелинейных исследованиях.



В общем случае, с использованием допускаемых способов закрепления, модель может быть лишена 6-ти степеней свободы – перемещений вдоль 3-х координатных осей и вращения вокруг них.





# Задание закреплений

## Фиксированная геометрия. Зафиксирован

Для моделей твердых тел этот тип закрепления лишает модель 3-х степеней свободы – перемещения вдоль координатных осей.

Для моделей оболочек и балок он лишает модель 6-ти степеней свободы.

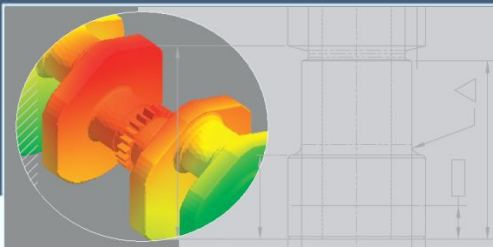
Для стержневых соединений он лишает модель 3-х степеней свободы – перемещения вдоль координатных осей.

## Фиксированная геометрия. Неподвижное

Неподвижное соединение лишает твердотельную модель 6-ти степеней свободы – перемещения вдоль координатных осей и вращения вокруг них .

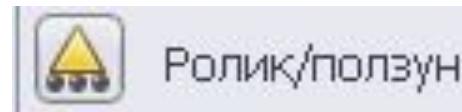
Для моделей оболочек и балок он лишает модель 6-ти степеней свободы.

Для стержневых соединений он лишает модель 3-х степеней свободы – перемещения вдоль координатных осей.



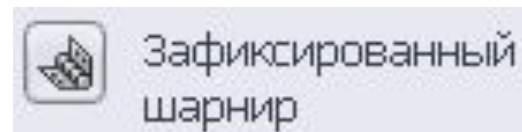
# Задание закреплений

## Закрепление Ролик/Скольжение

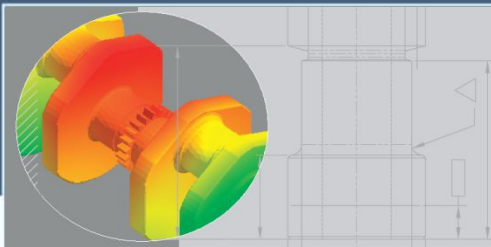


Закрепление **Ролика/Скольжение**, позволяет задать перемещение плоской грани вдоль ее плоскости расположения, но исключает ее перемещение в направлении, перпендикулярном ее плоскости. Грань может сжиматься или растягиваться под нагрузкой.

## Зафиксированный шарнир



Закрепление **Шарнир**, позволяет задать вращение цилиндрической грани вокруг своей собственной оси или кромки. Радиус и длина цилиндрической грани постоянно остаются под нагрузкой.



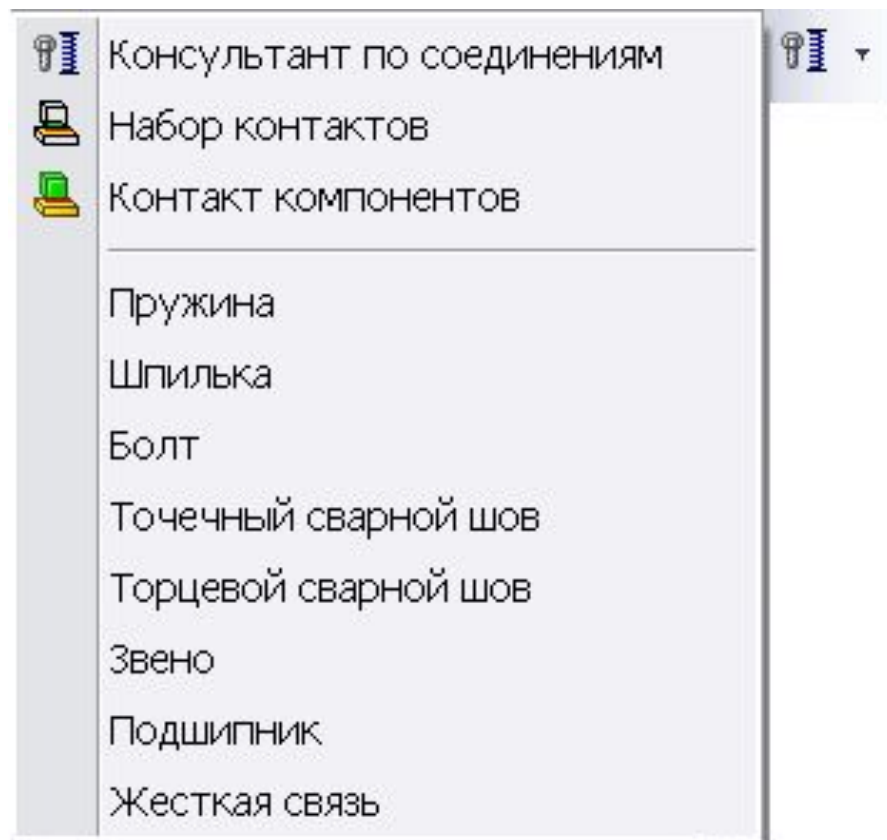
# Задание закреплений

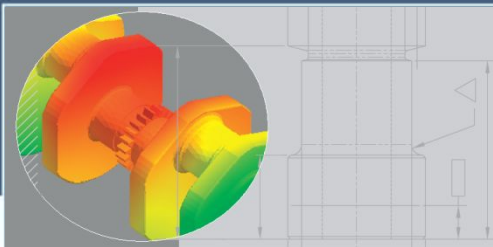
## Соединители

Соединитель является правилом, которое определяет, как узел по вершинам, кромкам, граням соединен с другим узлом или с основанием.

Используется при моделировании сборок для определения условий контакта.

Позволяет упростить создание геометрических моделей исследуемых объектов.





# Задание закреплений

## Соединители

**Жесткий.** Определяет жесткую связь между гранями двух различных тел.

**Пружина.** Определяет пружину, которая может сопротивляться только натяжению (тросы), только сжатию или натяжению и сжатию.

**Штифт.** Соединяет цилиндрические грани двух компонентов.

**Упругое основание.** Определяет упругое основание между выбранными гранями детали или сборки и основанием.

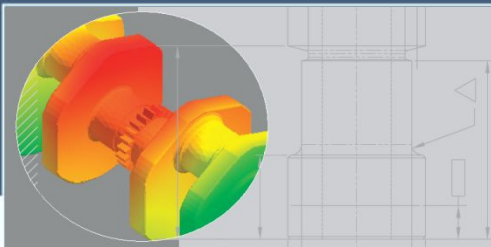
**Болт.** Определяет болтовой соединитель между двумя компонентами или между компонентом и основанием.

**Связь.** Связывает какие-либо два местоположения в модели жестким прутком, который шарнирно закреплен с обоих концов.

**Торцевой сварной шов.** Определяет сварной шов, заданных размеров, для сварки двух металлических компонентов.

**Точки контактной сварки.** Соединяют в нахлестку два и более тонких металлических листа в небольших зонах (точках).

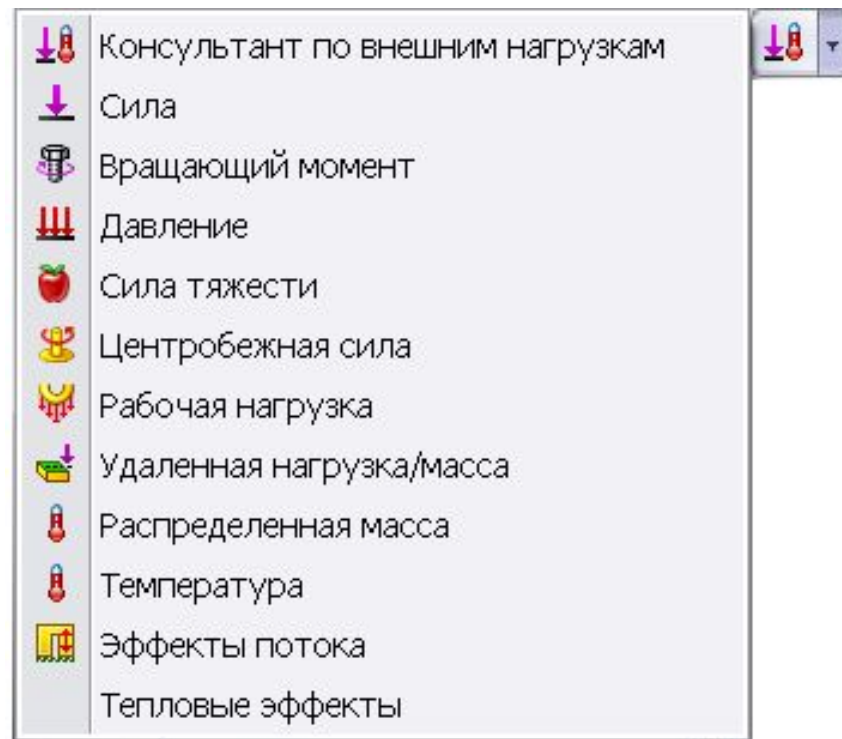
**Подшипник.** Используется как соединитель-подшипник между валом и корпусом.



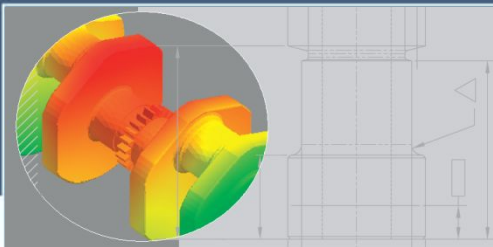
# Задание рабочих нагрузок

**Нагрузки и ограничения необходимы для определения условий эксплуатации при исследовании модели.**

**Результаты анализа непосредственно зависят от заданных нагрузок.**

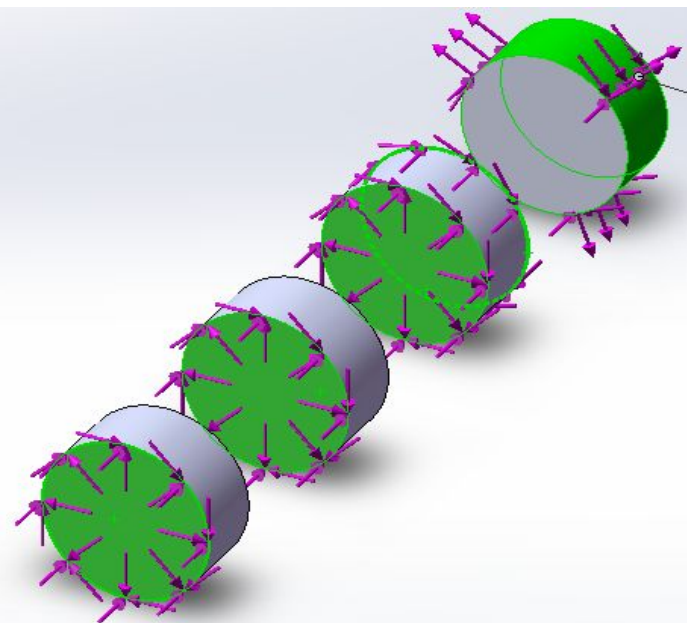
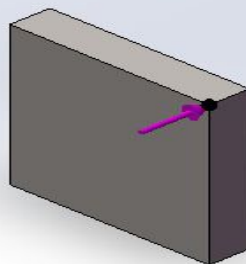
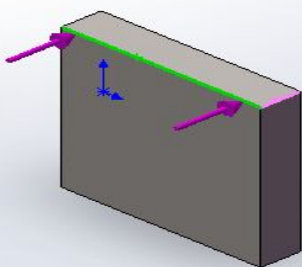
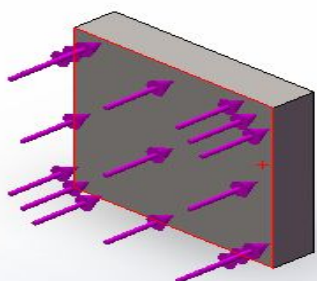


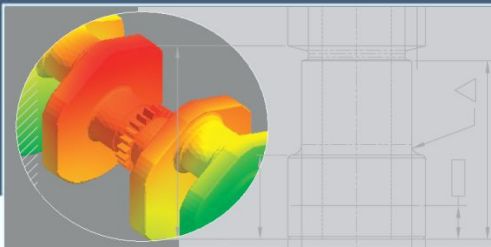




## Задание рабочих нагрузок

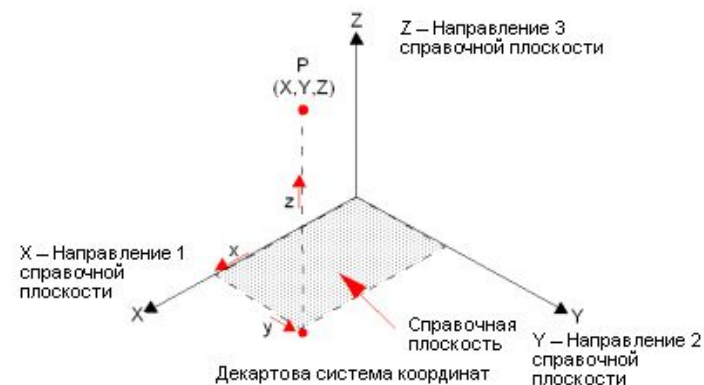
Нагрузки прикладываются к геометрическим объектам – **граням, кромкам, вершинам и справочным точкам** в любом направлении.



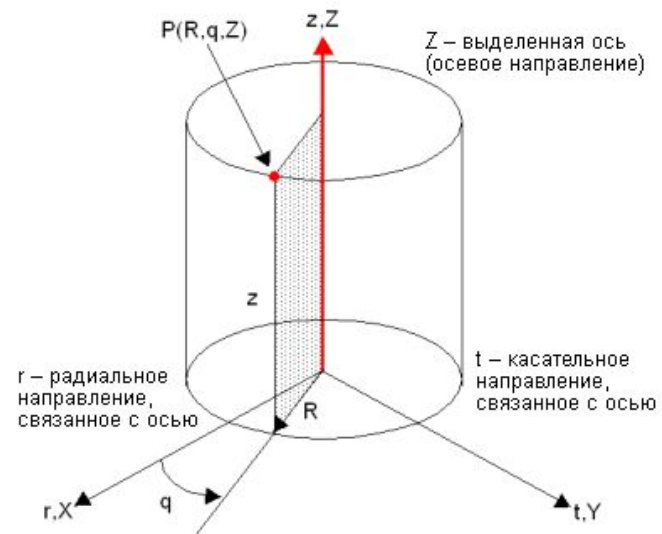


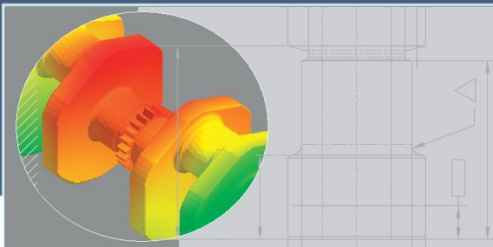
# Задание рабочих нагрузок

Направление задаваемых сил по умолчанию выполняется в глобальной системе координат, начало которой находится в начале системы координат детали или узла.



Оси цилиндрической системы координат используются для определения радиальных и касательных нагрузок.





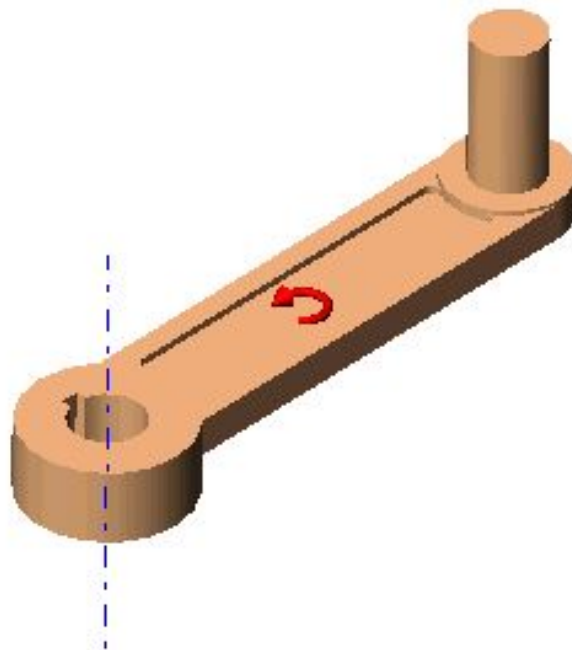
# Задание рабочих нагрузок

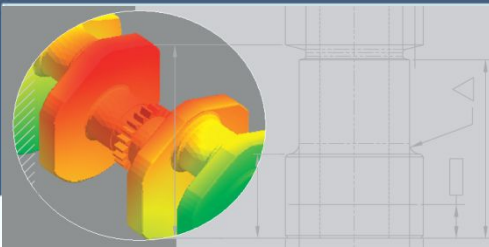
## Центробежные силы

Центробежная сила используется для учета влияния угловой скорости и ускорения детали или узла при выполнении статического, частотного, нелинейного анализа и исследовании потери устойчивости.

Программа использует установленные значения угловой скорости и ускорения, а также массовую плотность для расчета центробежных нагрузок.

Для нелинейных исследований можно назначить зависящие от времени угловые скорость и ускорение.





# Задание рабочих нагрузок

## Сила тяжести и распределенная масса

Сила тяжести используется в статическом и нелинейном анализе для приложения гравитационных нагрузок к деталям или узлам.

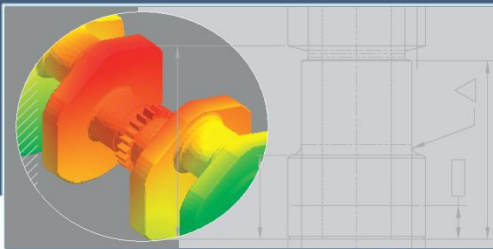
Для определения силы тяжести задаются ускорения в направлениях осей  $x$ ,  $y$  и  $z$  системы координат.

Нагрузки от действия силы тяжести в каждом направлении подсчитываются умножением заданного ускорения на массу. Масса рассчитывается по плотности материала.

При выполнении статического, частотного анализа, анализа потери устойчивости и линейных динамических исследованиях на отдельных гранях может быть задано **Распределенное значение массы**.

Эти функциональные возможности можно использовать для моделирования воздействия компонентов, которые не включены в модель.

Для корректного использования распределенной массы в статических исследованиях необходимо определить силу тяжести или центробежную силу.



# Построение сетки конечных элементов

## Используемые конечные элементы

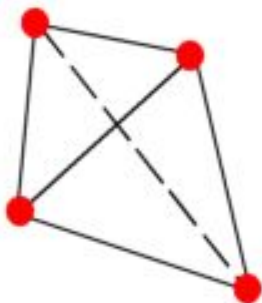
При создании сетки детали или сборки с твердотельными элементами программа создает один из следующих типов элементов на основе заданных для исследования параметров:

**Сетка низкого качества.** Создается автоматически на основе линейных тетраэдральных твердотельных элементов.

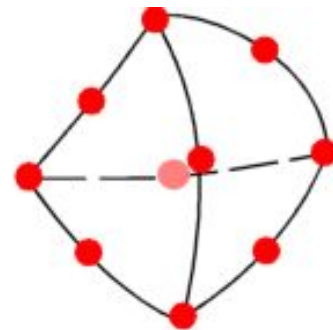
**Сетка высокого качества.** Создается автоматически на основе параболических тетраэдральных твердотельных элементов.

Линейные элементы называются элементами первого или низшего порядка, а параболические элементы называются элементами второго или высшего порядка.

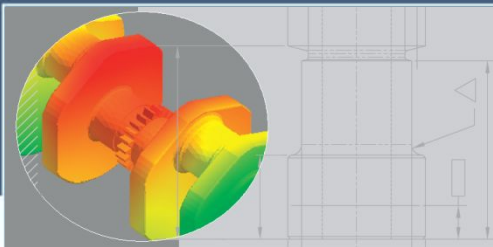
Линейный тетраэдральный элемент представляет собой четыре угловых узла, соединенных шестью прямыми кромками.



Параболический тетраэдральный элемент представляет собой четыре угловых узла, шесть средних узлов и шесть кромок.







# Построение сетки конечных элементов

## Управление параметрами сетки

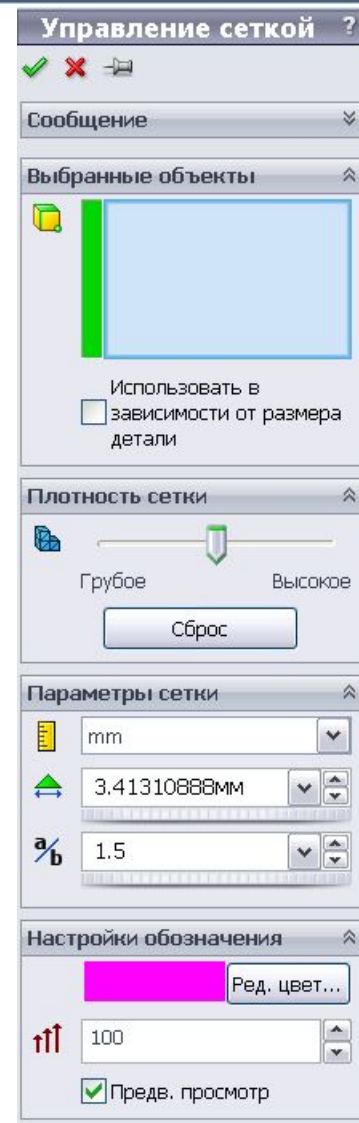
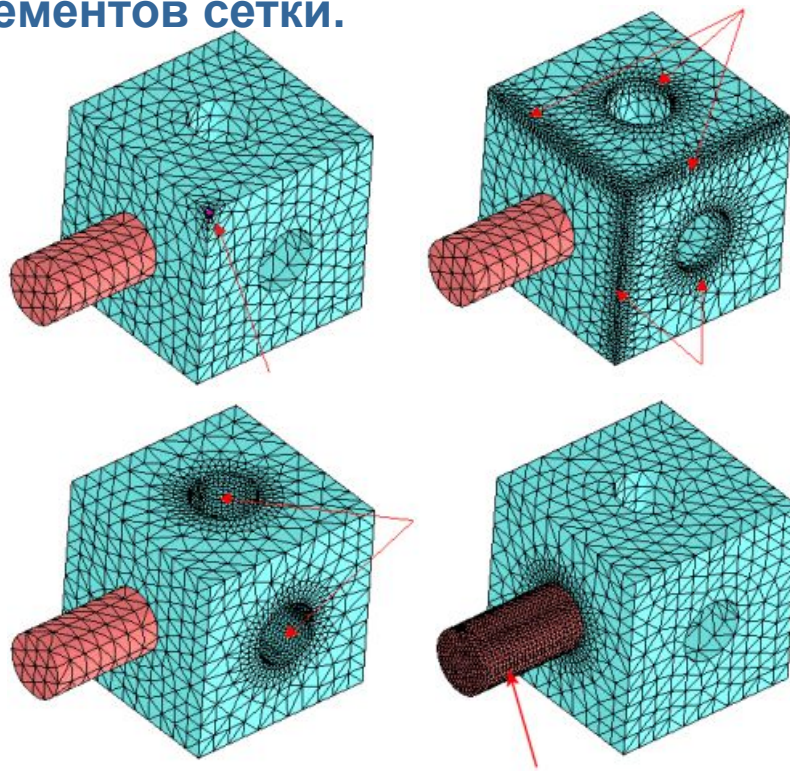
Управление сеткой заключается в определении параметров элементов сетки в различных областях модели.

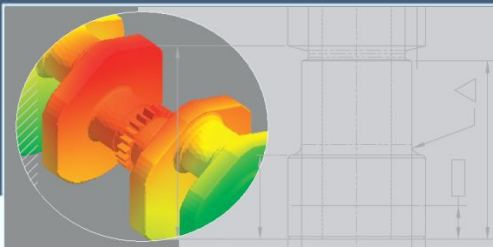
Параметрами управления сеткой являются:

**Размер элемента** сетки для заданных объектов;  
**Соотношение размеров** элементов сетки.

Меньший размер элемента в выбранной области повышает точность результатов в этой области.

Управлять параметрами сетки можно на вершинах, точках, кромках, гранях и деталях узлов.





# Построение сетки конечных элементов

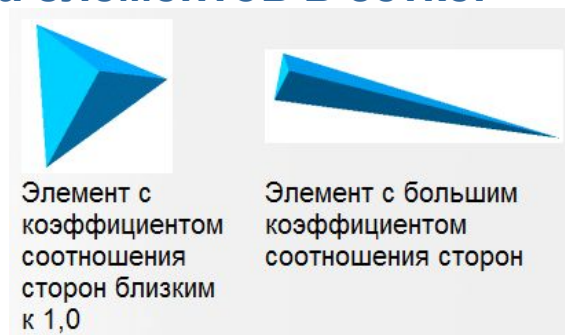
## Проверка качества сетки

Качество сетки играет ключевую роль в точности результатов. SolidWorks Simulation использует два способа оценки качества элементов в сетке.

### Проверка соотношения сторон

Для сетки на твердом теле численная точность анализа достигается лучше всего при сетке с одинаковыми идеальными тетраэдральными элементами, чьи кромки равны по длине.

Рекомендуется использовать элементы с соотношением сторон не более 5.

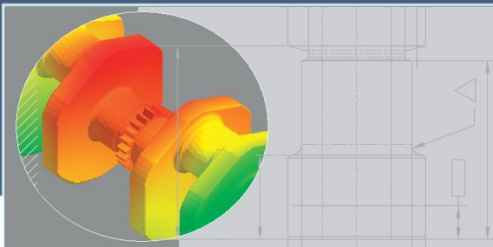


### Точки Якобиана

Данный вид проверки основывается на нескольких специальных точках, расположенных внутри каждого конечного элемента.

Программа рассчитывает коэффициент Якобиана в этих точках для каждого тетраэдрального элемента.

Сетку можно считать качественной если коэффициент Якобиана меньше или равен сорока.



# Процессорная стадия моделирования

После запуска исследования, программа автоматически рассчитывает результаты анализа, основанные на введенных данных о материалах, закреплениях, нагрузках и параметрах сетки.

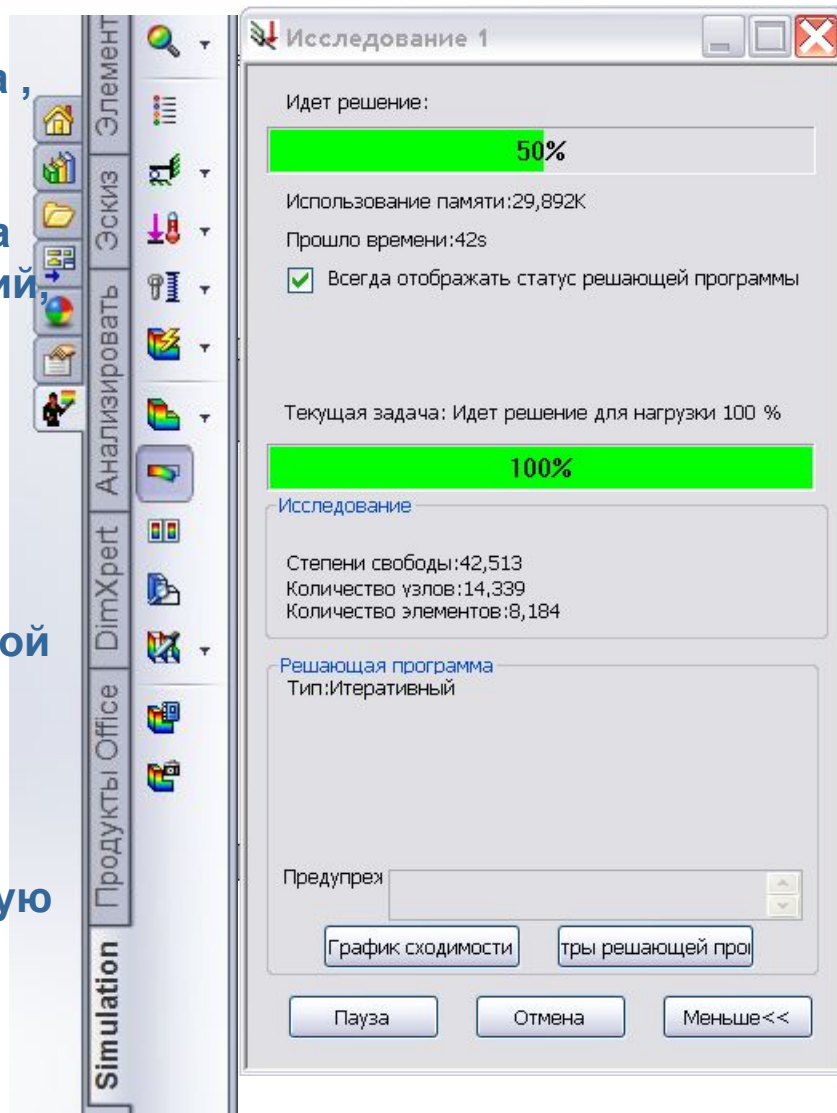
В анализе методом конечных элементов задача представлена набором алгебраических уравнений, которые должны быть решены совместно.

Существует два класса методов решения: прямой и итеративный.

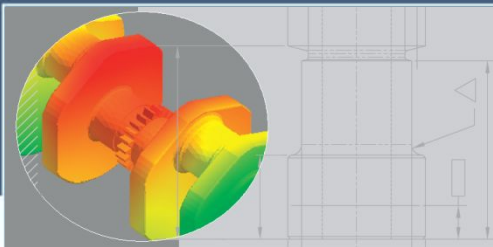
Прямые методы решают уравнения, используя точные числовые методы.

Итерационные методы решения уравнений используют способы аппроксимации, где в каждой итерации предполагается решение с учетом связанных с ним погрешностей. Повторные решения продолжаются до тех пор, пока погрешности не становятся приемлемыми.

Программное обеспечение выбирает решающую программу автоматически на основе типа исследования, параметров анализа, условий контакта, ресурсов компьютера и др.







# Постпроцессорная стадия моделирования

Постпроцессорная стадия связана с анализом результатов моделирования.

При просмотре результатов можно создать эпюры, списки, графики и отчеты в зависимости от типа исследования и его результатов.

**Консультант по результатам**  
Консультант по результатам.

**Деформированный результат**  
Отображение модели в ее деформированном состоянии.

**Сравнить результаты**  
Единовременное сравнение множественных результатов.

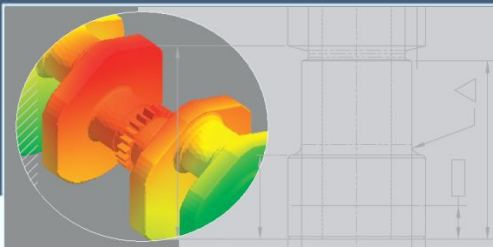
**Design Insight**  
Создание эпюры design insight для текущего исследования.

- Консультант по результатам
- Только модель (Без результатов)
- Новая эпюра
  - Список напряжений, перемещений и деформаций
  - Список результирующих сил
  - Список силы контакта
  - Сила шпильки\болта\подшипника
- Напряжение
- Перемещение
- Деформация
- Запас прочности
- Design Insight

**Результаты**

- Напряжение1 (-vonMises-)
- Перемещение1 (-Расположение результата-)
- Деформация1 (-Эквивалент-)
- Перемещение1{1} (-Перемещение-)
- Напряжение2 (-vonMises-)
- Перемещение2 (-Расположение результата-)
- Запас прочности1 (-FOS-)
- Деформация2 (-Эквивалент-)
- Напряжение3 (-1-е главное-)

Simulation



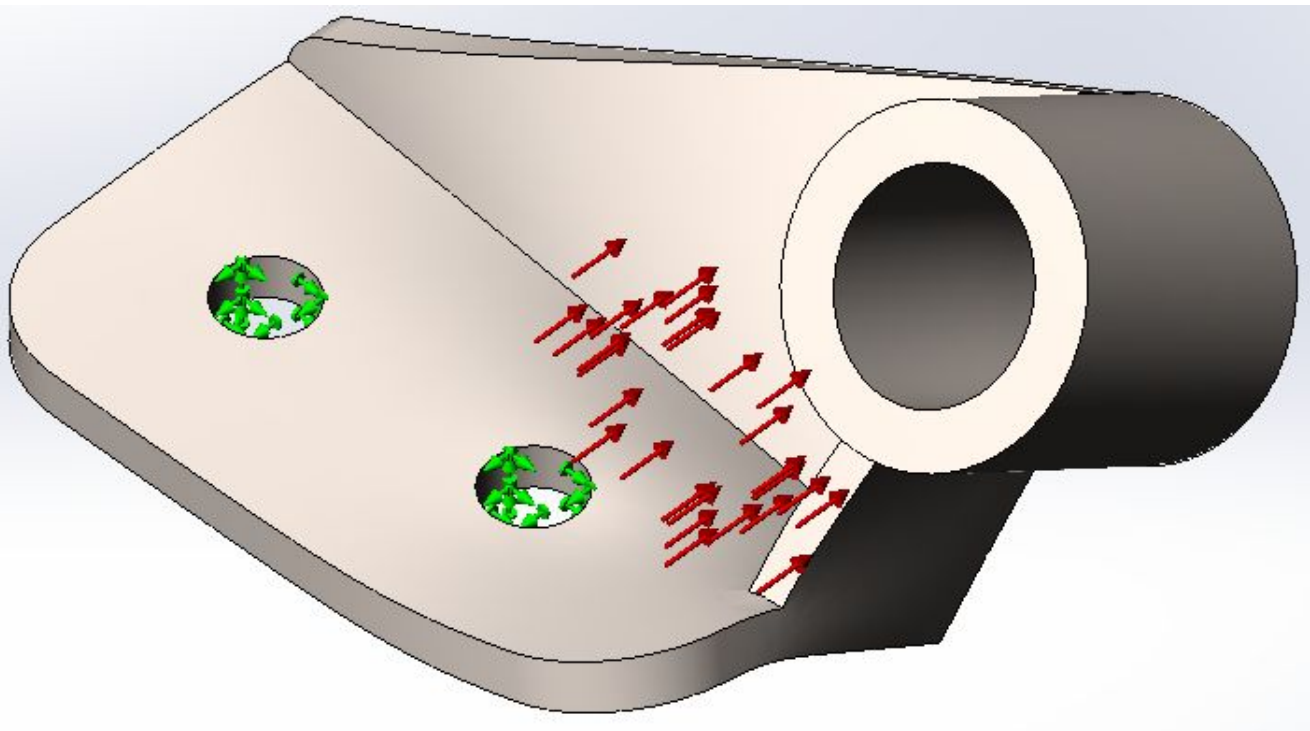
# Постпроцессорная стадия моделирования

## Деформированная форма

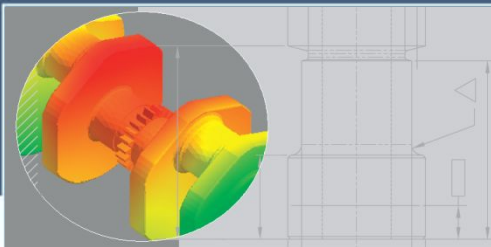
На первом шаге анализа результатов конечно-элементного анализа деформаций и напряжений под воздействием статических нагрузок целесообразно оценить общую картину деформации модели на правдоподобность.



Деформированный результат  
Отображение модели в ее  
деформированном состоянии.

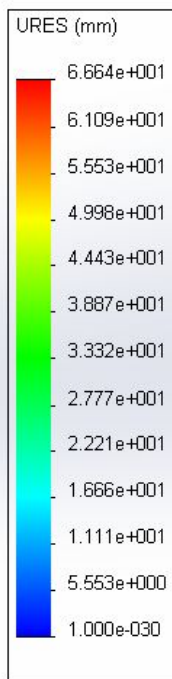
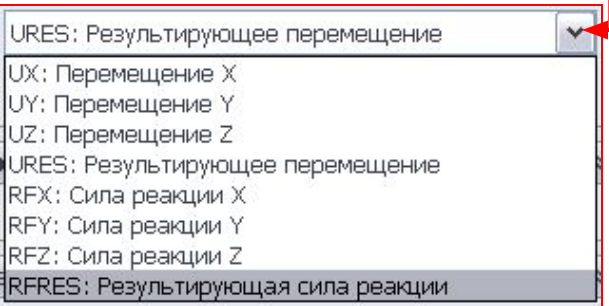
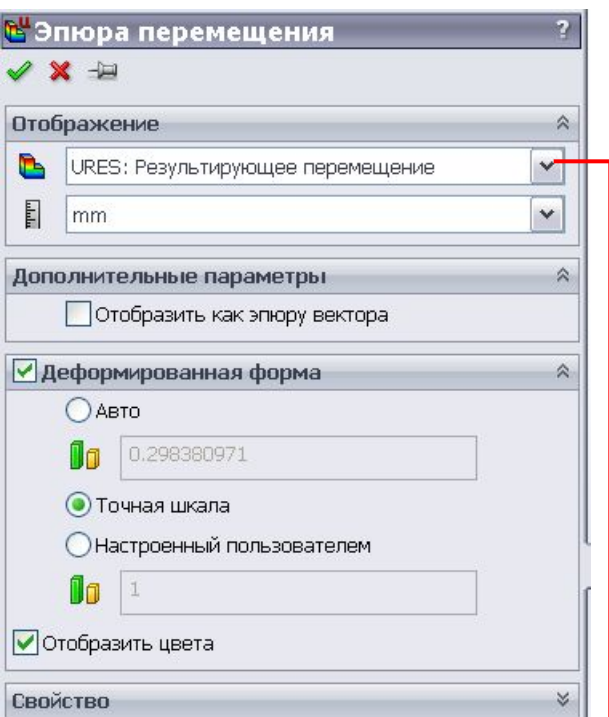




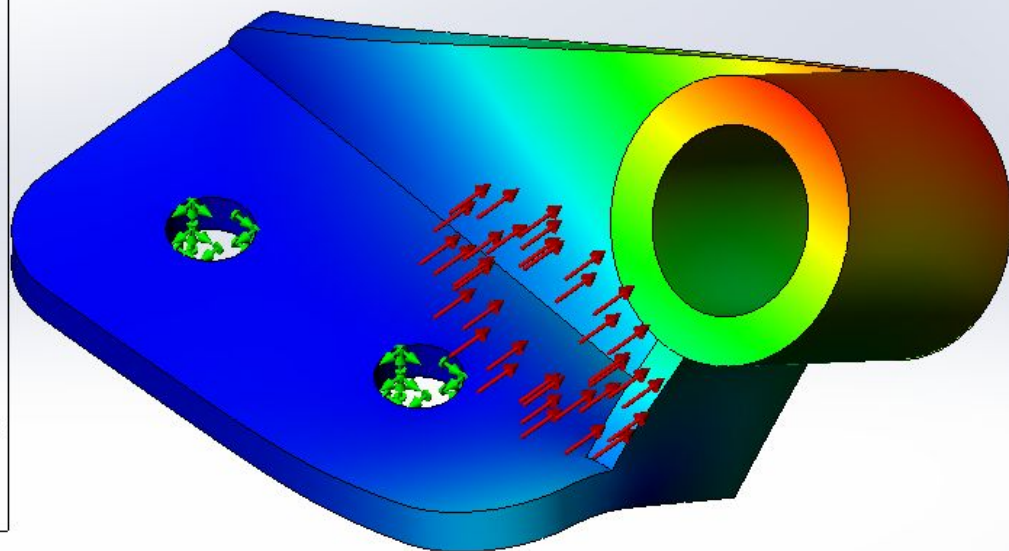


# Постпроцессорная стадия моделирования

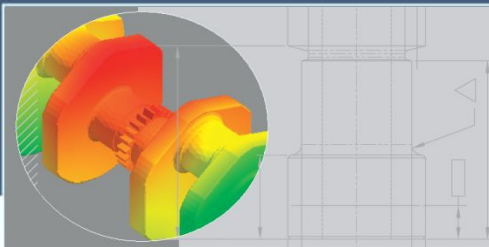
## Анализ результатов моделирования перемещений



Эпюра перемещений отражает величины перемещений в величинах выбранной системы единиц.



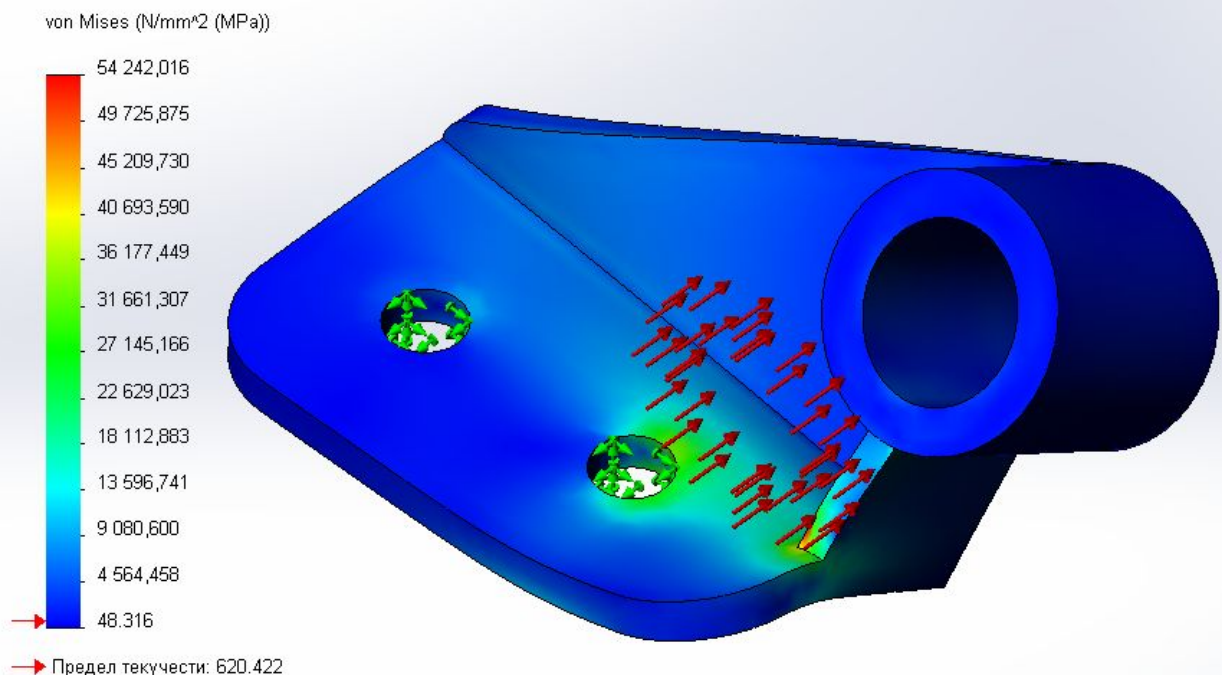
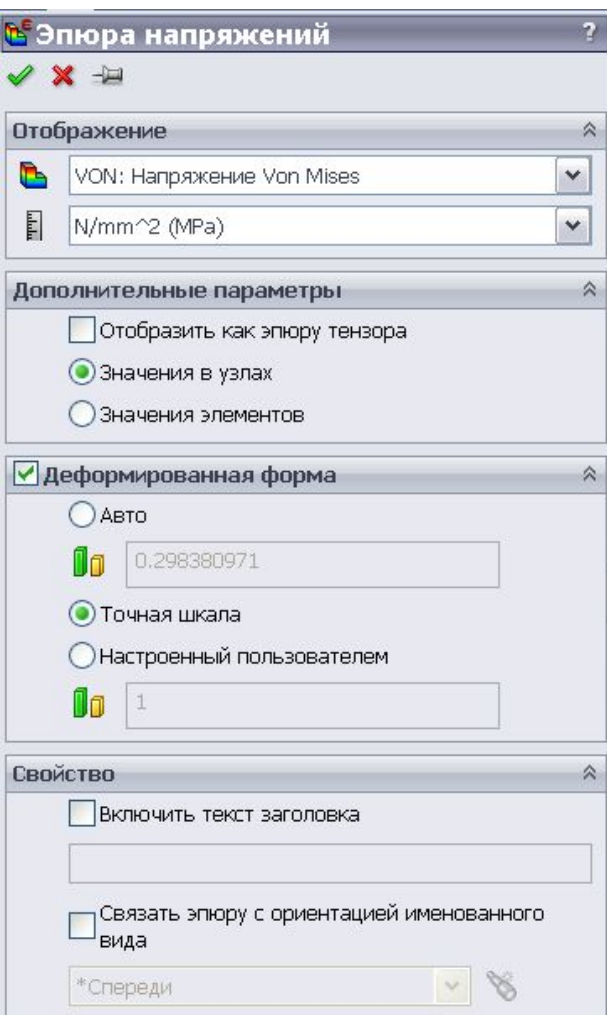
На эпюре перемещений можно отобразить перемещения и опорные реакции в направлении осей X, Y, Z, результирующие перемещения и опорные реакции.

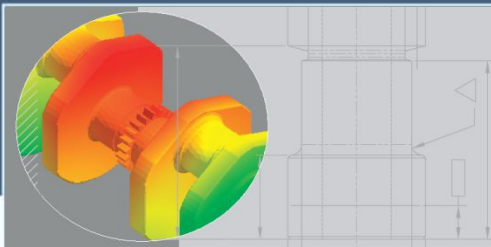


# Постпроцессорная стадия моделирования

## Анализ результатов моделирования напряжений

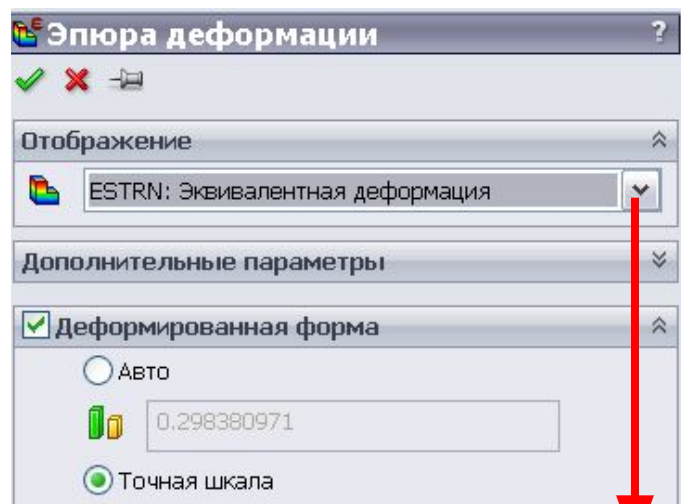
Для оценки прочности детали может быть построена эпюра напряжений с нанесением изолиний напряжений непосредственно на модели.





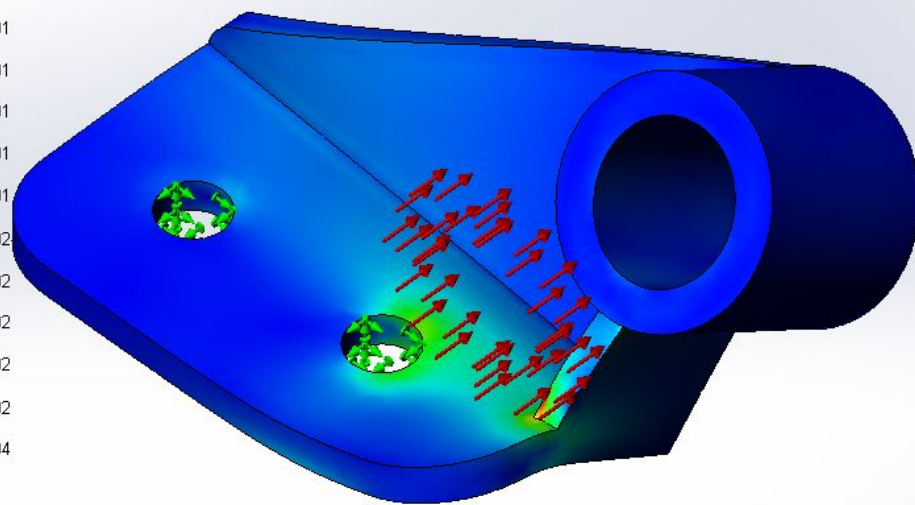
# Постпроцессорная стадия моделирования

## Анализ результатов моделирования деформаций



ESTRN

2.204e-001  
2.021e-001  
1.837e-001  
1.654e-001  
1.470e-001  
1.287e-001  
1.103e-001  
9.195e-002  
7.360e-002  
5.525e-002  
3.690e-002  
1.855e-002  
1.963e-004

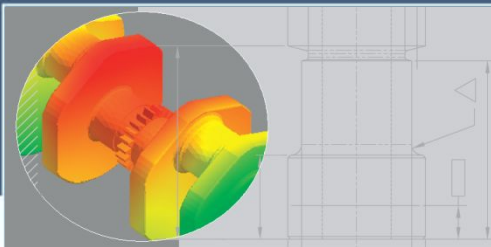


ЕЗ: Деформация в третьем главном направлении

EPSX: Нормальная деформация по оси X  
EPSY: Нормальная деформация по оси Y  
EPSZ: Нормальная деформация по оси Z  
GMXY: Сдвиг по Y на плоскости YZ  
GMXZ: Сдвиг по Z на плоскости YZ  
GMYZ: Сдвиг по Z на плоскости XZ  
ESTRN: Эквивалентная деформация  
SEDENS: Плотность энергии деформации  
ENERGY: Суммарная энергия деформации  
E1: Деформация в первом главном направлении  
E2: Деформация во втором главном направлении  
E3: Деформация в третьем главном направлении

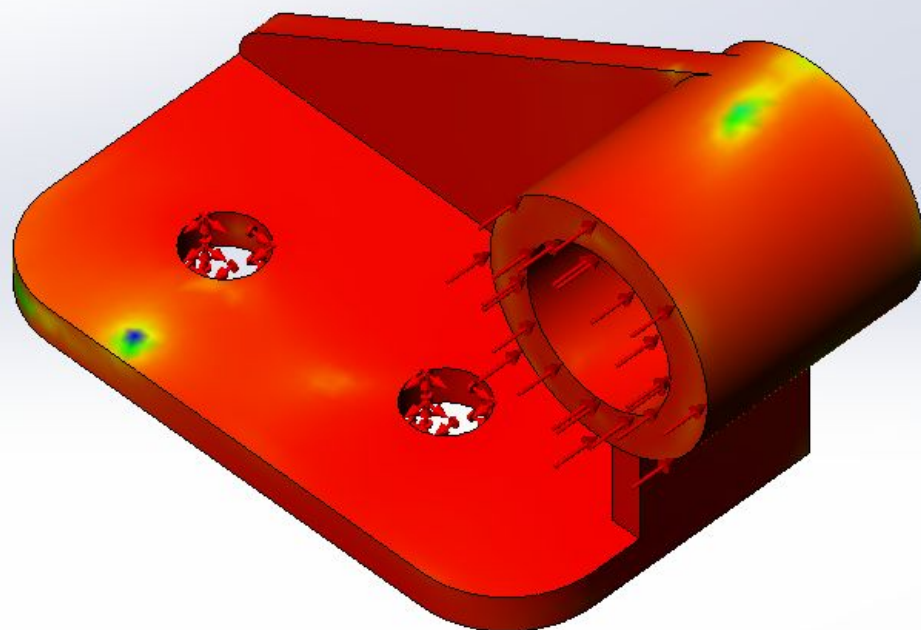
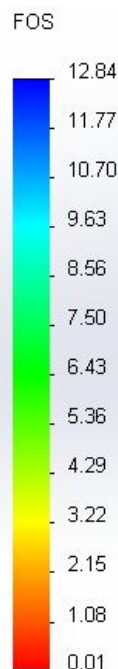
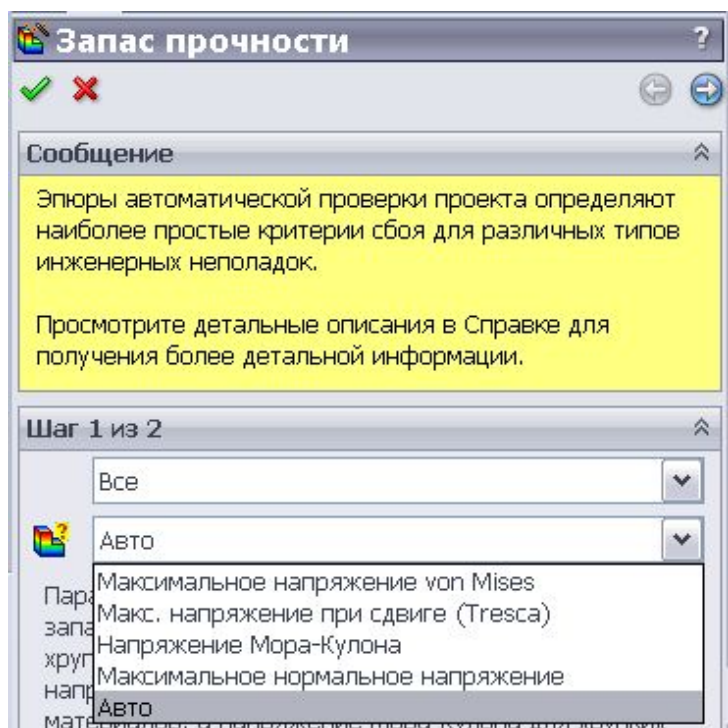
Эпюра деформации отражает результирующие деформации полученные в результате статического, нелинейного исследований и исследования на ударную нагрузку.





# Постпроцессорная стадия моделирования

## Оценка запаса прочности



Эпюры запаса прочности строятся на основе выбранного критерия разрушения чтобы выявить слабые зоны конструкции.

Большие коэффициенты запаса прочности в некоторой области указывают на то, что можно сэкономить материал в этой области.