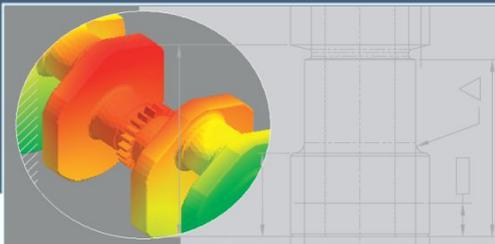


# Метод конечных элементов в САЕ-системах

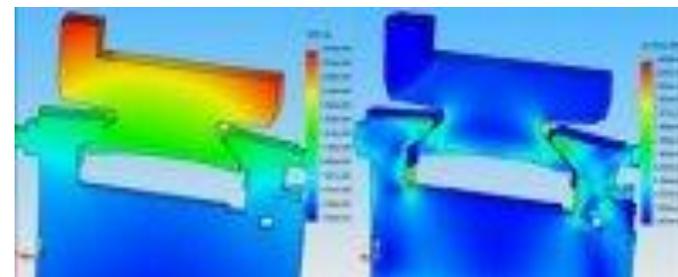
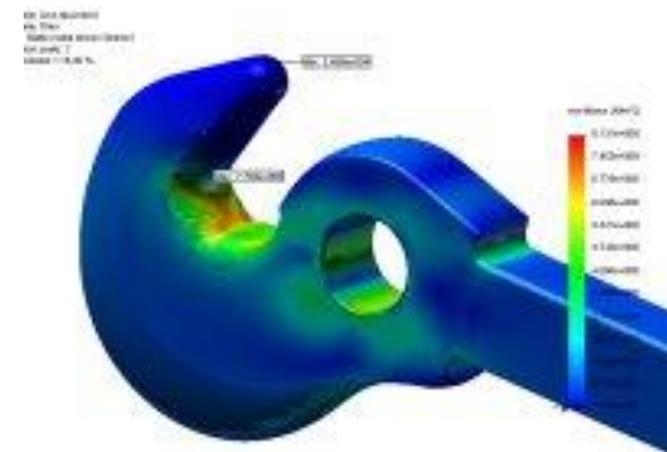
- Основные принципы моделирования МКЭ
- Виды анализа и задачи решаемые в САЕ-системах
- Основные этапы конечно-элементного анализа

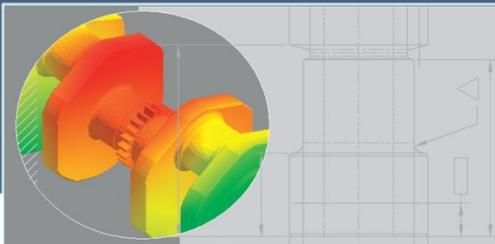


# Основные принципы моделирования МКЭ

Метод конечных элементов (МКЭ) - основной подход к анализу напряженно-деформированного состояния, лежащий в основе подавляющего большинства современных САЕ-систем, предназначенных для выполнения расчетов на прочность различных конструкций посредством численных алгоритмов на ЭВМ.

МКЭ используется не только в области прочностных расчетов, но и для решения задач во многих других сферах, например, решения задач **теплопроводности, гидродинамики, электромагнетизма**, и др.





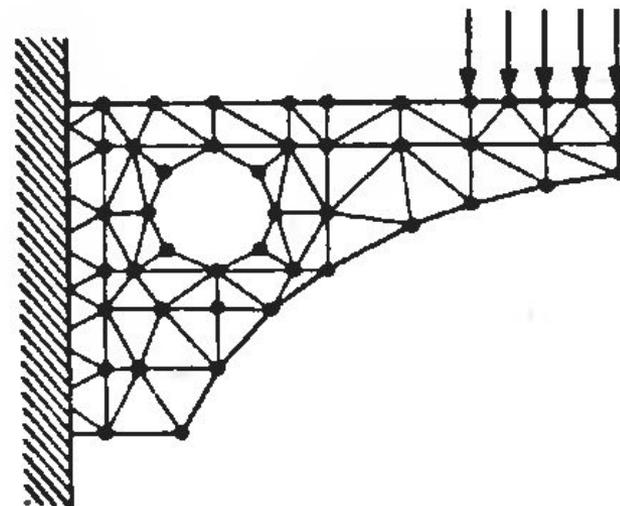
# Основные принципы моделирования МКЭ

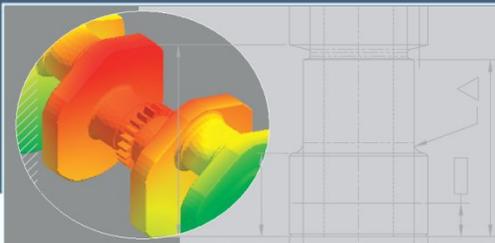
Основная концепция метода конечных элементов заключается в том, что любую непрерывную величину, такую, как деформации, напряжения, температура, давление можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей.

Для создания дискретного пространства, состоящего из подобластей, исследуемая область (область задачи) разбивается на множество ячеек. Такие ячейки называются **конечными элементами**.

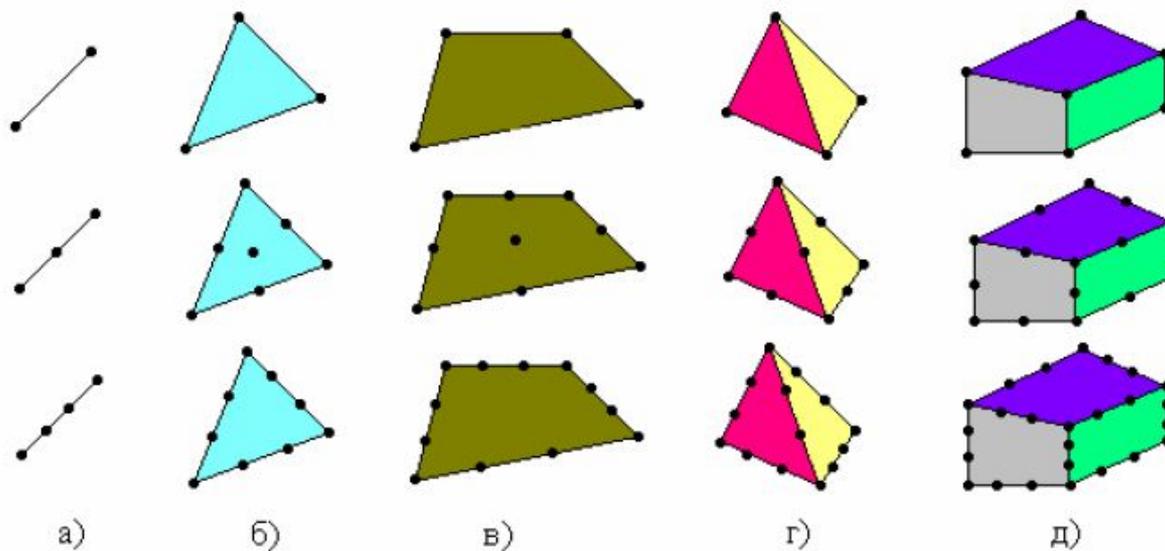
Множество элементов, на которые разбита исследуемая область, называется **конечно-элементной сеткой**.

Для создания конечно-элементной сетки могут быть использованы различные **типы конечных элементов**.





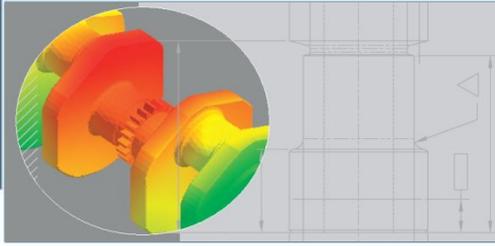
# Основные принципы моделирования МКЭ



Для расчёта ферм используются линейные стержневые элементы **(а)**. Эти элементы используются при моделировании пружин, стержней, балок, рам и т.п.

Плоские двумерные элементы **(б-в)** применяются для моделирования мембран, тонких пластин, тонкостенных оболочек и т.п.

Объёмные трёхмерные элементы **(г-д)** применяются при анализе напряжённо-деформированного состояния в объёмах, телах объектов.



# Основные принципы моделирования МКЭ

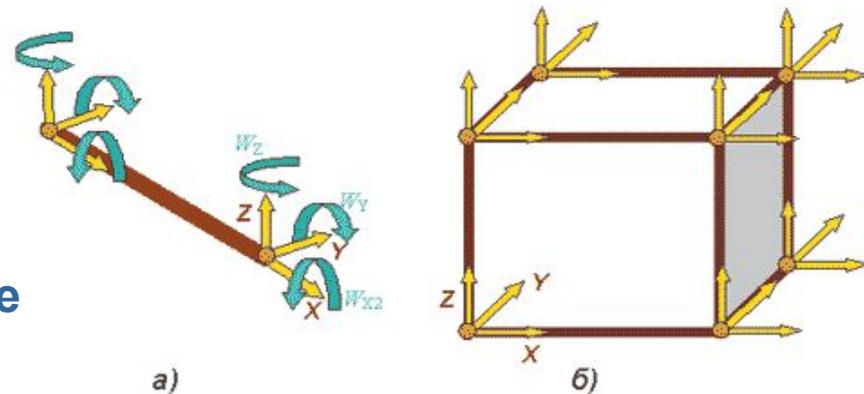
Вершины конечных элементов называются **узлами**. Узлы используются для описания геометрии элемента и для задания компонент решения (неизвестных искомых величин).

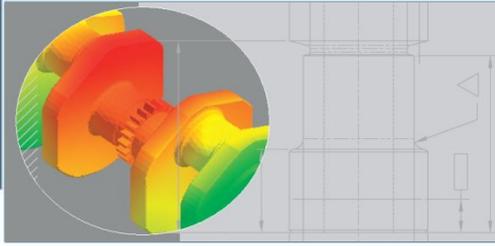
Отдельные конечные элементы сетки связывают между собой не по всей поверхности контакта, а только в отдельных точках, внешних узлах.

Число связей конечного элемента с окружающей областью принято называть **числом степеней свободы**, которые определяют компоненты решения в узле.

Степень свободы является чрезвычайно важным понятием в МКЭ, так как она определяет тип искомой величины и возможность изменения направления ее вектора в узловой точке.

В зависимости от решаемой задачи число степеней свободы в узле может быть различным. Например при решении задачи теплопроводности одна степень свободы – значение температуры, Для векторных величин, деформаций, это две степени свободы.





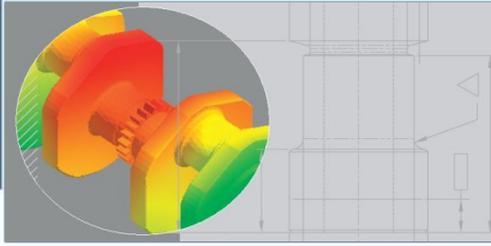
# Основные принципы моделирования МКЭ

Способ разбиения области задачи сеткой конечных элементов, выбор типа конечных элементов, их размеров, состава граничных условий, способов их определения оказывают значительное влияние на результаты и точность конечно-элементного анализа.

Поэтому вопрос соответствия между расчетной моделью и реальностью является, пожалуй, основным при использовании программ конечно-элементного анализа.

Несмотря на то, что САЕ – системы имеют более или менее подробную документацию, они все равно остаются в определенной степени «черными ящиками».

Это означает определенную непредсказуемость результатов, а также некоторый произвол в их интерпретации. По этому, **достоверная оценка, полученных результатов конечно-элементного анализа, в значительной части зависит от уровня квалификации специалиста.**



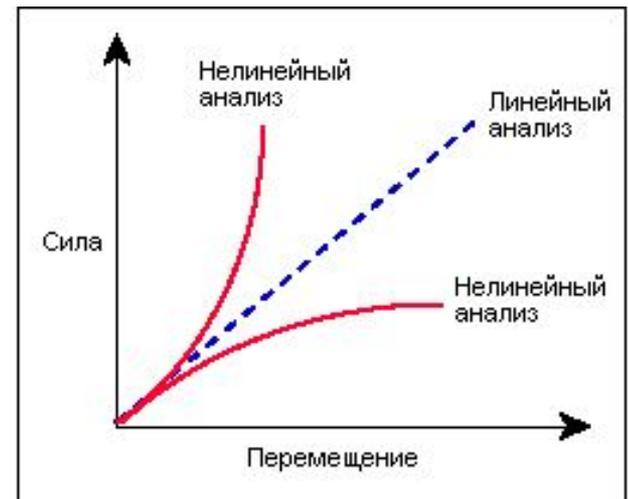
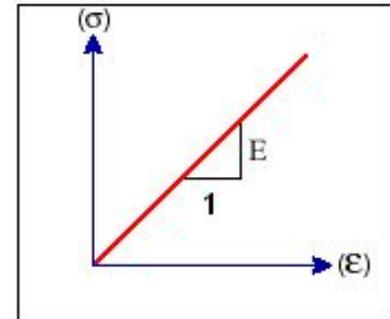
# Виды анализа и задачи решаемые в CAE - системах

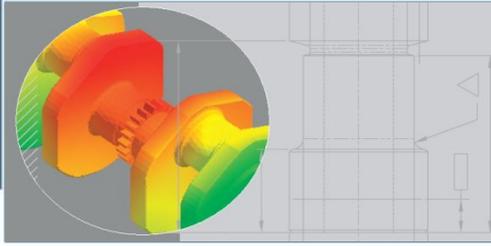
## Линейный статический анализ

Линейный статический анализ предназначен для расчёта перемещений, напряжения, и реакций под воздействием приложенных нагрузок.

При выполнении статического анализа приняты следующие условия:

- Все деформации и напряжения в материалах модели подчиняются закону Гука;
- Вызванные перемещения достаточно малы, чтобы можно было пренебречь изменениями в жесткости, вызванными нагружением;
- Граничные условия не изменяются во время приложения нагрузок.
- Нагрузки определены как постоянные по величине, направлению и распределению и не изменяются во время деформирования модели.





# Виды анализа и задачи решаемые в CAE - системах

## Частотный анализ

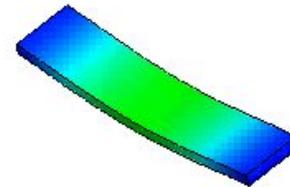
Каждая конструкция имеет свойство вибрировать на определенных частотах, называемых собственными или резонансными частотами.

Собственные частоты и формы колебаний зависят от формы, размеров, свойств материала и условий закрепления.

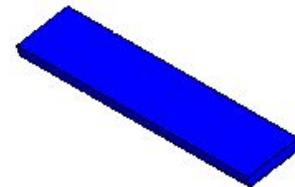
Вычисление собственных частот и форм колебаний называется частотным анализом или анализом собственных колебаний.

Частотные исследования помогают избежать резонанса, а также используются при проектировании систем виброизоляции.

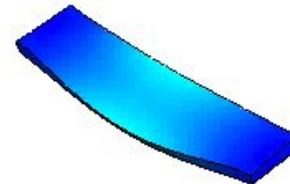
Частотные исследования позволяют сформировать базу данных для оценки реакции линейных динамических систем



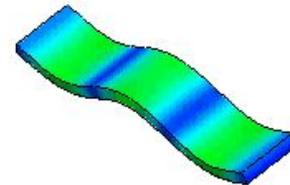
Режим 1



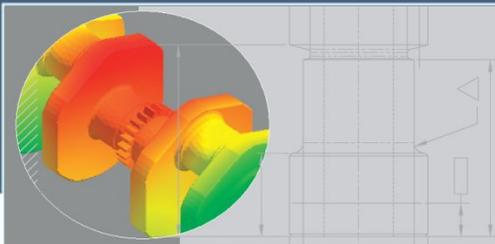
Режим 2



Режим 4



Режим 5



# Виды анализа и задачи решаемые в CAE - системах

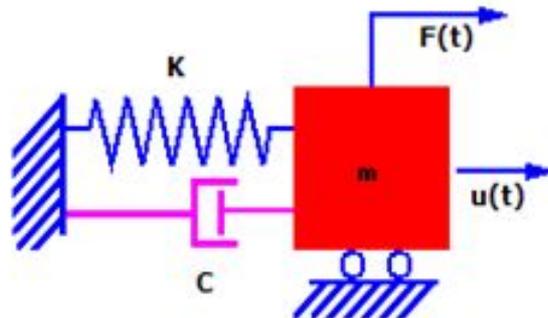
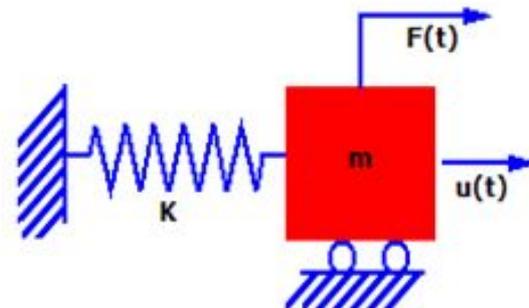
## Динамический анализ

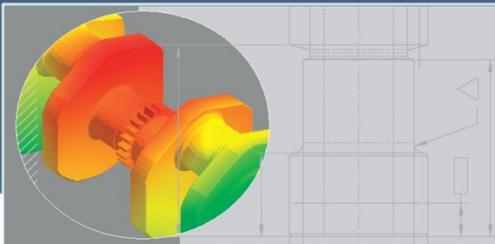
Динамический анализ используется в тех случаях когда внешние нагрузки плавно изменяются во времени или с определенной частотой.

Динамический анализ целесообразно проводить в том случае, если частота нагрузки больше чем  $1/3$  самой низкой собственной частоты объекта.

Целью динамического анализа является:

- Проектирование узлов механических систем для работы без разрушения при динамических нагрузках.
- Модификация характеристик системы (то есть, формы, механизмов демпфирования, свойств материала, и т. п.), чтобы уменьшить влияние вибрации.





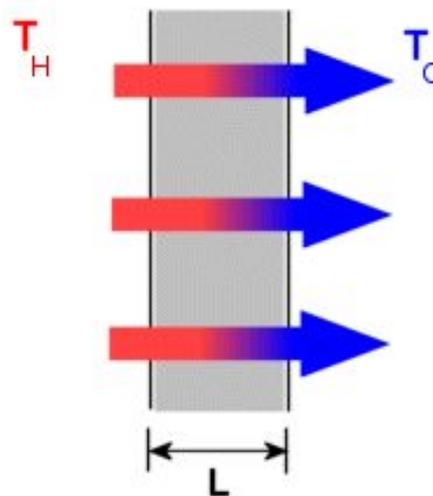
# Виды анализа и задачи решаемые в CAE - системах

## Термический анализ

Термический анализ предназначен для расчета распределения температуры в теле под воздействием процессов **теплопроводности, конвекции и излучения.**

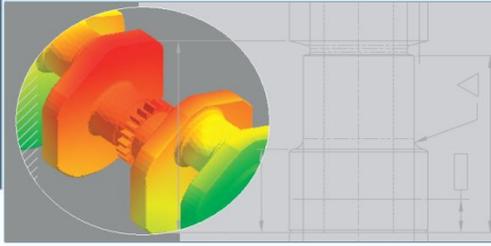
**Теплопроводность** представляет собой механизм переноса тепла, в котором термическая энергия переносится от одной точки к другой через взаимодействие между атомами или молекулами материи.

Перенос тепла в телах подчиняется закону Фурье, который устанавливает, что скорость переноса тепла **Q<sub>пр</sub>** пропорциональна площади переноса тепла **S** и температурному градиенту **dT/dx**.



$$Q_{\text{пр}} = - K * S ( T_H - T_C )/L$$

где **K** – коэфф.теплопроводности, Вт/м;  
**S** – площадь поверхности, м.кв;  
**T<sub>H</sub>** – начальная температура, градус;  
**T<sub>C</sub>** – конечная температура, градус.



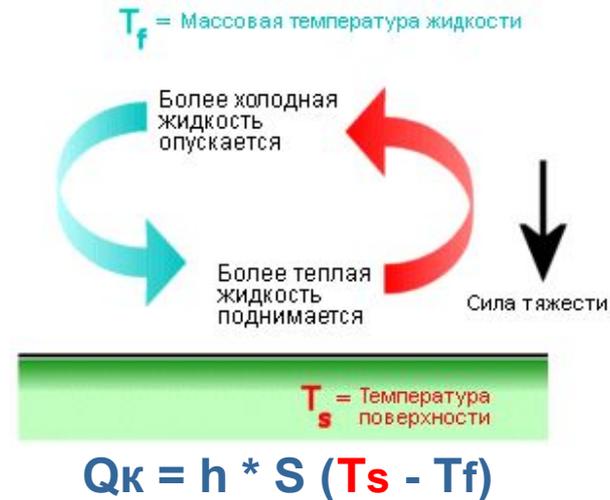
# Виды анализа и задачи решаемые в CAE - системах

## Термический анализ

**Конвекция** - физическое явление, связанное с переносом тепла, при котором тепло переносится между поверхностью твердого тела и соседствующей движущейся жидкостью или газом.

Конвекция происходит следующим образом: слой жидкости, соседствующий с горячей поверхностью, нагревается, его плотность уменьшается и он всплывает. Холодная жидкость (более тяжелая) у поверхности замещается теплой жидкостью.

Скорость теплообмена  $Q_k$  между жидкостью с температурой  $T_f$  и поверхностью твердого тела площадью  $S$  при температуре  $T_s$  подчиняется закону охлаждения Ньютона,

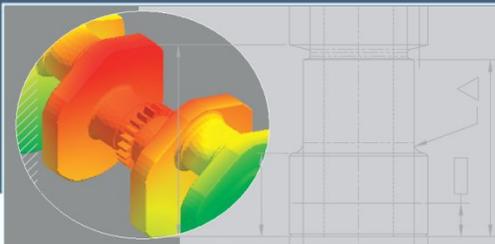


где  $h$  – коэфф. конвективной теплопередачи, Вт/м.кв;

$S$  – площадь поверхности, м.кв;

$T_f$  – температура жидкости, град;

$T_s$  – температура поверхности, град.



# Виды анализа и задачи решаемые в CAE - системах

## Термический анализ

**Тепловое излучение** представляет собой тепловую энергию, испускаемую телами в форме электромагнитных волн при температуре тела выше абсолютного нуля.

При определении излучения от поверхностей в CAE – системах обычно рассматриваются следующие варианты:

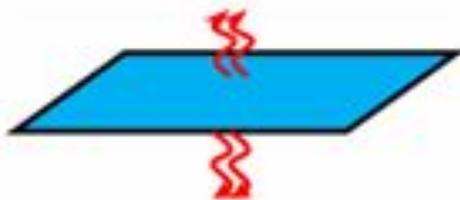
Поверхность с окружением

Излучение направлено в окружающую среду от одной стороны поверхности

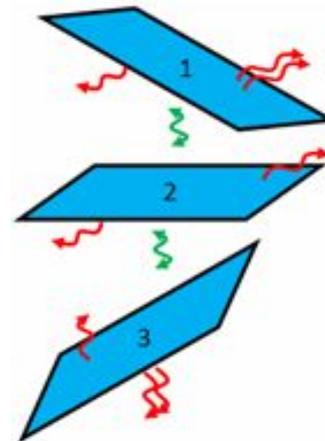


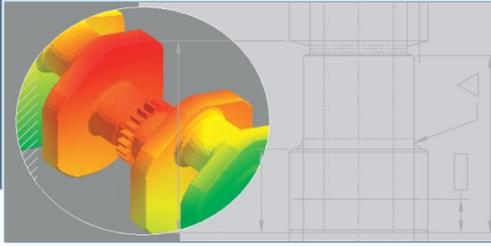
Открытая система

Излучение направлено в среду от обеих сторон поверхностей



От поверхности к поверхности





# Виды анализа и задачи решаемые в CAE - системах

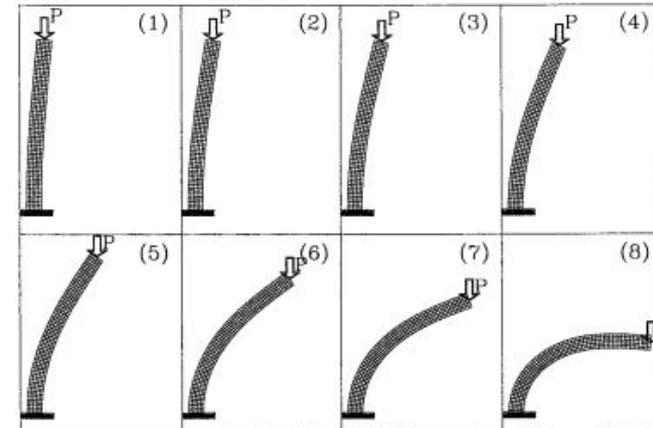
## Анализ потери устойчивости

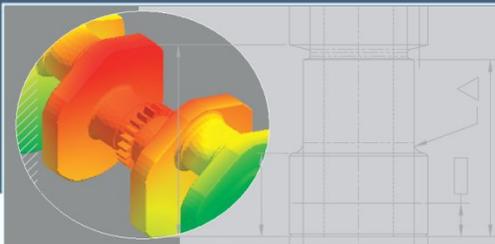
**Анализ потери устойчивости** решает задачу оценки критических коэффициентов потери устойчивости и определяет форму объекта в режиме потери устойчивости.

**Потеря устойчивости** определяется как внезапная деформация, которая происходит тогда, когда внутренняя сохраненная энергия преобразуется в энергию изгиба при постоянных величинах или направлениях приложенных внешних нагрузок.

**Коэффициент критической продольной нагрузки** (BLF) равен коэффициенту запаса прочности при потере устойчивости или отношению критической нагрузки потери устойчивости к приложенной нагрузке.

Форма, которую модель принимает при потере устойчивости, называется **«Форма режима потери устойчивости»**, а нагрузка называется **«Критическая продольная нагрузка»**.





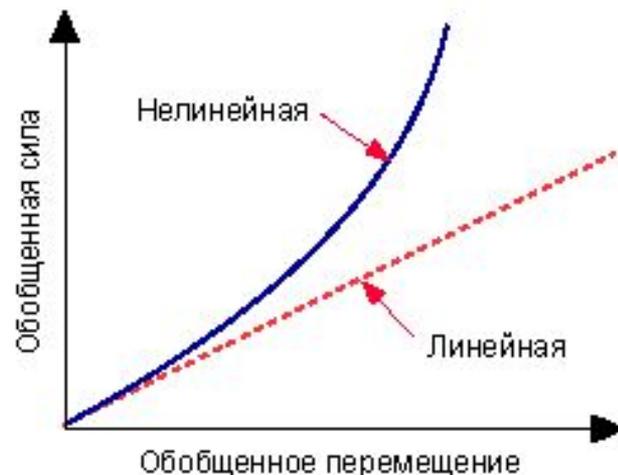
# Виды анализа и задачи решаемые в CAE - системах

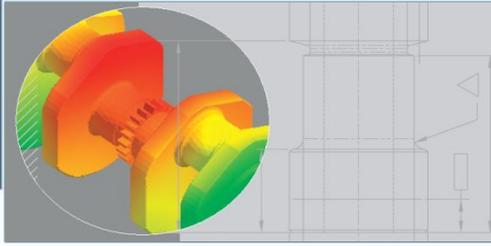
## Нелинейный статический анализ

Нелинейный статический анализ предназначен для расчёта перемещений, напряжений, и реакций под воздействием приложенных нагрузок если материал объекта при этих условиях имеет нелинейные характеристики напряжение-деформация.

**Нелинейность** может быть вызвана физико-механическими свойствами материала, большими перемещениями и условиями контакта поверхностей деталей.

У различных материалов с увеличением нагрузки отношение напряжение-деформация становится нелинейным. В таких случаях линейный анализ может привести к ошибочным результатам, так как нарушены допущения на которых он основан.





# Виды анализа и задачи решаемые в CAE - системах

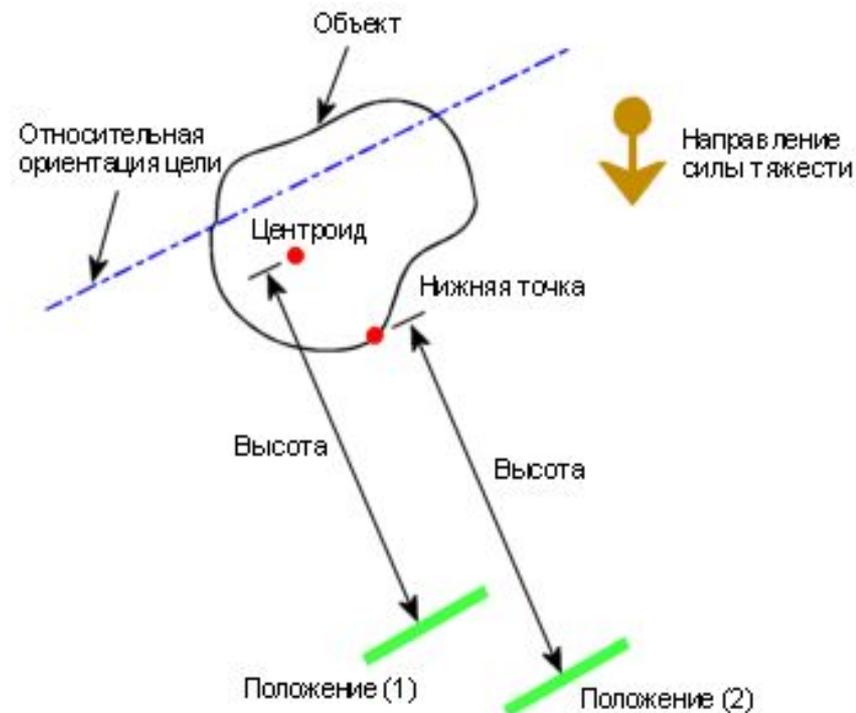
## Анализ при ударных нагрузках

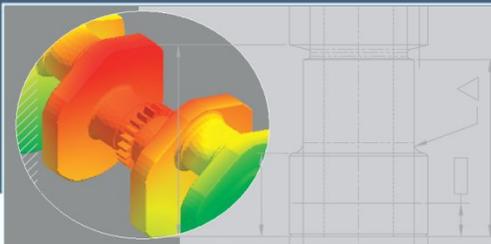
Исследования на ударную нагрузку оценивают воздействие удара детали или сборки о жесткую или гибкую плоскую поверхность.

Программа анализа ударных нагрузок автоматически определяет силу удара, гравитационные нагрузки, условия контакта между телом и плоскостью удара.

Исходными данными при анализе ударных нагрузок являются:

- Высота падения;
- Скорость при ударе;
- Значение ускорения свободного падения;
- Ориентация плоскости удара;
- Коэффициент трения между объектом и плоскостью удара





# Виды анализа и задачи решаемые в CAE - системах

## Анализ усталости

Исследования на усталость позволяют оценить **усталостную долговечность объекта**

**Усталостная долговечность**, при заданном уровне знакопеременного напряжения, равна количеству циклов нагружения, требуемых, для разрушения объекта.

При исследовании на усталость знакопеременные напряжения задаются максимальным и минимальным напряжениями с постоянной или переменной амплитудами.

После проведения анализа усталости можно создать эпюры срока жизни, повреждений и коэффициента безопасности для исследуемого объекта.

