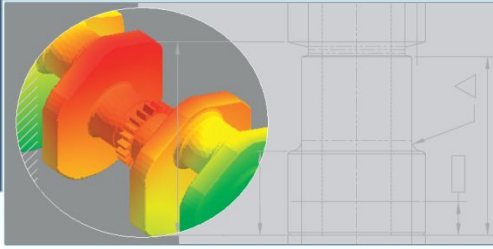


Термический анализ

- Основные положения термического анализа
- Термические нагрузки и ограничения
- Создание конечно-элементной сетки
- Процессорная и постпроцессорная стадии моделирования



Основные положения термического анализа

Термический анализ (Thermal Simulation) позволяет определить распределение температуры в теле изделия под воздействием различных механизмов теплообмена:

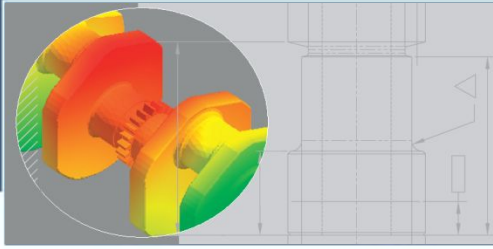
- **Теплопроводность**
- **Конвекция**
- **Излучения**

Теплообмен представляет собой передачу тепловой энергии из одной области в другую в результате разности температур.

Во всех трех механизмах теплообмена тепловая энергия перетекает от среды с большей температурой к среде с меньшей температурой.

Теплообмен путем теплопроводности и конвекции требует присутствия некоторой промежуточной среды.

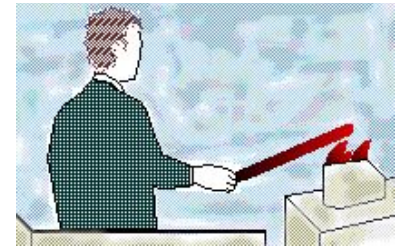
При переносе тепла излучением промежуточной среды не требуется.



Основные положения термического анализа

Механизмы теплопередачи

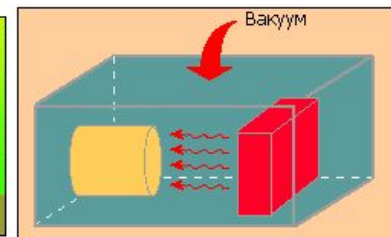
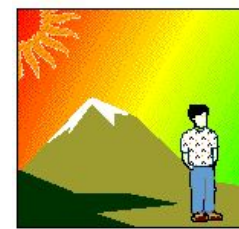
Теплопроводность - это теплообмен посредством молекулярного возбуждения в материале без общего движения материала. Теплопроводность - это основной вид теплообмена в твердых телах.

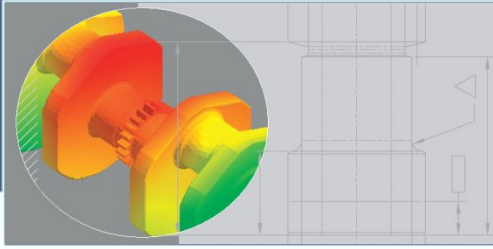


Конвекция - это теплообмен посредством движения жидкостей. Конвекция - это основной вид теплообмена между поверхностями твердых тел и граничащими с ними жидкостями или газами.



Излучение - это теплообмен посредством электромагнитных волн. В отличие от проводимости и конвекции, излучение не требует наличия среды, так как электромагнитные волны могут распространяться в вакууме.





Основные положения термического анализа

Типы анализа теплообмена

Существует два типа анализа теплообмена:

1. Стационарный термический анализ.

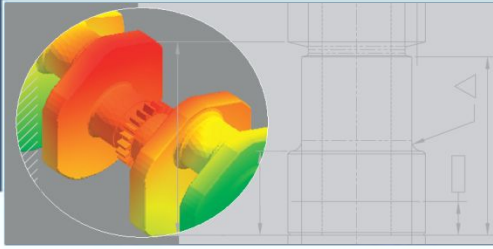
При этом типе анализа основное внимание уделяется тепловому режиму тела, когда оно достигает теплового равновесия. Время, необходимое для достижения теплового равновесия, не имеет значения.

2. Нестационарный (переходный) термический анализ.

При этом типе анализа основное внимание уделяется тепловому режиму тела в отдельные моменты времени.

Анализ термических напряжений

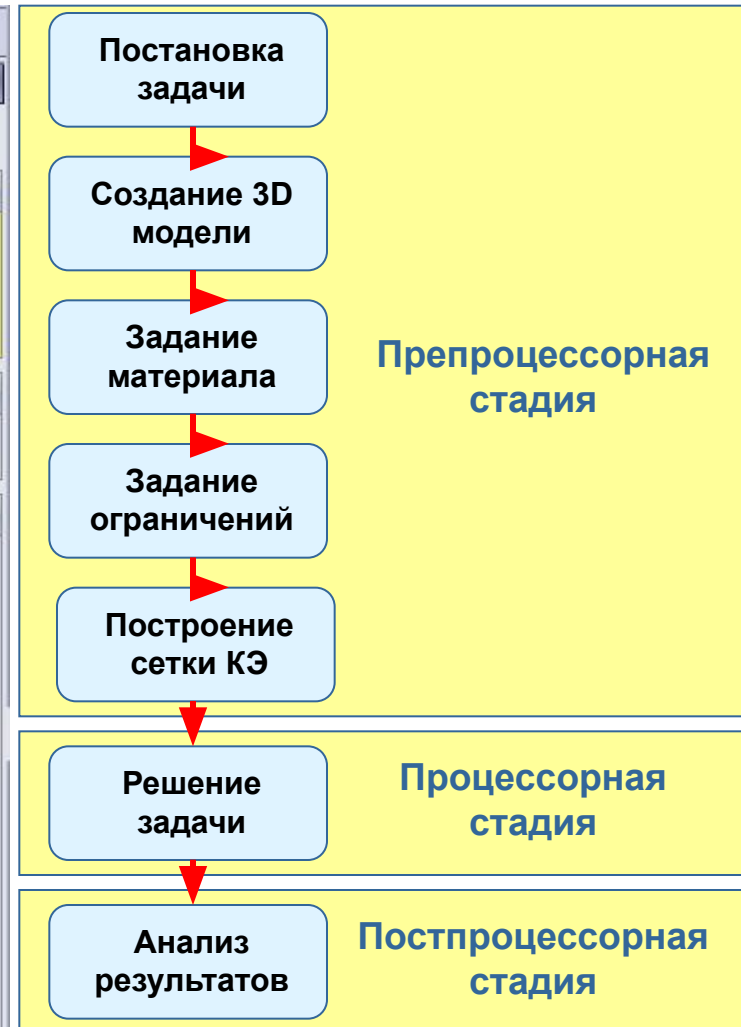
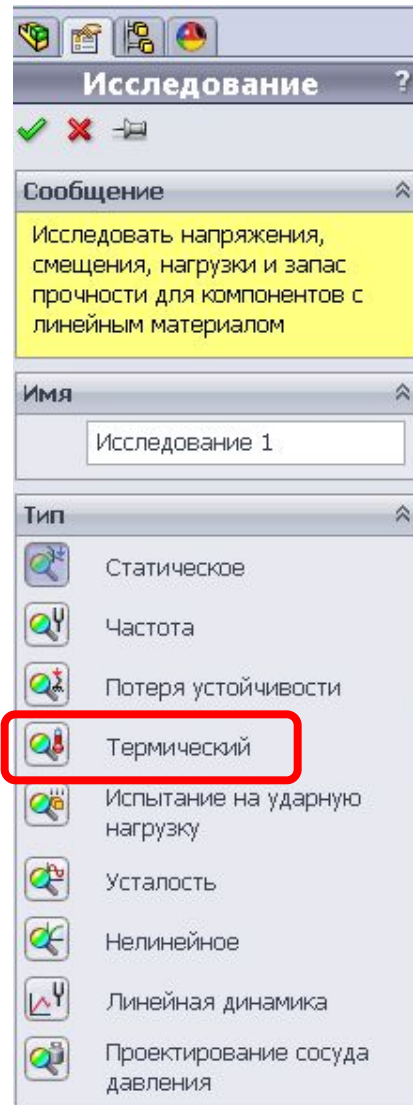
Изменения температуры могут приводить к возникновению значительных напряжений в теле. При анализе термического напряжения рассчитываются напряжения, нагрузки и перемещения, возникающие в результате тепловых эффектов.

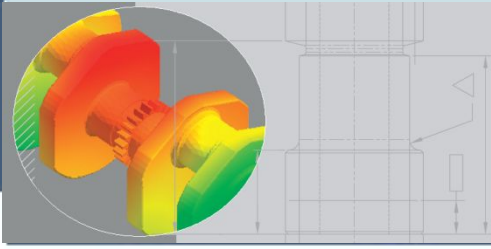


Основные этапы термического анализа

Процедура термического анализа состоит из трех основных стадий:

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



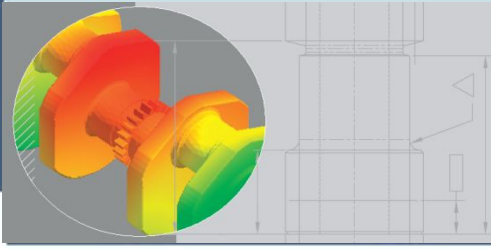


Основные этапы термического анализа

Постановка задачи исследования теплообмена

На этапе постановки задачи в общем случае определяются:

- Параметры геометрической модели объекта термического анализа
- Характеристики материала моделируемого объекта
- Вид термического анализа
- Источники тепла и их тепловая мощность (скорость передачи тепла)
- Характер изменения тепловой мощности во времени
- Способ подвода тепла и его рассеяния
- Температура окружающей среды



Основные этапы термического анализа

Пример постановки задачи

Сборка изготовлена из прямоугольной подложки (силиконовая керамика) с размерами 40X40X1 мм, и 16-ти прямоугольных кристаллов с размерами 6 X 6 X 0.5 мм.

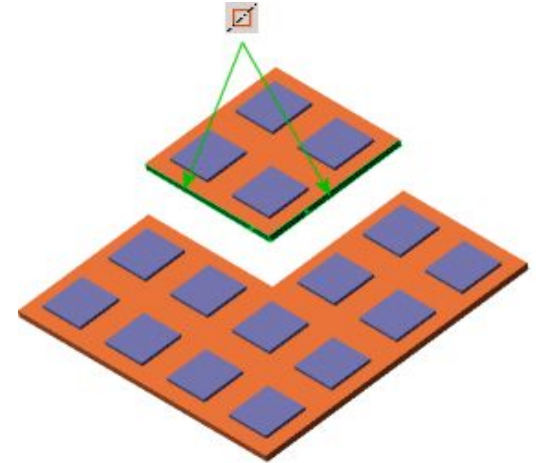
Каждый кристалл выделяет максимальную тепловую мощность 0,2 Вт.

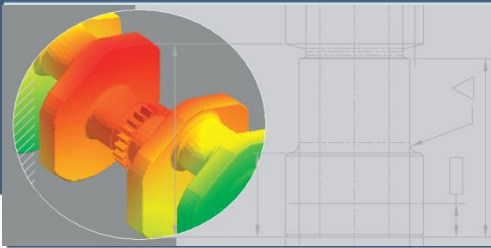
Тепловая мощность увеличивается от нуля во время $t = 0$ и достигнет максимального значения (0,2 Вт) через 60 секунд.

Коэффициент теплопроводности кристалла изменяется с температурой.

Тепло из подложки рассеивается посредством конвекции. Коэффициент конвективной теплопередачи равен 25 Вт/м² К, а температура окружающей среды равна 300° К.

Ввиду наличия двух плоскостей симметрии, с целью сокращения размера задачи стационарный термический анализ будет выполняться для $\frac{1}{4}$ модели.





Основные этапы термического анализа

Задание свойств материала для выбранных объектов из библиотеки

Применить материал
 Определение материала для выбранных объектов.

В дереве Simulation выбирается объект и нажимается кнопка Применить

Материал

- + SolidWorks DIN Materials
- solidworks materials
 - + Сталь
 - + Железо
 - + Сплавы алюминия
 - + Сплавы меди
 - + Сплавы титана
 - + Сплавы цинка
 - + Другие сплавы
 - + Пластик
 - + Другие металлы
 - Другие неметаллы
 - Воздух
 - Керамика фарфор**
 - Гофрированная бумага
 - Стекло
 - С (Графит)
 - Полиуретановый гибкий пенопласт
 - Полиуретановый жесткий пенопласт
 - Резина
 - Вода
 - + Общие стеклянные волокна
 - + Углеродное волокно
 - + Кремний
 - + Резина
 - + Дерево
 - + Sustainability Extras
 - + Настроенный пользователем материал

Свойства Таблицы и кривые Внешний вид Штриховка Настройка Данные прог

Свойства материала

Материалы в библиотеке по умолчанию не могут редактироваться. Необходимо скопировать материал в настроенную пользователем библиотеку и затем его отредактировать.

Тип модели:

Единицы измерения:

Категория:

Имя:

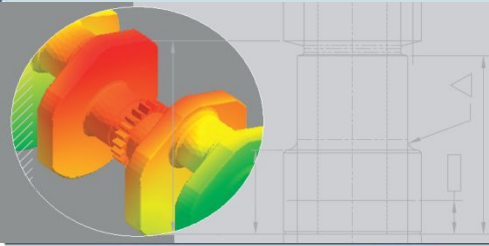
Критерий разрушения по умолчанию:

Описание:

Источник:

Sustainability:

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости в X	2.2059e+011	Н/м^2
Коэффициент Пуассона в XY	0.22	Не применимо
Модуль сдвига в XY	9.0407e+010	Н/м^2
Массовая плотность	2300	кг/м^3
Предел прочности при растяжении в X	172340000	Н/м^2
Предел прочности при сжатии в X	551490000	Н/м^2
Предел текучести		Н/м^2
Коэффициент теплового расширения в X	1.08e-005	/K
Теплопроводность в X	1.4949	Вт/(м·К)
Удельная теплоемкость	877.96	Д/(кг·К)
Коэффициент демпфирования материала		Не применимо



Основные этапы термического анализа

Задание оригинальных свойств материала для выбранных объектов

Материал

- SolidWorks DIN Materials
- solidworks materials
- Sustainability Extras
- Настроенный пользователем материал
 - Пластмасса
 - computer_chip
 - Chip Material**

Свойства | Таблицы и кривые | Внешний вид | Штриховка | Настройка | Данные прог

Свойства материала

Материалы в библиотеке по умолчанию не могут редактироваться. Необходимо скопировать материал в настроенную пользователем библиотеку и затем его отредактировать.

Тип модели:

Единицы измерения:

Категория:

Имя:

Критерий разрушения по умолчанию:

Описание:

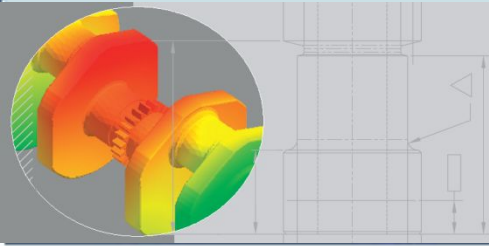
Источник:

Sustainability:

Свойство	Значение	Единицы и
Модуль упругости	4.1e+011	Н/м²
Коэффициент Пуассона	0.3	Не примен
Модуль сдвига в XY		Н/м²
Массовая плотность	1250	кг/м³
Предел прочности при растяжении в X		Н/м²
Предел прочности при сжатии в X		Н/м²
Предел текучести		Н/м²
Коэффициент теплового расширения	1e-006	/К
Теплопроводность	Температурно-зависимый	Вт/(м·К)
Удельная теплоемкость	670	Дж/(кг·К)



Применить материал
 Определение материала для выбранных объектов.

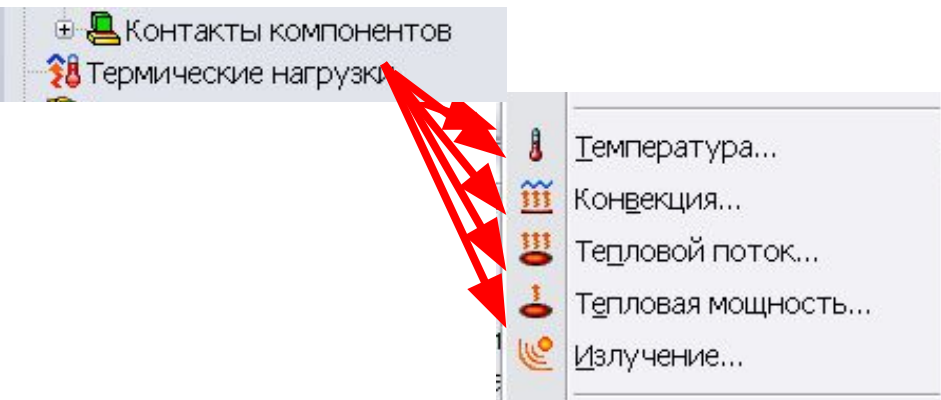


Основные этапы термического анализа

Термические нагрузки и ограничения

Для термических исследований доступны следующие виды нагрузок и ограничений :

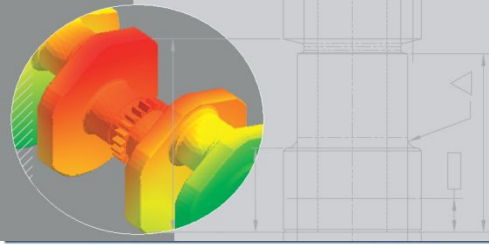
- Температура
- Конвекция
- Тепловой поток
- Тепловая мощность
- Излучение



Термические нагрузки и ограничения, за исключением температуры, которая может быть использована в других исследованиях конструкций, доступны только для термических исследований.

Для термических исследований в установившемся состоянии с тепловым источником должен быть определен механизм рассеивания тепла. В противном случае, анализ останавливается, так как температуры повышаются без ограничений.

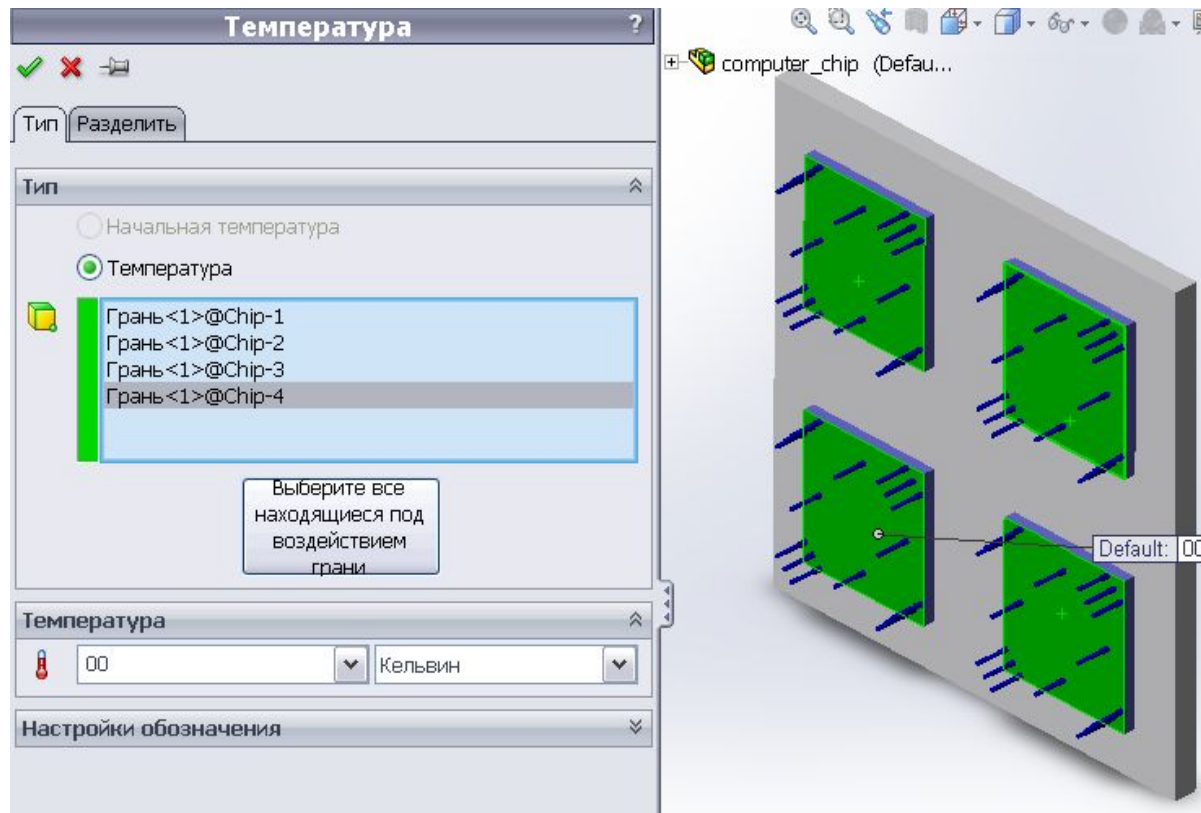
Переходные термические исследования, которые запускаются на относительно короткий период времени, не требуют механизма рассеивания тепла.

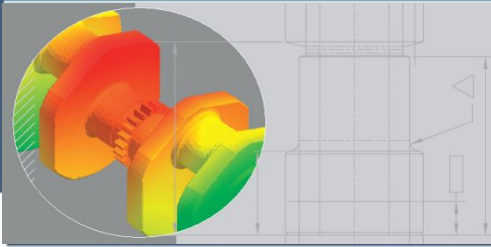


Основные этапы термического анализа

Задание температуры

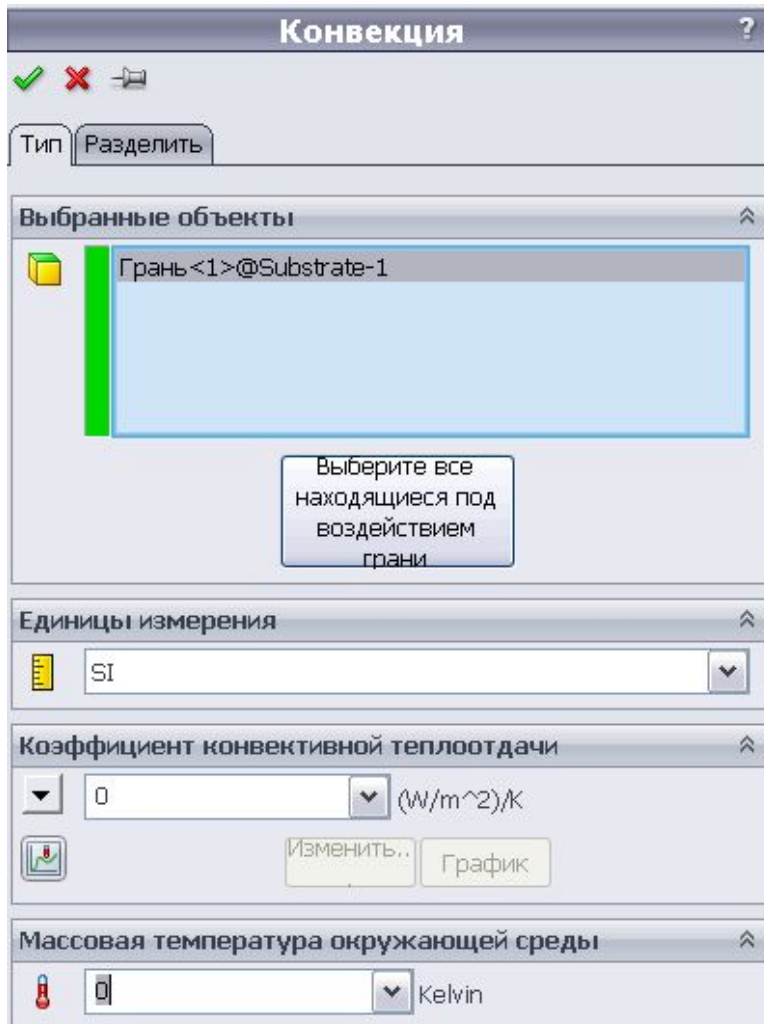
Для задания температуры в графической области выбираются необходимые грани, кромки, вершины и компоненты, к которым будет применена заданная температура или выберутся все доступные воздействию грани, для их одновременного выбора.





Основные этапы термического анализа

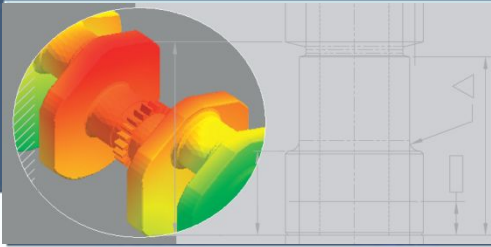
Задание конвекции



Опция Конвекция используется для задания граничных условий конвекции к выбранным граням модели в термическом анализе (устойчивого состояния и переходного).

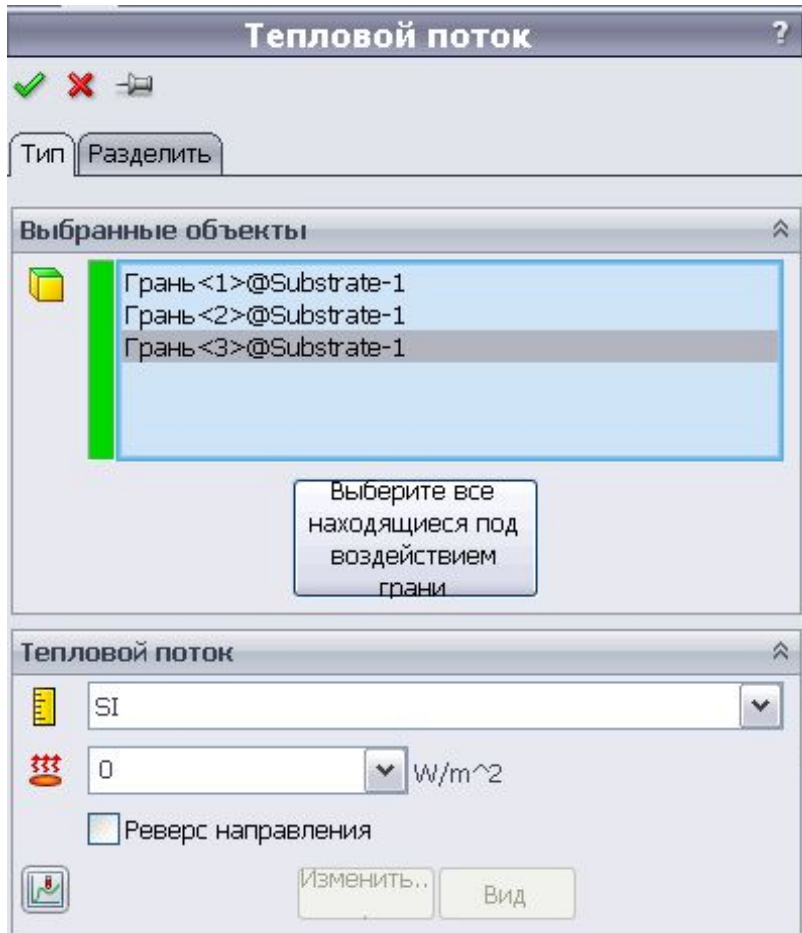
Пользователь может связать **кривую температуры** с коэффициентом конвективной теплоотдачи для моделирования зависимого от температуры изменения.

В переходных термических исследованиях также имеется возможность связать **кривую времени** для моделирования зависимости от времени коэффициента конвективной теплоотдачи и температуры.



Основные этапы термического анализа

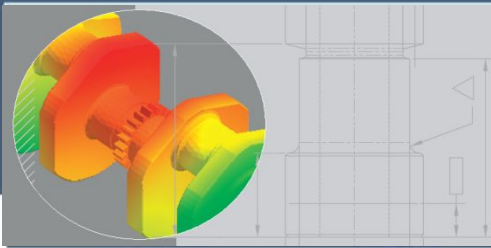
Задание теплового потока



Ограничение Тепловой поток позволяет применить его к выбранными поверхностями. Тепловой поток используется только в термических исследований.

Для термических исследований установившегося состояния можно определить тепловой поток, зависящий от температуры. Для переходного термического исследования можно определить зависящий от времени или температуры тепловой поток и **термостат** для управления тепловым потоком.

Для переходных термических исследований все присваивания тепловой мощности и тепловых потоков могут контролироваться с помощью механизма термостата, определяемого требуемым температурным диапазоном в некоторой вершине. В исследовании можно использовать несколько термостатов.



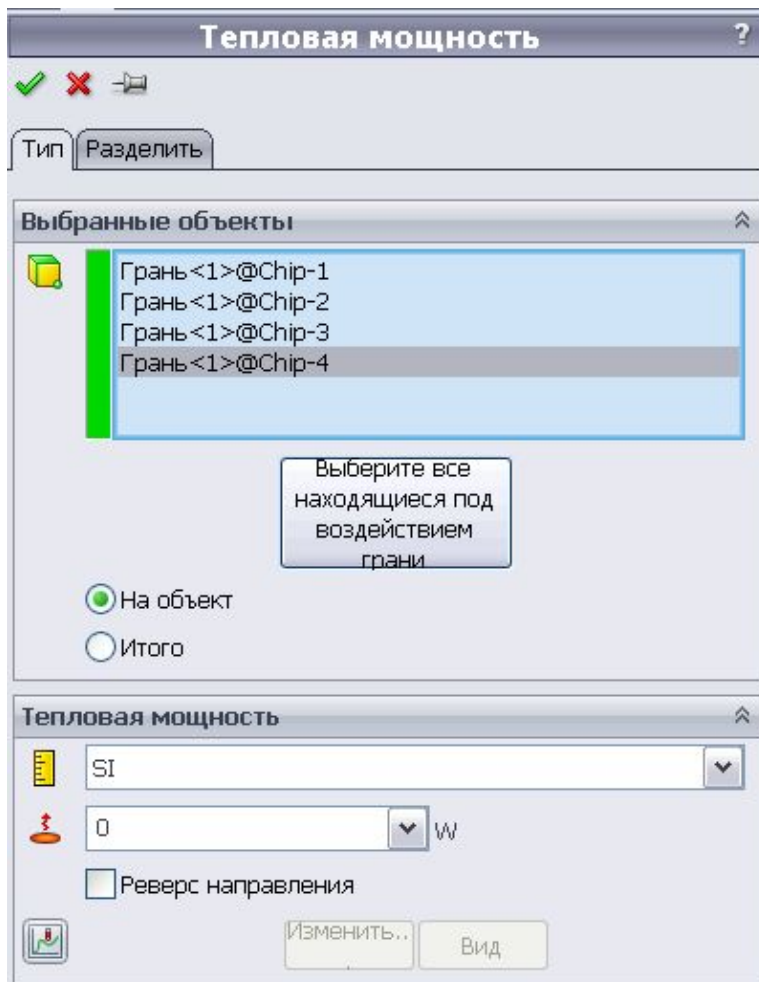
Основные этапы термического анализа

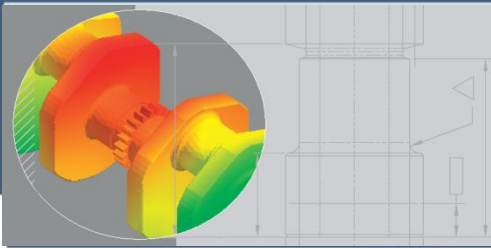
Задание тепловой мощности

Ограничение Тепловая мощность позволяет задать тепловую мощность на вершинах, кромках, поверхностях и компонентах сборки.

Значение тепловой мощности может быть положительным или отрицательным. Положительное значение указывает на нагрев, а отрицательное значение означает охлаждение (поглощение тепла).

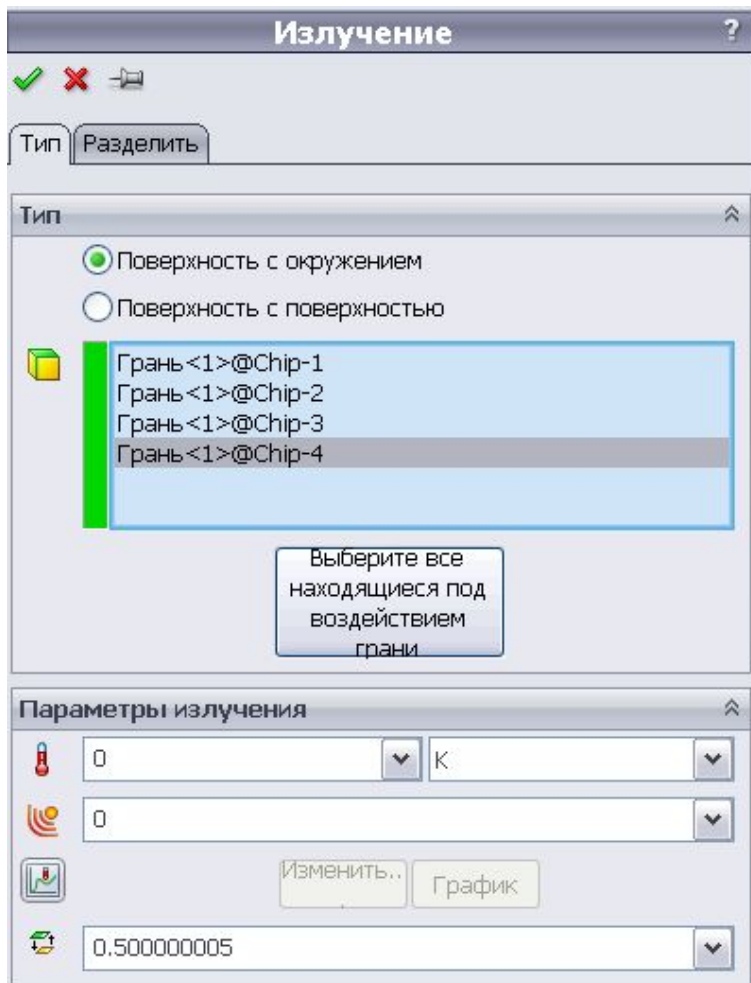
Тепловая мощность используется только в термических исследованиях.



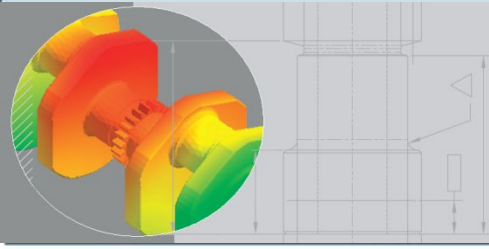


Основные этапы термического анализа

Задание излучения

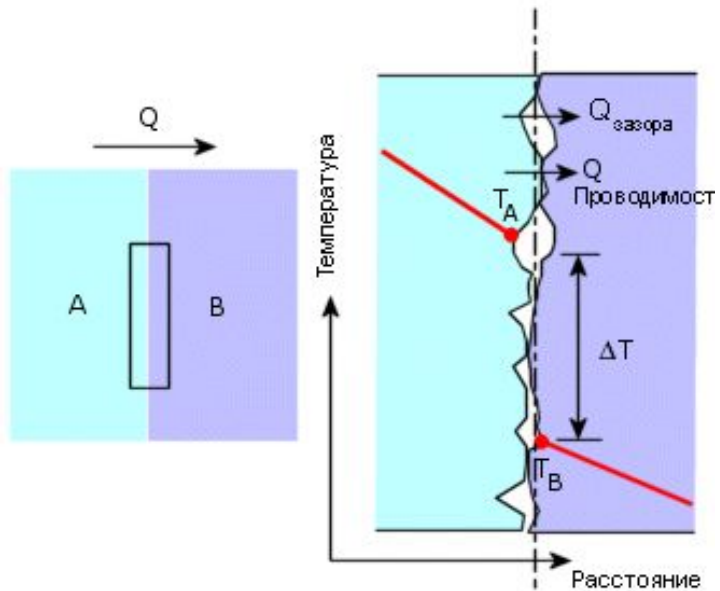


Ограничение Излучение позволяет задать излучения от поверхности в окружающую среду или от поверхности к поверхности. Излучение используется только в термических исследованиях. При задании излучения от поверхности к поверхности можно учитывать излучение в окружающую среду (открытая система) или пренебречь им (закрытая система). Программа вычисляет коэффициенты видимости излучения и учитывает блокировку между выбранными поверхностями. При задании излучения от поверхности к поверхности все выбранные грани в любом излучающем элементе излучают друг на друга.



Основные этапы термического анализа

Задание сопротивления термического контакта



Для сборок дополнительно необходимо определять условия термического контакта. Это связано с наличием у поверхности после механической обработки шероховатости, отклонений от правильной формы и положения. Из-за этого две поверхности никогда не могут образовать абсолютный контакт.

Условия контакта значительно влияют на тепловой поток, проходящий через области контакта.

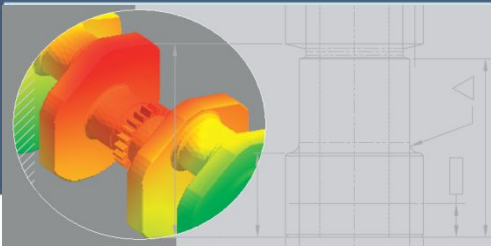
Проводимость в пограничной области hc зависит от следующих факторов:

- Качества обработки контактирующих граней
- Материала контактируемых деталей.
- Давление, с которым грани прижаты друг к другу.
- Теплофизических свойств вещества, находящегося в зазорах между двумя контактирующими гранями.

Сопротивление термического контакта

$$R_t = 1/(A hc) ,$$

где A – площадь контакта;
 hc – проводимость в пограничной области.



Основные этапы термического анализа

Задание сопротивления термического контакта

Компонент соприкосновения

Сообщение
Выберите компоненты/тела для определения контакта типа Связь. Примечание: Выбор сборки верхнего уровня применит контакт типа Связь ко всем компонентам.

Тип контакта

- Связанные(Зазор отсутствует)
- Изолированный

Компоненты

- Глобальный контакт

Параметры

- Совместимая сетка
- Несовместимая сетка

Наборы контактов

Контакт

- Выберите наборы контактов вручную
- Найти наборы контактов автоматически

Тип

Тепловое сопротивление

Тепловое сопротивление

SI

- Итого
- Распределенные

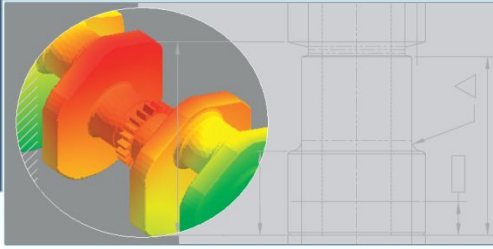
0 K/W

Дополнительно

- Узел к узлу
- Узел с поверхностью
- Поверхность с поверхностью

Наиболее точные результаты анализа достигаются, когда зазор между двумя контактирующими гранями не превышает размер соседнего элемента.

Чтобы задать разные значения термического сопротивления между крупной поверхностью и несколькими малыми поверхностями, необходимо сначала разделить крупную поверхность на несколько мелких и только потом приступить к назначению сопротивлений термического контакта для разных пар.



Основные этапы термического анализа

Построение сетки конечных элементов

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.

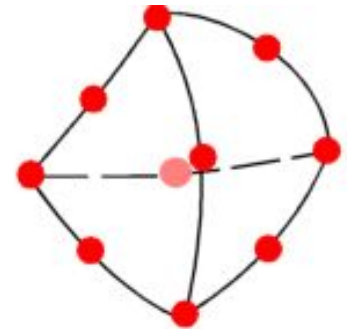
Сетка высокого качества. Создается автоматически на основе параболических тетраэдральных твердотельных элементов.

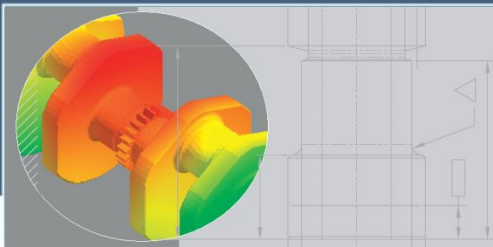
Линейные элементы называются элементами первого или низшего порядка, а параболические элементы называются элементами второго или высшего порядка.

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.





Основные этапы термического анализа

Управление параметрами сетки

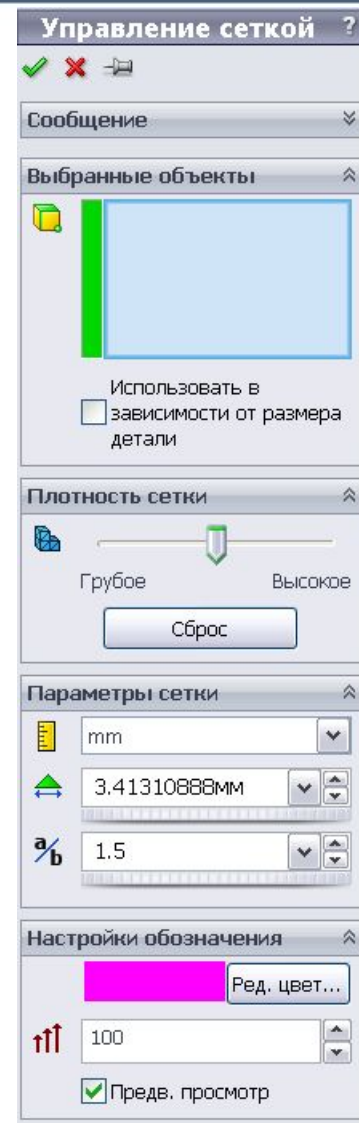
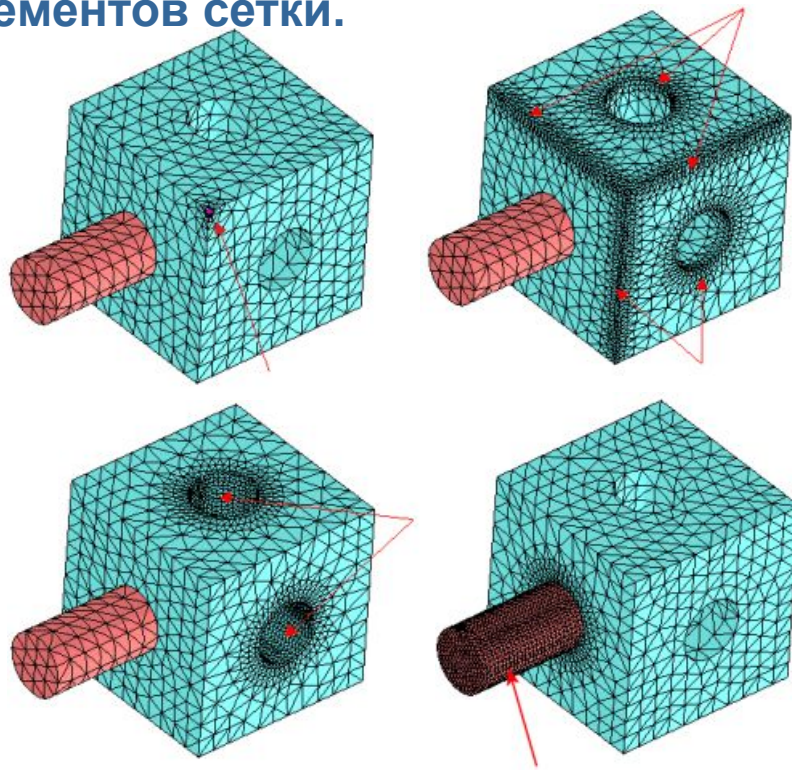
Управление сеткой заключается в определении параметров элементов сетки в различных областях модели.

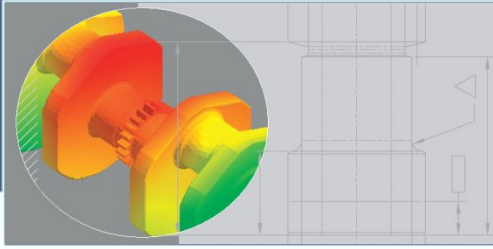
Параметрами управления сеткой являются:

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.





Основные этапы термического анализа

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.

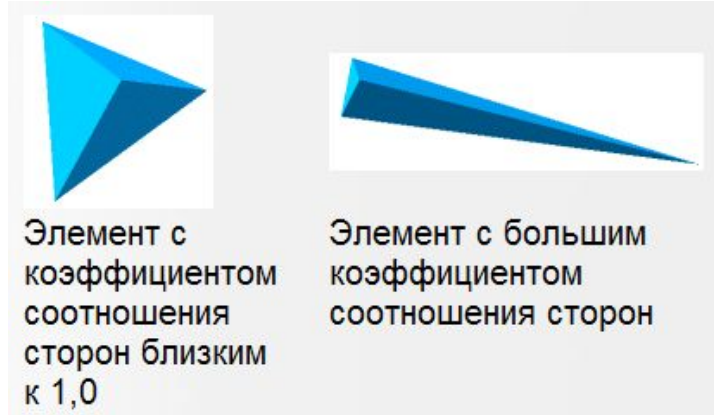
Рекомендуется использовать элементы с соотношением сторон не более 5.

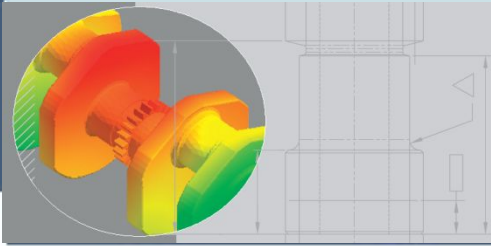
Точки Якобиана

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.





Основные этапы термического анализа

Выполнение термического анализа

Диалоговое окно **Термический** позволяет выбрать необходимые параметры термического исследования.

Общее время - для переходного анализа указывается общее время, представляющее интерес (T). По умолчанию 1,0 сек.

Временной инкремент - указывается приращение времени (Δt) для шагов решения переходного процесса. По умолчанию 0,1 сек.

Начальные температуры для термического исследования - используются температуры из термического исследования (установившееся состояние или переходный процесс) в качестве начального условия исследования переходного термического процесса

Решающая программа - позволяет задать решающую программу, используемую при запуске исследования.

Термический

Параметры | Дополнительно | Замечание

Тип решения

Переходный процесс: Устойчивое состояние:

Общее время: сек

Временной инкремент: сек

Начальные температуры для термического исследования

Термическое исследование: Временные шаги:

Включить эффекты конвекции жидкости с SolidWorks Flow Simulation

Параметры конвекции жидкости

Имя модели SolidWorks

Имя конфигурации

Номер повтора потока

Решающая программа

Автоматическая

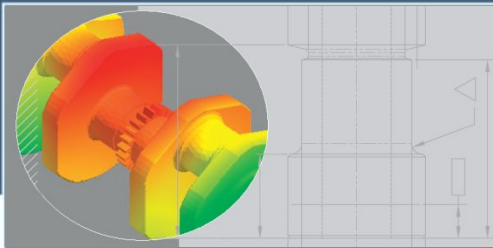
Direct sparse

FFEPlus

Папка результатов

Дополнительные параметры...

OK Отмена Справка



Процессорная стадия моделирования

После запуска исследования, программа автоматически рассчитывает результаты анализа, основанные на введенных данных о материалах, ограничениях 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.

Исследование 1

Идет решение: 50%

Использование памяти: 29,892К

Прошло времени: 42s

Всегда отображать статус решающей программы

Текущая задача: Идет решение для нагрузки 100 %

100%

Исследование

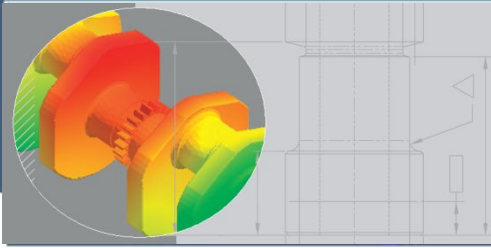
Степени свободы: 42,513
Количество узлов: 14,339
Количество элементов: 8,184

Решающая программа
Тип: Итеративный

Предупреж

График сходимости тры решающей про

Пауза Отмена Меньше <<



Основные этапы термического анализа

Анализ результатов термического исследования

После выполнения термического исследования можно создать эпюры следующих величин:

TEMP → Температура

GRADX → Температурный градиент в направлении оси X выбранной справочной геометрии

GRADY → Температурный градиент в направлении оси Y выбранной справочной геометрии

GRADZ → Температурный градиент в направлении оси Z выбранной справочной геометрии

GRADN → Результирующий температурный градиент

$$\text{GRADN} = [(\text{GRADX})^2 + (\text{GRADY})^2 + (\text{GRADZ})^2]^{(1/2)}$$

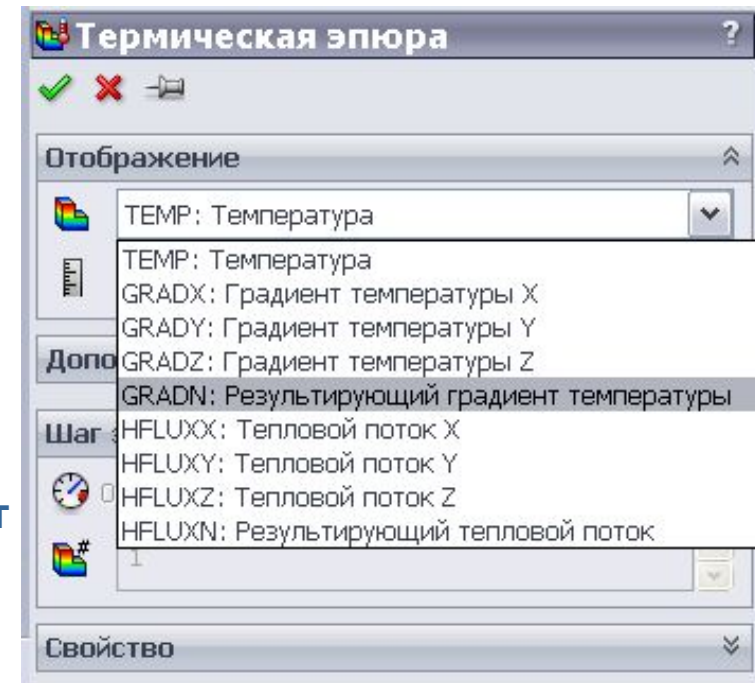
HFLUXX → Тепловой поток в направлении оси X выбранной справочной геометрии

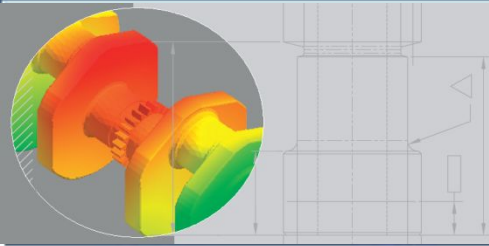
HFLUXY → Тепловой поток в направлении оси Y выбранной справочной геометрии

HFLUXZ → Тепловой поток в направлении оси Z выбранной справочной геометрии

HFLUXN → Результирующий тепловой поток

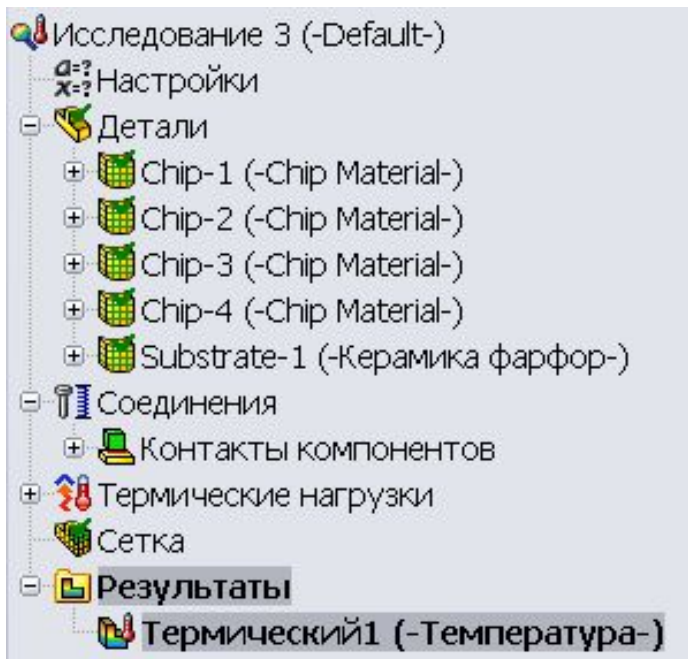
$$\text{HFLUXN} = [(\text{HFLUXX})^2 + (\text{HFLUXY})^2 + (\text{HFLUXZ})^2]^{(1/2)}$$



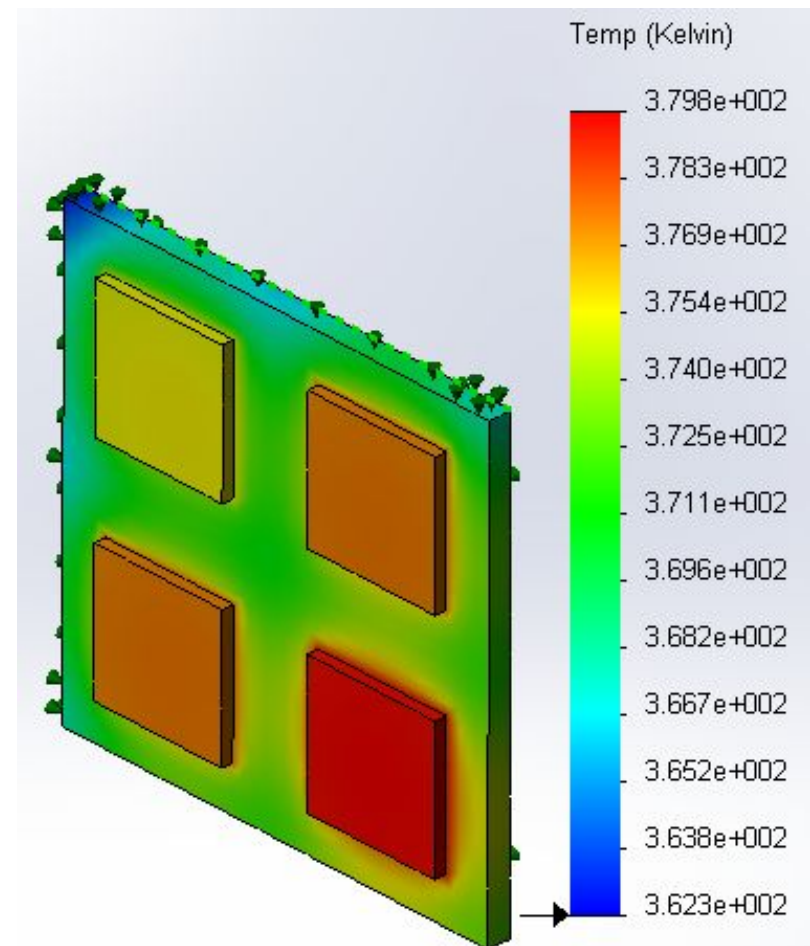


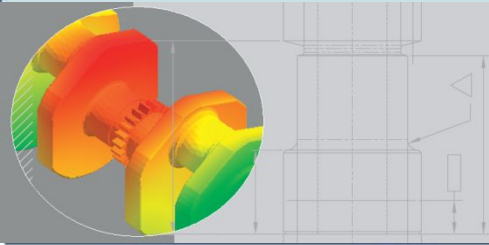
Основные этапы термического анализа

Анализ результатов термического анализа Эюра температуры



Верхний левый угол кристалла является самым холодным, а самое горячее место находится внутри кристалла (нижний правый угол), вследствие конвекции.





Основные этапы термического анализа

Анализ результатов термического анализа Зондирование

PropertyManager

Результат зондирования

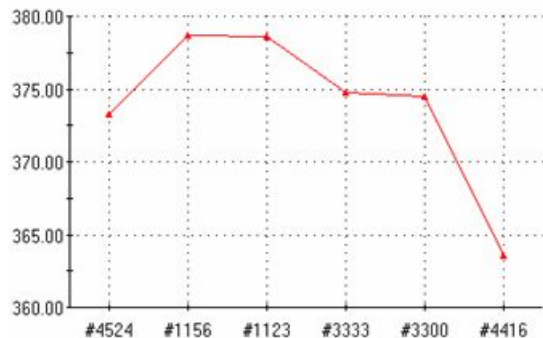
✓ ✗ 🗑

Параметры

- В местоположении
- От датчиков
- Для выбранных объектов

Результаты

Узел	Значение (Kelvin)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
4442	3.730e+002	10	-10	0
1156	3.796e+002	8	-8	0.5
1123	3.795e+002	2	-2	0.5
3333	3.754e+002	-2	2	0.5
3300	3.751e+002	-8	8	0.5
4390	3.629e+002	-10	10	0



Узел:	4390
Местоположение X, Y, Z:	-10,10,0 mm
Значение:	3.629e+002 Kelvin

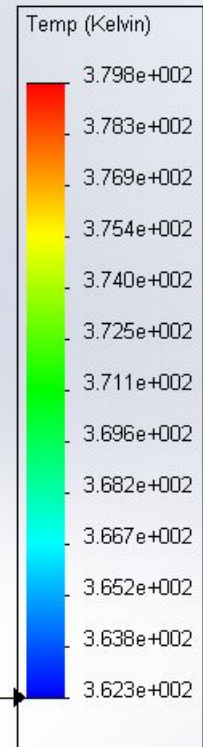
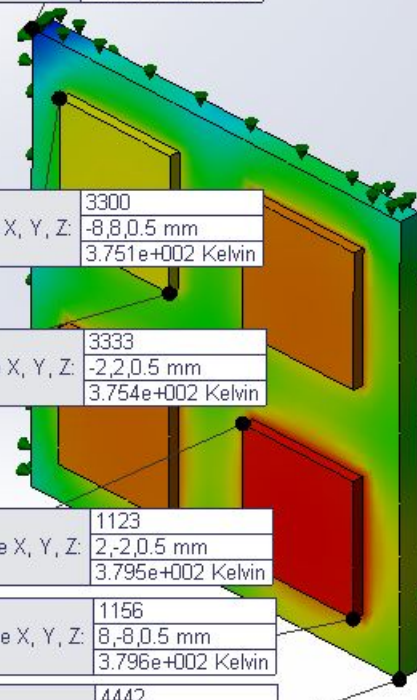
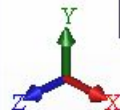
Узел:	3300
Местоположение X, Y, Z:	-8,0,5 mm
Значение:	3.751e+002 Kelvin

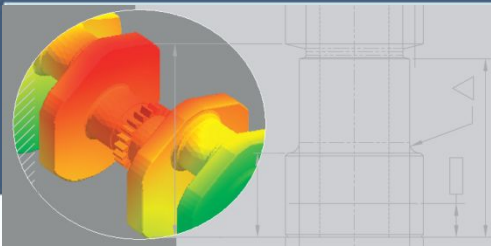
Узел:	3333
Местоположение X, Y, Z:	-2,2,0,5 mm
Значение:	3.754e+002 Kelvin

Узел:	1123
Местоположение X, Y, Z:	2,-2,0,5 mm
Значение:	3.795e+002 Kelvin

Узел:	1156
Местоположение X, Y, Z:	8,-8,0,5 mm
Значение:	3.796e+002 Kelvin

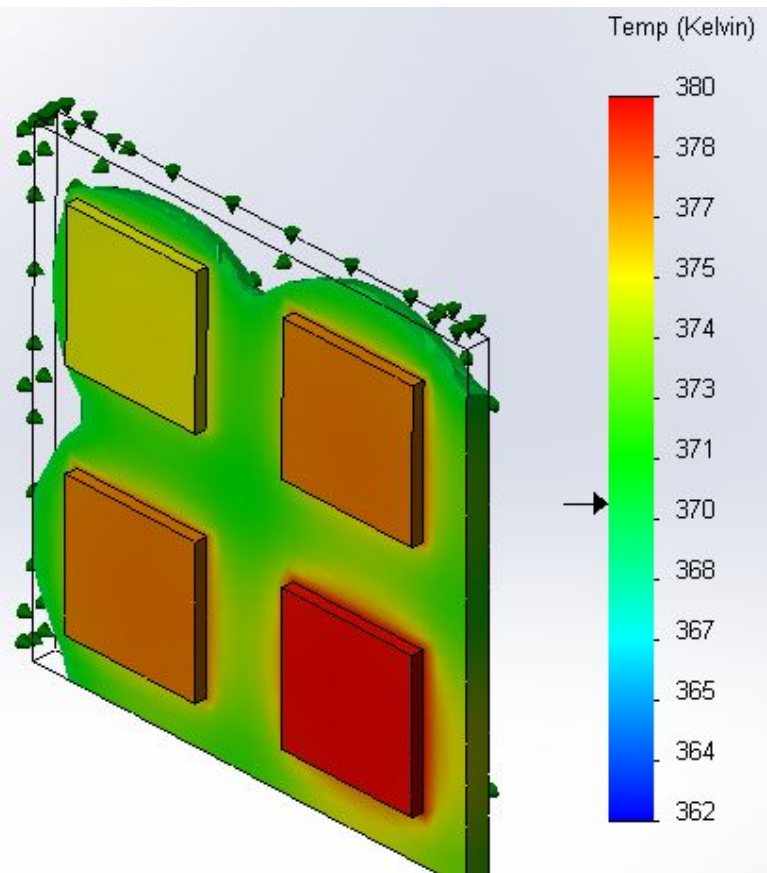
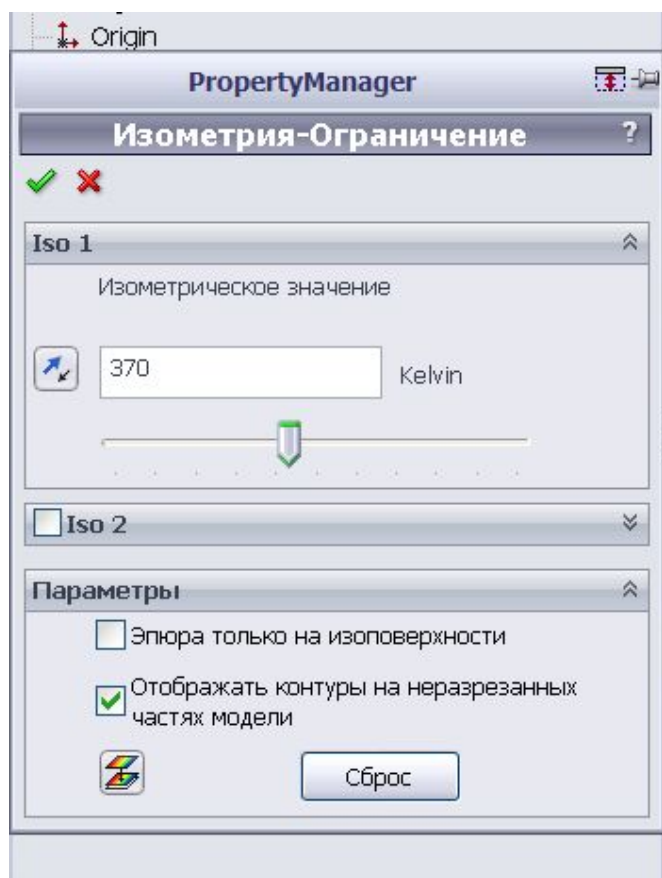
Узел:	4442
Местоположение X, Y, Z:	10,-10,0 mm
Значение:	3.730e+002 Kelvin

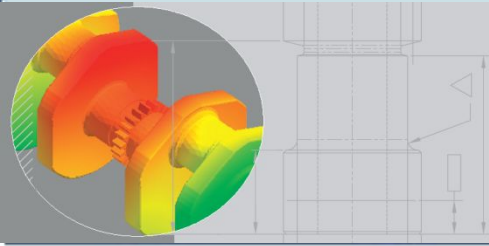




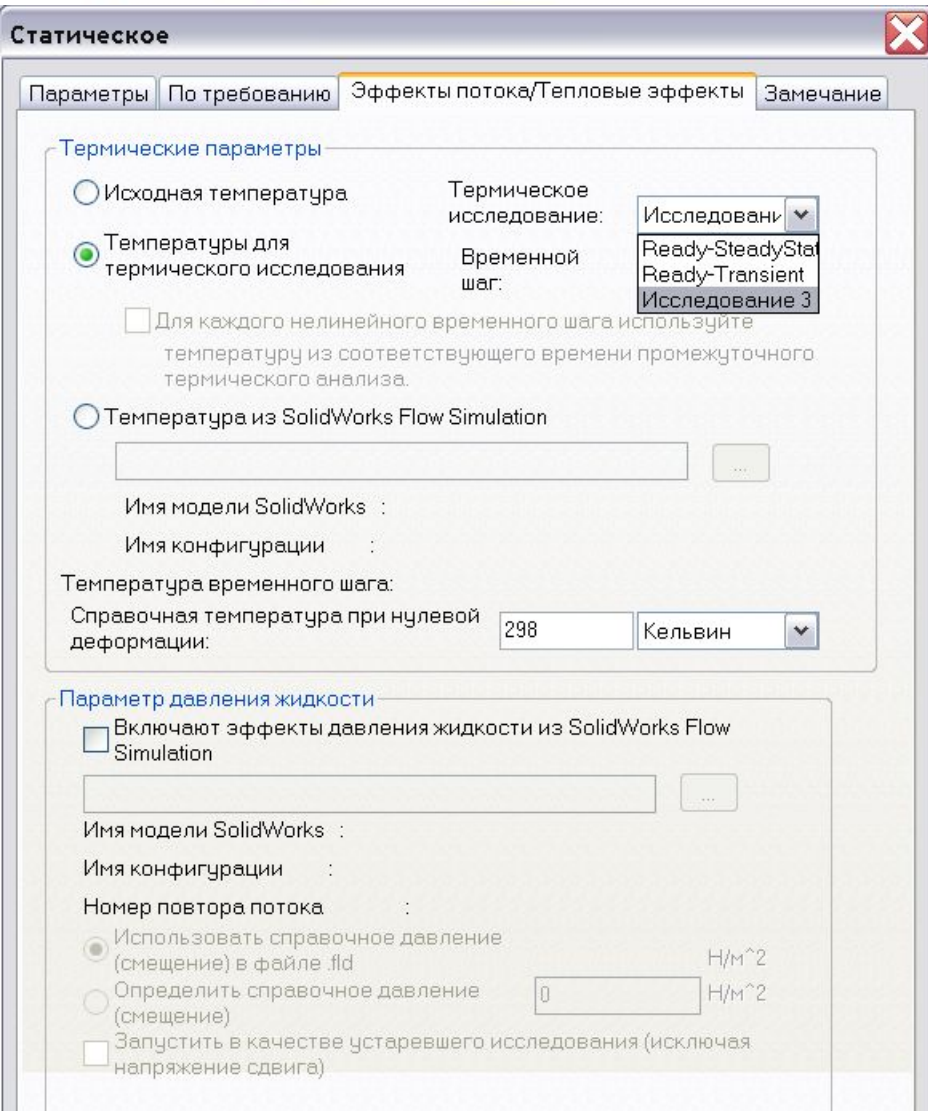
Основные этапы термического анализа

Анализ результатов термического анализа Изолинии температуры





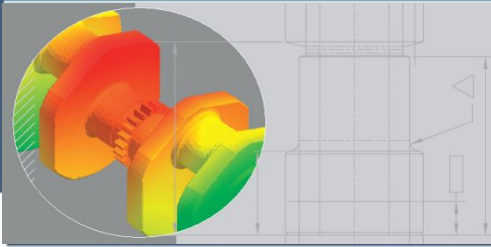
Анализ термических напряжений



Анализ термических напряжений относится к статическому анализу, который включает в себя воздействие температуры.

Изменения температуры могут повлечь за собой значительные, деформации изделия. При наличии помех свободному сжатию или расширению возникают напряжения, которые могут привести к необратимому изменению формы или разрушению изделия.

Для учета влияния термического влияния могут быть использованы результаты термического анализа при анализе потери устойчивости, статическом, частотном или нелинейном анализе.



Параметрическая оптимизация конструкций



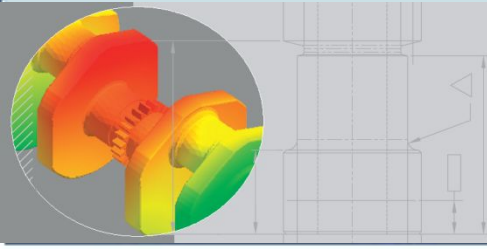
Проектирование – это многошаговый (итерационный) процесс, при котором конструкция постоянно меняется, пока не станет отвечать критериям качества, таким как прочность, себестоимость, эксплуатационные, эстетические характеристики и др.

Первичная конструкция (исходное проектное решение) может проходить через множество циклов проектирования и испытаний прежде, чем будет готова к серийному производству.

Обычно цикл проектирования состоит из следующих этапов:

- Создание модели в SolidWorks
- Изготовление опытного образца конструкции
- Производственные испытания опытного образца
- Оценка результатов производственных испытаний
- Изменение конструкции на основе результатов производственных испытаний.

Такие циклы проектирования являются дорогостоящими и длительными. Поэтому из-за ограничений по времени и стоимости большинство конструкторов принимают решение, не являющееся оптимальным.

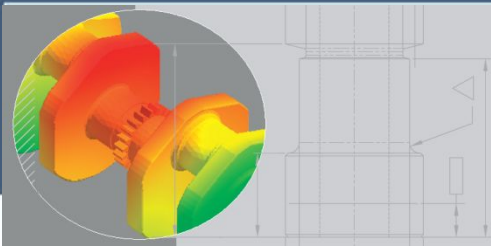


Параметрическая оптимизация конструкций

При решении задачи параметрической оптимизации необходимо создать, по крайней мере, одно начальное исследование. Начальные исследования являются основой сценария процесса оптимизации. На каждом этапе оптимизации программа выполняет эти исследования с измененными значениями оптимизируемых переменных. При разработке сценария оптимизации необходимо установить его критерий. В большинстве случаев критериями оптимизации являются минимизация объема или веса. Кроме того необходимо определить состав оптимизируемых параметров. Ими могут быть размеры поверхностей изделия, материалы и др.

Для ограничения области поиска оптимальных решений с помощью датчиков могут быть заданы ограничения по допускаемым напряжениям и деформациям в опасных сечениях.





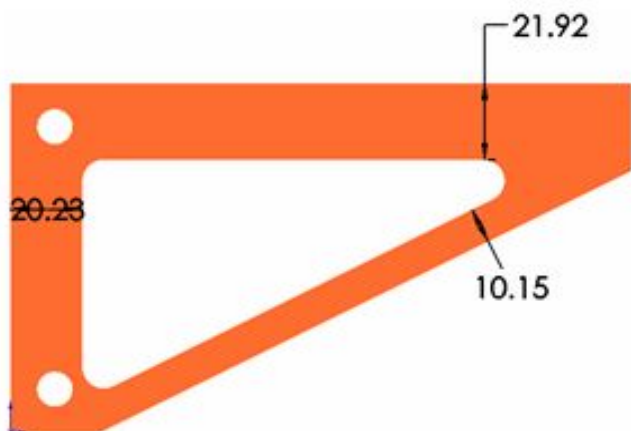
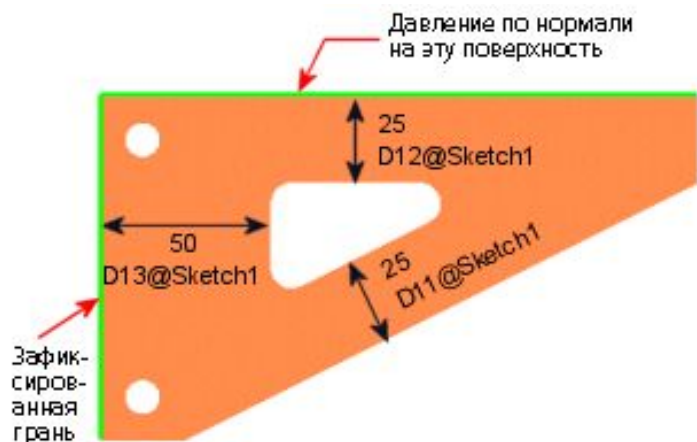
Параметрическая оптимизация конструкций

Критерий оптимизации – минимальный объем (MinVolume)

Оптимизируемый параметр	Min	Max
D11	10	25
D12	10	25
D13	20	50

Ограничения

Напряжение по Мизесу ≤ 300 МПа
Деформация $< 0,21$ мм.



	Iteration 4
DV1	10mm
DV2	10mm
DV3	35mm
Stress1	692.98 N/mm ²
Displacement1	0.81315mm
Frequency1	315.76682 Hz
Volume1	64022.28483mm ³

	Optimal
DV1	10.15358mm
DV2	21.91673mm
DV3	20.22934mm
Stress1	265 N/mm ²
Displacement1	0.20565mm
Frequency1	275.0127 Hz
Volume1	70744.73193mm ³