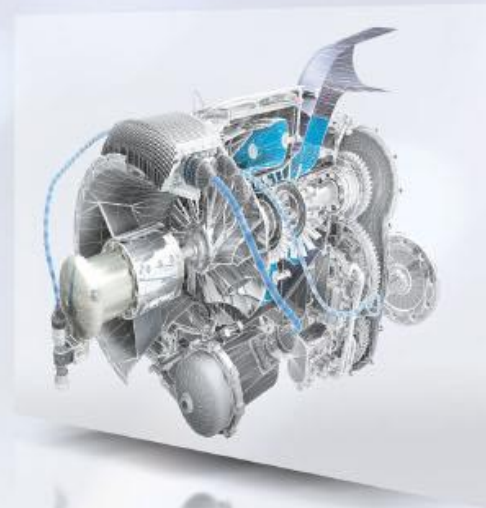


T-FLEX PLM

РОССИЙСКИЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС



T-FLEX Анализ

Руководство пользователя

Документация, содержащая информацию,
необходимую для установки и эксплуатации
программного обеспечения

MDM



PM



RM



CAD
CAE
VR



PDM



CAPP
CAM



...

30 лет

Мы
проектируем
будущее

АВТОРСКИЕ ПРАВА

© АО "Топ Системы", 1992 — 2025

Все авторские права защищены. Запрещено воспроизведение в любой форме любой части настоящего документа без разрешения от АО "Топ Системы".

АО "Топ Системы" не несёт ответственности за ошибки, которые могут быть в этом документе. Также не предполагается никаких обязательств за повреждения, обусловленные использованием содержащейся здесь информации.

Товарный знак T- FLEX является собственностью АО "Топ Системы".

ОГЛАВЛЕНИЕ

Авторские права	2
1. Общие положения.....	6
1.1. Введение	6
1.2. Математический аппарат	7
1.3. Системные требования	10
1.4. Структурная организация T-FLEX Анализ	11
1.5. Этапы анализа конструкций	11
2. Быстрое начало	12
2.1. Запуск T-FLEX Анализ.....	12
2.2. Подготовка объёмной твёрдотельной модели	13
2.3. Создание задачи.....	15
2.4. Задание материала	18
2.5. Задание граничных условий.....	20
2.6. Задание нагрузжений	22
2.7. Выполнение расчёта	24
2.8. Анализ результата расчёта	25
3. Препроцессинг: Расчётная модель	30
3.1. Управление задачами	30
3.1.1. Новая задача.....	31
3.1.1.1. Группировки элементов задачи	34
3.1.1.2. Параметры элементов задачи	36
3.1.1.2.1. Параметры балок	36
3.1.1.2.2. Параметры поверхностей.....	38
3.1.1.3. Диагностика материала	40
3.1.2. Настройки	41
3.2. Задание материала	44
3.2.1. Материал	45
3.2.1.1. Типы материалов	49
3.2.1.1.1. Изотропные материалы	49
3.2.1.1.2. Анизотропные материалы	50
3.2.1.2. Поведение материала	53
3.2.1.2.1. Линейно-упругий материал	54
3.2.1.2.2. Гиперупругий (Изотропный) материал	54
3.2.1.2.3. Пластичный материал	61
3.2.1.3. Составные материалы для моделирования композитов	66
3.2.1.3.1. Многослойный	68
3.2.1.3.2. Сэндвич-панели.....	71
3.2.1.3.3. Монослой	74
3.2.1.3.4. Свойства составного материала в задаче	76
3.2.2. Ориентация материала.....	78
3.2.3. Библиотека материалов	81
3.3. Управление сеткой	83
3.3.1. Сетка	90
3.3.1.1. Параметры сетки	92
3.3.1.2. Сценарии построения сетки.....	97
3.3.2. Анализ сетки	101
3.3.2.1. Анализ качества сетки	101
3.3.2.2. Выбор областей сетки	105
3.4. Условия и нагружения.....	108
3.4.1. Граничные условия	108
3.4.1.1. Полное закрепление	109
3.4.1.2. Частичное закрепление.....	111

3.4.1.3.	Симметрия.....	115
3.4.1.4.	Упругое основание	118
3.4.1.5.	Дистанционное перемещение	119
3.4.2.	Нагрузки.....	122
3.4.2.1.	Механические и инерционные нагрузки	122
3.4.2.1.1.	Сила	123
3.4.2.1.2.	Давление	128
3.4.2.1.3.	Вращение	134
3.4.2.1.4.	Ускорение	136
3.4.2.1.5.	Сила тяжести.....	138
3.4.2.1.6.	Цилиндрическая нагрузка	139
3.4.2.1.7.	Крутящий момент	142
3.4.2.1.8.	Осциллятор	144
3.4.2.1.9.	Дистанционная масса	146
3.4.2.1.10.	Дистанционная сила	149
3.4.2.1.11.	Дистанционный момент	151
3.4.2.1.12.	Начальная скорость	152
3.4.2.1.13.	Начальное ускорение	154
3.4.2.2.	Тепловые нагрузки	156
3.4.2.2.1.	Температура	156
3.4.2.2.2.	Начальная температура.....	158
3.4.2.2.3.	Тепловой поток	161
3.4.2.2.4.	Тепловая мощность	162
3.4.2.2.5.	Конвекция	164
3.4.2.2.6.	Излучение	166
3.4.3.	Связи	168
3.4.3.1.	Пружина.....	168
3.4.4.	Контакты	174
3.4.4.1.	Контакт.....	174
3.4.4.2.	Тепловой контакт	182
3.4.4.3.	Соединение балок	185
3.4.4.4.	Поиск контактов.....	189
3.4.4.5.	Параметры контакта по умолчанию	192
3.4.5.	Событие.....	192
3.4.6.	Использование графиков для задания параметров	195
3.5.	Сервисы препроцессинга.....	199
3.5.1.	Декорации	199
3.5.2.	Метки	200
3.5.3.	Расчётная геометрия.....	201
3.5.4.	Датчик	202
3.5.5.	Шаблон графика	204
3.5.6.	Отображение поверхностей.....	206
3.5.7.	Отображение балок	209
3.5.8.	Встраивание 3D узлов для приложения ГУ, нагрузок, датчиков на элементы задачи	210
3.5.9.	Экспорт данных	211
3.5.10.	Очистить задачу.....	212
3.5.11.	Копировать задачу	212
4.	Процессинг: Решение задачи	213
4.1.	Расчёт задачи	214
4.1.1.	Настройка результатов расчёта	217
4.1.2.	Окно «Фоновые процессы».....	218
4.1.3.	Описание задачи	219
4.1.4.	Незакрепленные элементы.....	220
4.2.	Статические задачи	222

4.2.1.	Статическая прочность.....	222
4.2.1.1.	Этапы	223
4.2.1.2.	Параметры расчёта.....	229
4.2.1.3.	Оценка результатов	238
4.2.2.	Устойчивость.....	240
4.2.2.1.	Этапы	241
4.2.2.2.	Параметры расчёта.....	243
4.2.2.3.	Оценка результатов	247
4.2.3.	Усталостная прочность	248
4.2.3.1.	Этапы	248
4.2.3.2.	Оценка результатов	254
4.2.3.3.	Однособытийный расчёт.....	256
4.2.3.4.	Многособытийный расчёт.....	265
4.3.	Динамические задачи	269
4.3.1.	Собственные частоты.....	269
4.3.1.1.	Этапы	272
4.3.1.2.	Параметры расчёта.....	274
4.3.2.	Вынужденные колебания.....	277
4.3.2.1.	Этапы	278
4.3.2.2.	Параметры расчёта.....	279
4.3.2.3.	Оценка результатов	281
4.3.3.	Динамические задачи.....	284
4.3.3.1.	Этапы	288
4.3.3.2.	Параметры расчёта.....	290
4.3.3.3.	Оценка результатов	294
4.3.3.4.	Линейная динамическая задача	295
4.3.3.5.	Динамические нестационарные процессы	300
4.4.	Тепловые задачи	306
4.4.1.	Тепловой анализ	307
4.4.1.1.	Этапы	308
4.4.1.2.	Параметры расчёта.....	310
4.4.1.3.	Установившиеся тепловые процессы.....	313
4.4.1.4.	Нестационарные тепловые процессы.....	316
5.	Постпроцессинг: Анализ результатов расчёта	318
5.1.	Открытие результатов	319
5.2.	Работа с результатами	326
5.2.1.	Внешнее хранение результатов.....	327
5.2.2.	Объёмная термодиформация	329
5.2.3.	Тело по сетке	330
5.3.	Параметры результата	331
5.4.	Настройка цветовой шкалы	341
5.5.	Локальный результат	344
5.6.	Сравнение результатов	348
5.7.	Использование графиков для анализа результатов.....	349
5.8.	Отчёт	351
5.9.	Сервисы постпроцессинга	354
5.9.1.	Сетка	355
5.9.2.	Отображение балок	355
5.9.3.	Исходный контур.....	357
5.9.4.	Целостный результат	358
5.9.5.	Экстремумы	359
5.9.6.	Декорации	360
5.9.7.	Деформированное состояние	361

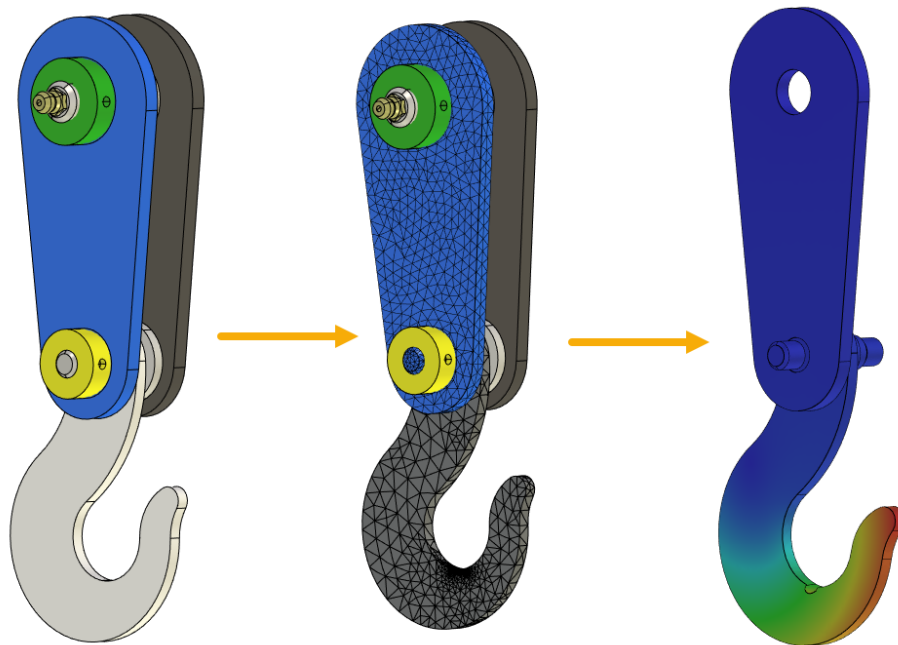
1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. ВВЕДЕНИЕ

T-FLEX Анализ – это интегрированная с T-FLEX CAD среда конечно-элементных расчётов. Используя T-FLEX Анализ, пользователь системы T-FLEX CAD имеет возможность осуществлять математическое моделирование распространённых физических явлений и решать важные практические задачи, возникающие в повседневной практике проектирования. Все расчёты ведутся с применением метода конечных элементов (МКЭ). При этом между трёхмерной моделью изделия и расчётной конечно-элементной моделью поддерживается ассоциативная связь. Параметрические изменения исходной твердотельной модели автоматически переносятся на сеточную конечно-элементную модель.

В настоящий момент доступны следующие конфигурации:

- Статического анализа
- Анализа усталости
- Динамического анализа
- Частотного анализа
- Анализ вынужденных колебаний
- Теплового анализа



- **Статический анализ**

Основная цель статического прочностного анализа конструкций заключается в оценке напряжённого состояния конструкции, находящейся под действием не изменяющихся во времени (статических) силовых воздействий. Основными результатами статических расчётов являются:

- поля перемещений конструкции в расчётных точках конечно-элементной сетки;

- поля относительных деформаций;
- поля компонентов напряжений;
- энергия деформаций;
- узловые усилия, реакции;
- поля распределения коэффициента запаса по напряжениям по объёму конструкции.

- **Анализ усталости**

Помогает предотвратить разрушение и обеспечить надёжность и безопасность конструкций. Усталость материала возникает из-за постепенного накопления повреждений в материале под действием переменных напряжений. Каждый цикл колебания напряжений в некоторой степени ослабляет объект, что приводит к образованию трещины, ее развитию и окончательному разрушению изделия. Исследования усталости вычисляют срок службы объекта, основанный на событиях усталости материалов и кривых S-N.

- **Динамический анализ**

В динамическом анализе механическая система рассматривается под действием изменяющихся во времени внешних воздействий - приложенных к системе сил, давлений, ускорений и т.п. В результате решения динамической задачи мы получаем в основном те же самые результаты расчёта, как и в статическом анализе (перемещения, напряжения, коэффициент запаса), но каждый результат представлен для определенного момента времени, соответствующего заданному временному интервалу и конкретному временному шагу.

- **Частотный анализ**

Определение собственных (резонансных) частот колебаний конструкций и соответствующих им формы колебания.

Определение спектральных свойств конструкции помогает избежать резонансов в рабочем диапазоне частот от внешних воздействий на стадии проектирования. Это позволяет внести в конструкцию изменения, которые изменят спектр собственных частот.

- **Анализ вынужденных колебаний**

Анализ вынужденных колебаний проводится для предсказания поведения конструкции под действием внешних воздействий, изменяющихся по гармоническому закону.

Целью анализа вынужденных колебаний является получение зависимости отклика системы от частоты вынуждающих воздействий. Результатами расчета являются амплитуды перемещений, виброускорения и виброперегрузки на заданной вынуждающей частоте.

- **Тепловой анализ**

Предназначен для решения задач теплопроводности и теплопередачи. Целью осуществления тепловых расчётов обычно является определение температурных полей, а также тепловых потоков в объёме изделия.

1.2. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ

В процессе машиностроительного проектирования часто возникает необходимость оценки наиболее значимых физико-механических свойств деталей и узлов, или изделия в целом. Например, при проектировании необходимо оценить прочность деталей при заданных нагружениях или максимальные деформации корпуса изделия. Длительное время единственным средством оценки физико-механических свойств изделий были оценочные рас-

чёты с использованием приближенных аналитических или полуэмпирических методик, приводимых в отраслевых справочных руководствах. Точность подобных методик применительно к реальным объектам проектирования обычно не высока. Поэтому в конструкцию изделия закладываются значительные «коэффициенты запаса» (например, по прочности), снижающие риск принятия ошибочного проектного решения.

Появление компьютерной техники и развитие вычислительной математики привели к серьезным изменениям традиционных подходов к инженерным расчётам. Начиная с середины 60-х годов 20 века лидирующим методом численного решения самых разных физических задач становится **метод конечных элементов (МКЭ)**. Особенности МКЭ, обеспечившими ему ведущее положение в прикладной вычислительной математике, стали присущие методу:

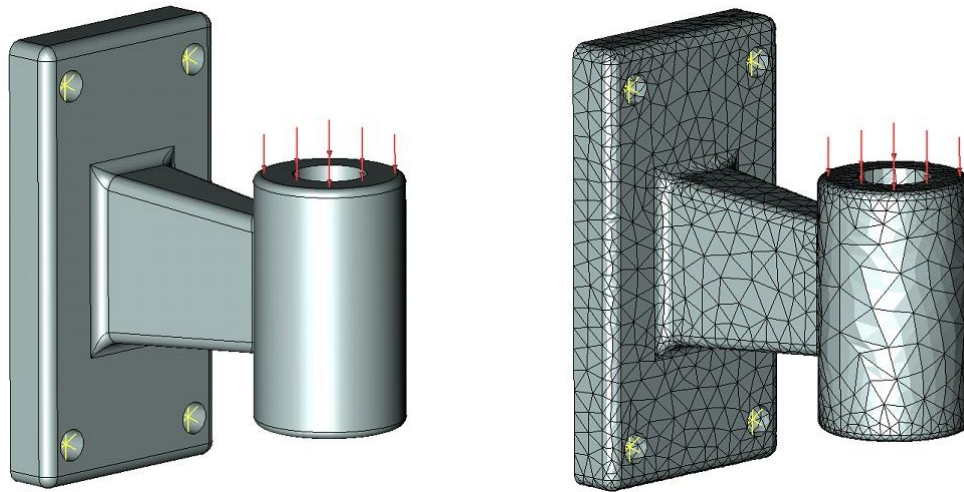
- универсальность – пригоден для решения самых различных задач математической физики (механика деформируемого тела, теплопроводность, задачи электродинамики);
- хорошая алгоритмируемость – возможность разработки программных комплексов, охватывающих широкий круг прикладных задач;
- хорошая численная устойчивость МКЭ алгоритмов.

Развитие персональных компьютеров и начало их широкого использования в проектных целях привели к ускоренному развитию и появлению прикладных систем конечно-элементного анализа, которые не требуют от пользователя глубоких знаний теории МКЭ, исключают трудоёмкие операции ручной подготовки исходных данных и предоставляют прекрасные возможности по обработке результатов математического моделирования.

T-FLEX Анализ относится к современным системам конечно-элементного анализа, ориентированным на широкий круг пользователей, которым по роду их деятельности приходится сталкиваться с необходимостью оценки поведения изделий в условиях различных физических воздействий. T-FLEX Анализ ориентирован на специалиста обладающего не глубокими знаниями в области конечно-элементного анализа и не требует от пользователя специфических знаний в области математического моделирования для эффективного использования системы. Тем не менее, корректность получаемых результатов математического моделирования и их правильная оценка в значительной степени определяются квалифицированным подходом пользователя к формулировке решаемых с помощью T-FLEX Анализа физических задач.

Суть метода конечных элементов заключается в замене исходной пространственной конструкции сложной формы на дискретную математическую модель, должным образом отражающую физическую сущность и свойства исходного изделия. Важнейшим элементом этой модели является **конечно-элементная дискретизация** изделия - построение совокупности элементарных объёмов заданной формы (т.н. **конечных элементов**, КЭ) объединённых в единую систему (т.н. **конечно-элементную сетку**).

T-FLEX Анализ ориентирован на решение физических задач в 3D, 2D, 1D постановке. Для математической аппроксимации изделия используется её эквивалентная замена сеткой из тетраэдральных / пластинчатых (оболочечных) треугольных/ балочных элементов. Тетраэдральный конечный элемент удобен для автоматической генерации расчётной сетки, так как с помощью тетраэдра можно с очень большой точностью аппроксимировать сколь угодно сложную форму изделия.



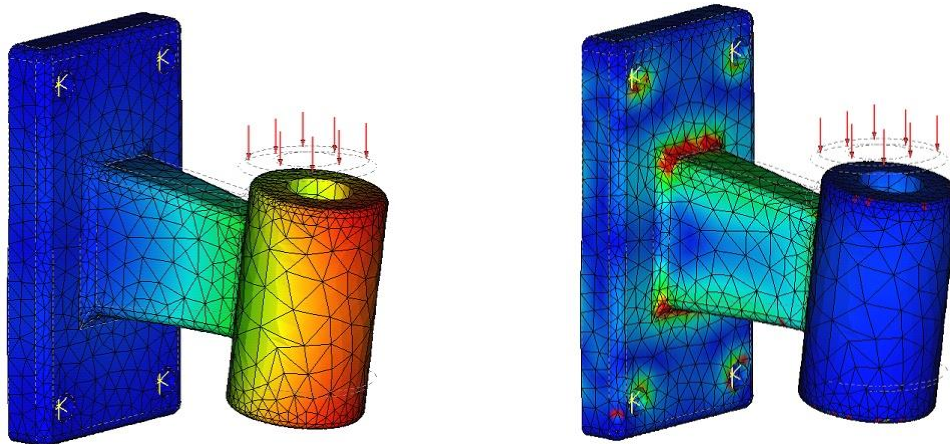
Исходная конструкция и её конечно-элементная дискретизация

Конструкция, представляющая собой распределенную систему сложной геометрической формы, представляется в виде совокупности конечных элементов. Конечные элементы, аппроксимирующие исходную конструкцию, считаются связанными между собой в граничных точках – узлах. В каждом узле вводится по 3 (для тетраэдральных КЭ) поступательных степени свободы (для задач механики) и по 6 поступательных и вращательных степени свободы (для пластинчатых и балочных КЭ).

Действующие на конструкцию внешние нагрузки приводятся к эквивалентным силам, прикладываемым в узлах конечных элементов. Ограничения на перемещение конструкции (закрепления) также переносятся на конечные элементы, которыми моделируется исходный объект. Поскольку каждый КЭ имеет заранее определенную форму и известны его геометрические характеристики и характеристики материала, для каждого КЭ, которыми моделируется конструкция, можно записать систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), определяющих смещение узлов КЭ под действием приложенных в эти узлы сил.

Записывая систему уравнений для каждого конечного элемента, аппроксимирующего исходную физическую систему, рассматриваем их совместно и получаем систему уравнений для полной конструкции. Порядок этой системы уравнений равен произведению количества подвижных узлов конструкции на число введенных степеней свободы в одном узле. В T-FLEX Анализ обычно это соответствует десяткам или сотням тысяч алгебраических уравнений.

Формируя систему уравнений для всей конструкции и решая её, получаем значения искомой физической величины (например, перемещений) в узлах конечно-элементной сетки, а также дополнительные физические величины, например, напряжения. Эти значения будут приближенными (с точки зрения теоретически возможного «точного» решения соответствующего дифференциального уравнения математической физики), но погрешность решения может быть очень небольшой – доли процента на тестовых задачах, имеющих «точное» аналитическое решение. Погрешность получаемого в результате конечно-элементной аппроксимации решения обычно гладко уменьшается с увеличением степени дискретизации моделируемой системы. Другими словами, чем большее количество КЭ участвует в дискретизации (или чем меньше относительные размеры КЭ), тем точнее получаемое решение. Естественно, что более плотное КЭ разбиение требует более значительных вычислительных затрат.



Результаты конечно-элементного моделирования (перемещения и напряжения соответственно)

Описанный алгоритм конечно-элементного моделирования применим для решения разных задач, с которыми может столкнуться современный инженер – теплопроводности, электродинамики и т.п. Благодаря перечисленным выше достоинствам МКЭ стал лидирующим методом компьютерного моделирования физических задач и, фактически, ассоциируется с целой отраслью современной индустрии программного обеспечения, известной под аббревиатурой CAE (Computer Aided Design).

1.3. СИСТЕМНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

Математическое моделирование физических явлений относится к ресурсоёмким задачам и требует серьёзных вычислительных затрат. Поэтому, для эффективного использования системы конечно-элементного моделирования рекомендуется использовать наиболее производительную вычислительную технику, доступную пользователю. Кроме этого повышения размерности решаемых задач можно достигнуть за счет использования 64-х разрядных операционных систем.

Пользователю доступны два варианта T-FLEX Анализа с точки зрения разрядности используемой операционной системы Windows:

- 1) T-FLEX Анализ для Windows 32-bit. Особенностью 32-х разрядных операционных систем является наличие «физического» предела на максимальный объем адресуемой информации (около 2 Гбайт), что ограничивает возможности по расчёту систем с большим количеством конечных элементов.
- 2) T-FLEX Анализ для Windows 64-bit. Данная система работает на процессорах с поддержкой инструкций 64-bit. Операционные системы с разрядностью 64-bit позволяют адресовать значительно большие объёмы информации и позволяют решать задачи большой размерности.

Параметры вычислительной техники для работы с T-FLEX Анализом

Минимальные	
Операционная система	Windows 7 x64 (с Пакетом обновлений 1)
Процессор	Intel или AMD с поддержкой SSE3

Объем оперативной памяти	2 Гб
Объем свободного дискового пространства	3 Гб
Видеокарта	видеокарта с поддержкой OpenGL 3.3 и выше
Рекомендуемые	
Операционная система	Windows 8.1 x64, 10 x64
Процессор	Core i7 или аналог
Объем оперативной памяти	16 Гб и больше
Видеокарта	высокопроизводительная видеокарта NVIDIA или AMD с памятью 1Гб и выше и поддержкой OpenGL 4.2 и выше

Не рекомендуется использовать для работы встроенные видеокарты.

1.4. СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ T-FLEX АНАЛИЗ

Структурно T-FLEX Анализ организован по дискретному принципу, что позволяет пользователю гибко подойти к комплектации рабочего места расчётчика. Стандартная поставка системы включает следующие части:

- препроцессинг – программная часть для подготовки расчётной модели;
- процессинг – расчётная часть, где происходит настройка результатов расчёта и выполняется анализ.
- постпроцессинг– программная часть анализа результатов.

1.5. ЭТАПЫ АНАЛИЗА КОНСТРУКЦИЙ

Любой вид анализа осуществляется в несколько этапов. Перечислим необходимые для выполнения анализа шаги. Для осуществления расчётов необходимо:

1. Построить трёхмерную модель изделия;
2. Создать «Новую задачу». Задача создаётся для одного или нескольких тел;
3. Задать материал модели;
4. Сгенерировать конечно-элементную сетку;
5. Наложить граничные условия, определяющие сущность физического явления, подлежащего анализу;
6. Выполнить расчёт;
7. Проанализировать результаты.

Перечисленные этапы проведения анализа справедливы для большинства типов задач, реализованных в системе «T-FLEX Анализ». Отличие между этапами моделирования для разных типов задач, как правило, состоит в граничных условиях, которые зависят от вида расчёта. Например, в статическом анализе и устойчивости роль граничных условий выполняют

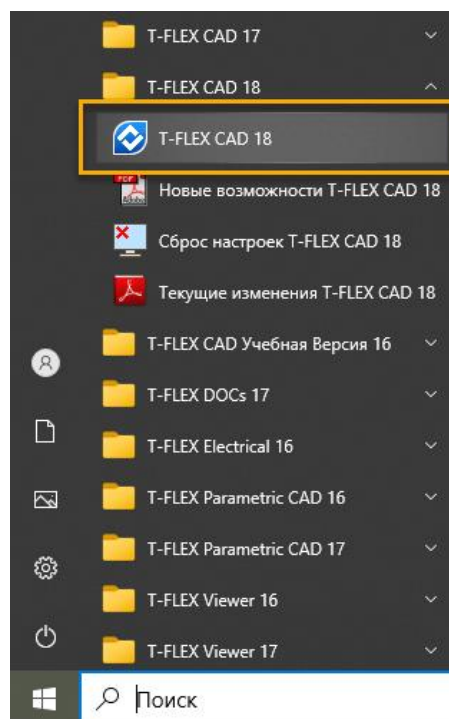
приложенные к изделию силовые нагрузки и закрепления, в частотном – чаще используются закрепления, а в тепловом анализе – температурные и тепловые нагрузки.

2. БЫСТРОЕ НАЧАЛО

2.1. ЗАПУСК T-FLEX АНАЛИЗ

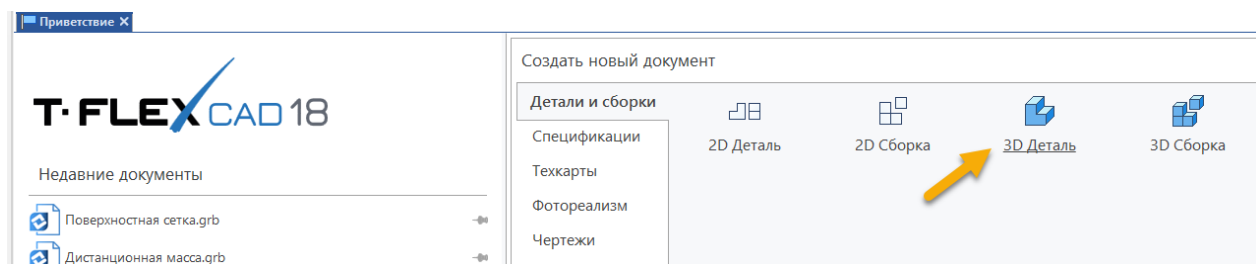
Для запуска T-FLEX Анализ необходимо открыть уже существующий 3D документ или создать новый. Предварительно необходимо сделать:

1) Запустить CAD-систему T-FLEX CAD 18:

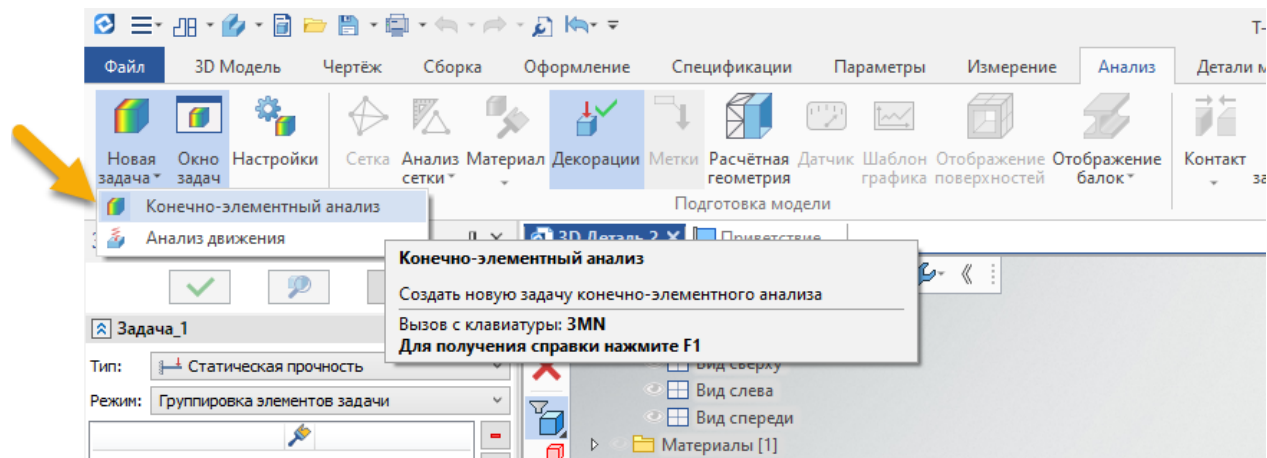


2) Создать новый документ

В окне «Приветствие» выбрать прототип детали:

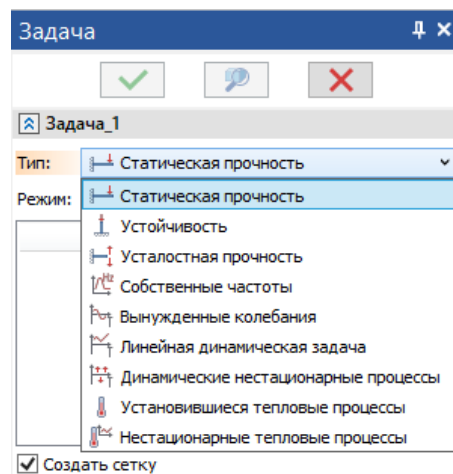


3) Открыть в Ленте закладку «Анализ» и создать задачу «Конечно-элементный анализ»



4) Убедиться, что доступен нужный для расчёта тип задачи

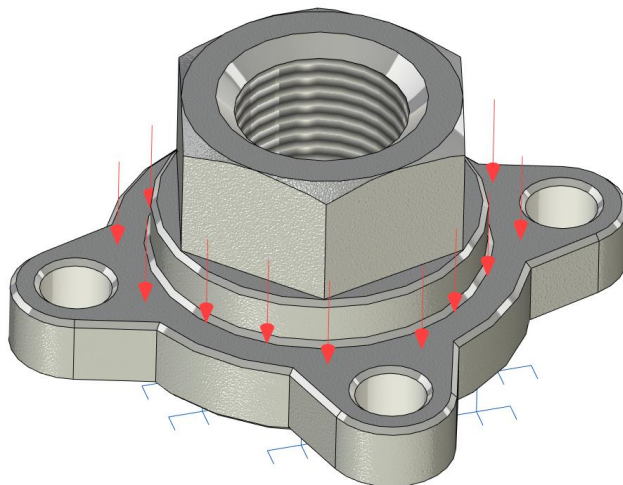
В момент создания задачи будет активирована команда для настройки задачи. Нужно развернуть выпадающий список «Тип» и убедиться, что в нём присутствуют все или некоторые из указанных на рисунке типов задачи:



Если в данном списке только один тип задачи под названием «Экспресс-расчёт» - значит, отсутствует лицензия на продукт T-FLEX Анализ.

2.2. ПОДГОТОВКА ОБЪЁМНОЙ ТВЁРДОТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Рассмотрим общий алгоритм использования системы T-FLEX Анализ на примере статического прочностного расчёта. Пусть необходимо осуществить анализ напряжённого состояния конструкции «Фланец». На одну из граней фланца приложена распределенная нагрузка, а опорная нижняя поверхность закреплена неподвижно.



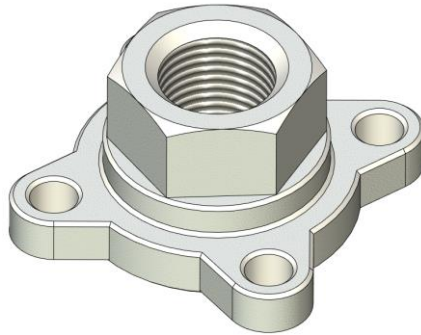
Основные темы в этом разделе:

- [Подготовка объёмной твёрдотельной модели](#)
- [Создание задачи](#)
- [Назначение материала](#)
- [Задание закреплений](#)
- [Задание нагрузений](#)
- [Выполнение расчёта](#)
- [Анализ результата расчёта](#)

Для выполнения анализа необходимо иметь трёхмерную твердотельную модель изделия. Модель может быть построена пользователем в среде трёхмерного моделирования T-FLEX CAD. Это может быть «рабочая» модель, содержащая проекции и оформленные рабочие чертежи, участвующая в составе сборки, или используемая для расчёта траекторий ЧПУ обработки.

Для целей расчёта бывает полезно заранее получить специально оптимизированный вариант модели (оптимизированную, параметрически зависимую копию оригинала). Например, можно из исходной модели удалить несущественные в расчёте мелкие части (к примеру, не играющие роли маленькие отверстия). В этом случае расчёт будет выполняться быстрее, легче будет получить конечно-элементную сетку. Для корректного приложения нагрузок иногда требуется на участки больших граней «врезать» специальные грани-площадки.

Используя команду T-FLEX CAD «Файл | Импортировать», для анализа можно загрузить в систему модель, созданную в другой системе объёмного моделирования.

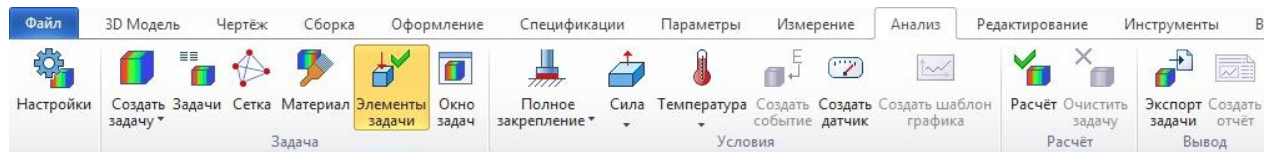


Исходная конструкция

2.3. СОЗДАНИЕ ЗАДАЧИ

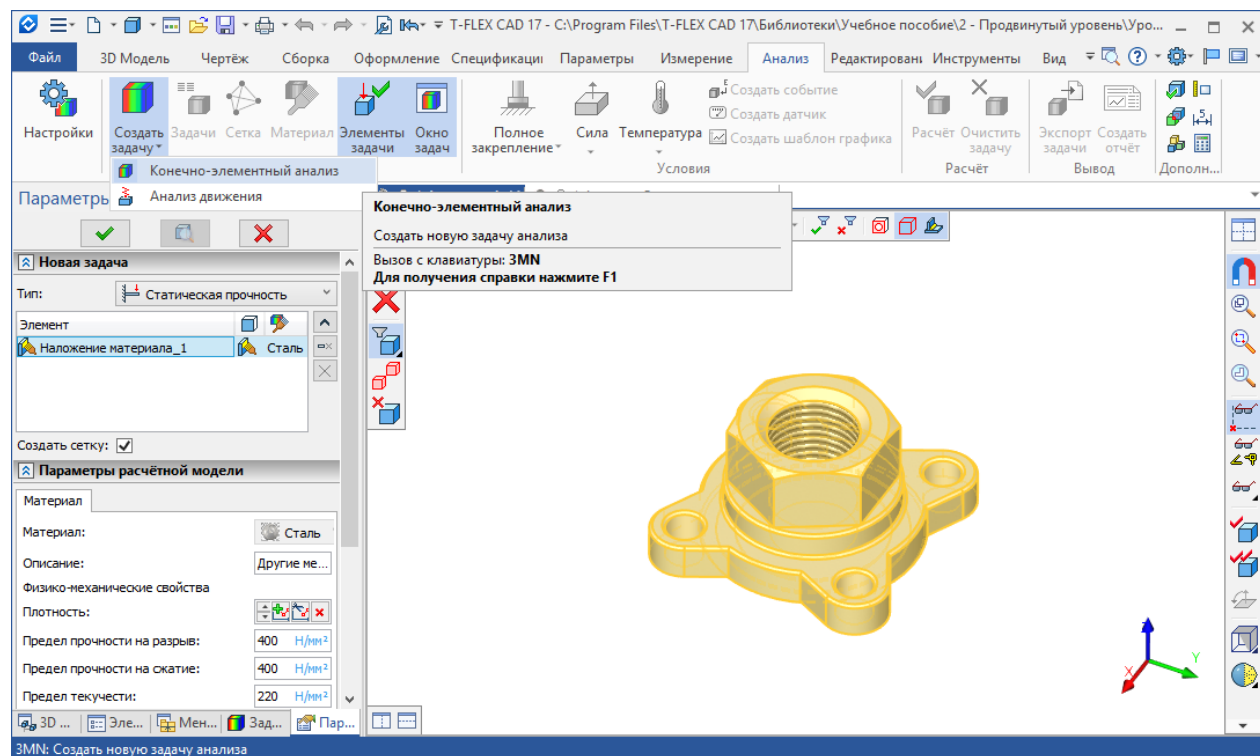
После того, как трёхмерная модель изделия была построена в T-FLEX CAD или импортирована в систему, можно приступать к подготовке расчётной модели.

Любой вид расчёта в T-FLEX Анализе начинается с создания «Новой задачи» с помощью команды **Новая задача** на вкладке **Анализ**. На этой вкладке расположены все команды необходимые для проведения анализа.



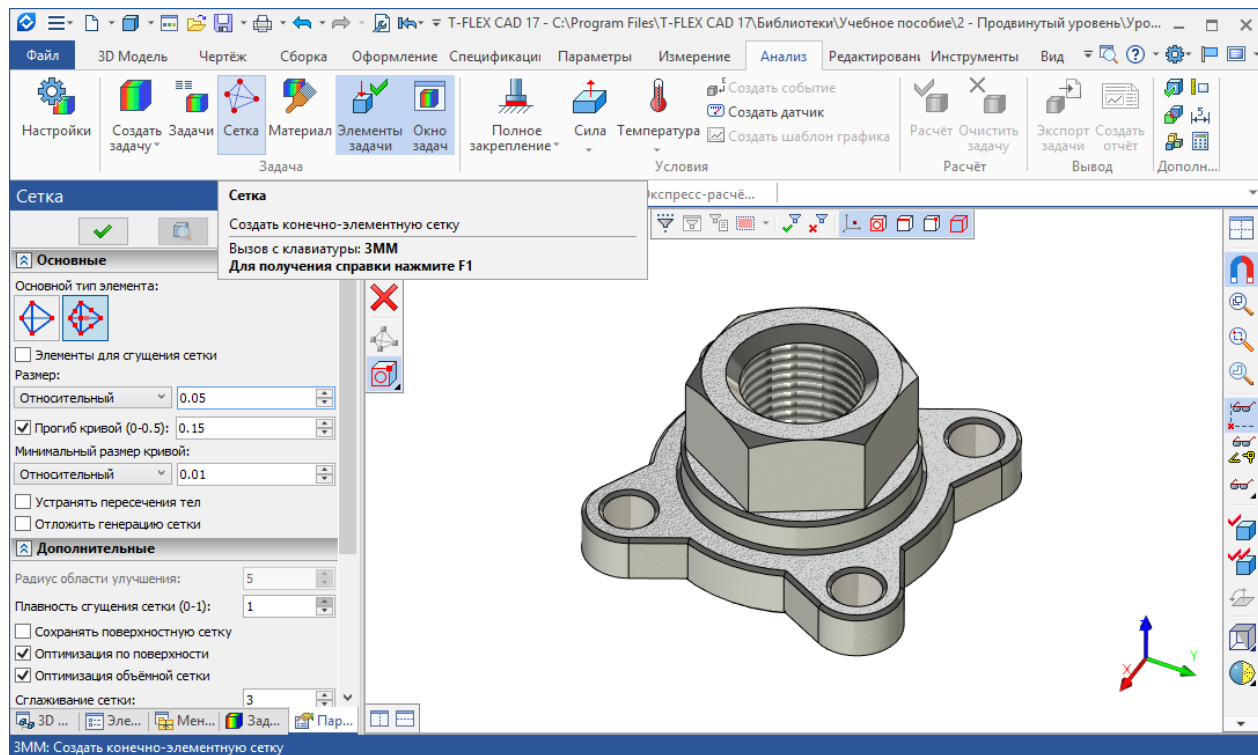
При создании задачи пользователь определяет её тип (**Статическая прочность**, **Устойчивость**, **Усталостная прочность**, **Экспресс-расчёт**, **Собственные частоты**, **Вынужденные колебания**, **Линейная динамическая задача**, **Динамические нестационарные процессы**, **Установившиеся тепловые процессы**, **Нестационарные тепловые процессы**). Кроме того, если в сцене присутствует более одного твёрдого тела, необходимо указать, для какого из тел сцены мы создаём задачу.

Создадим для нашей модельной детали задачу типа **Статическая прочность**.



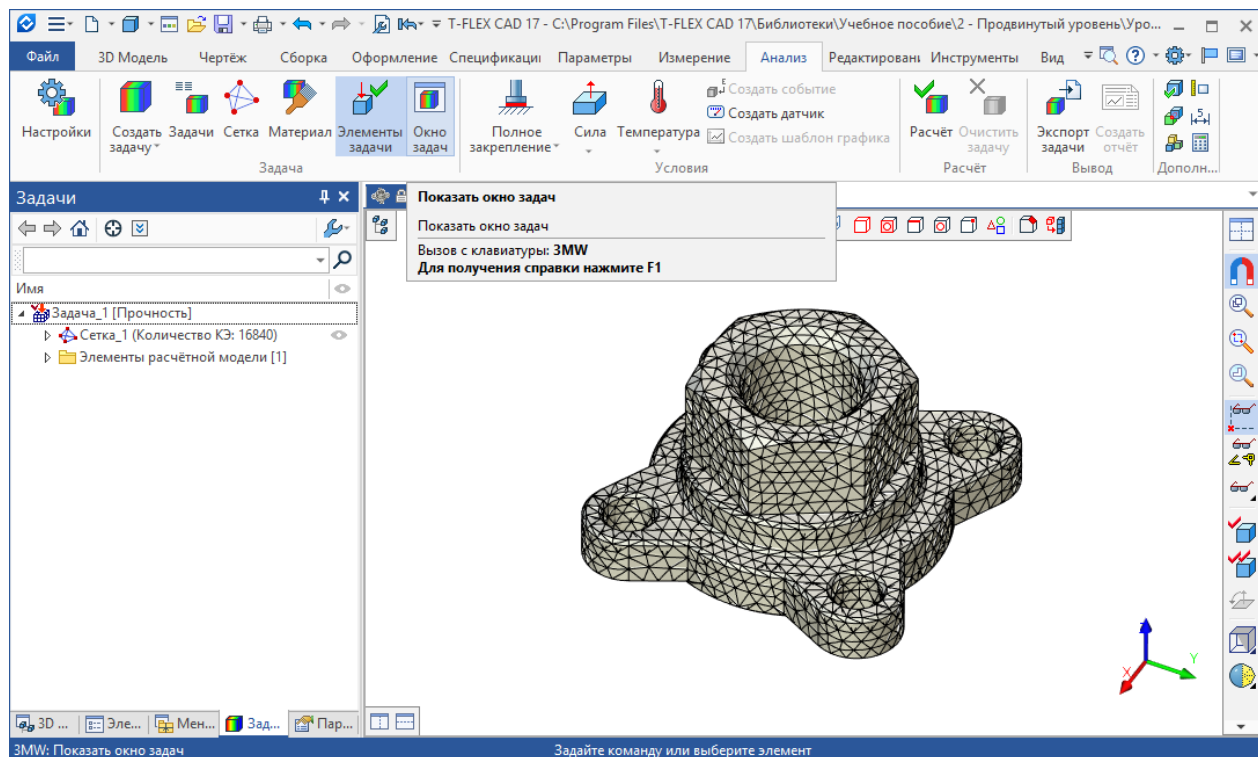
Создание задачи конечно-элементного анализа

По умолчанию, при создании новой задачи включен режим автоматического запуска команды **Анализ > Сетка** применительно к вновь созданной задаче. Поэтому, после успешного создания задачи появится диалог управления настройками генерации конечно-элементной сетки, по завершении которого мы получим сеточную модель из тетраэдров, аппроксимирующую твердотельную модель изделия.

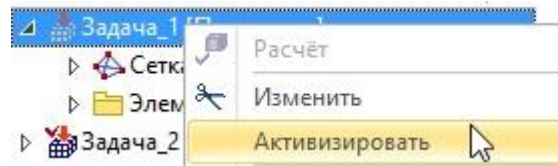


Команда **Анализ > Показать окно задач** открывает окно задач, в котором в виде дерева отображаются существующие в данном документе задачи и их элементы.

Только что созданная задача является активной. Вновь создаваемые элементы задач и выполняемые команды **Анализа** будут относиться к активной задаче.

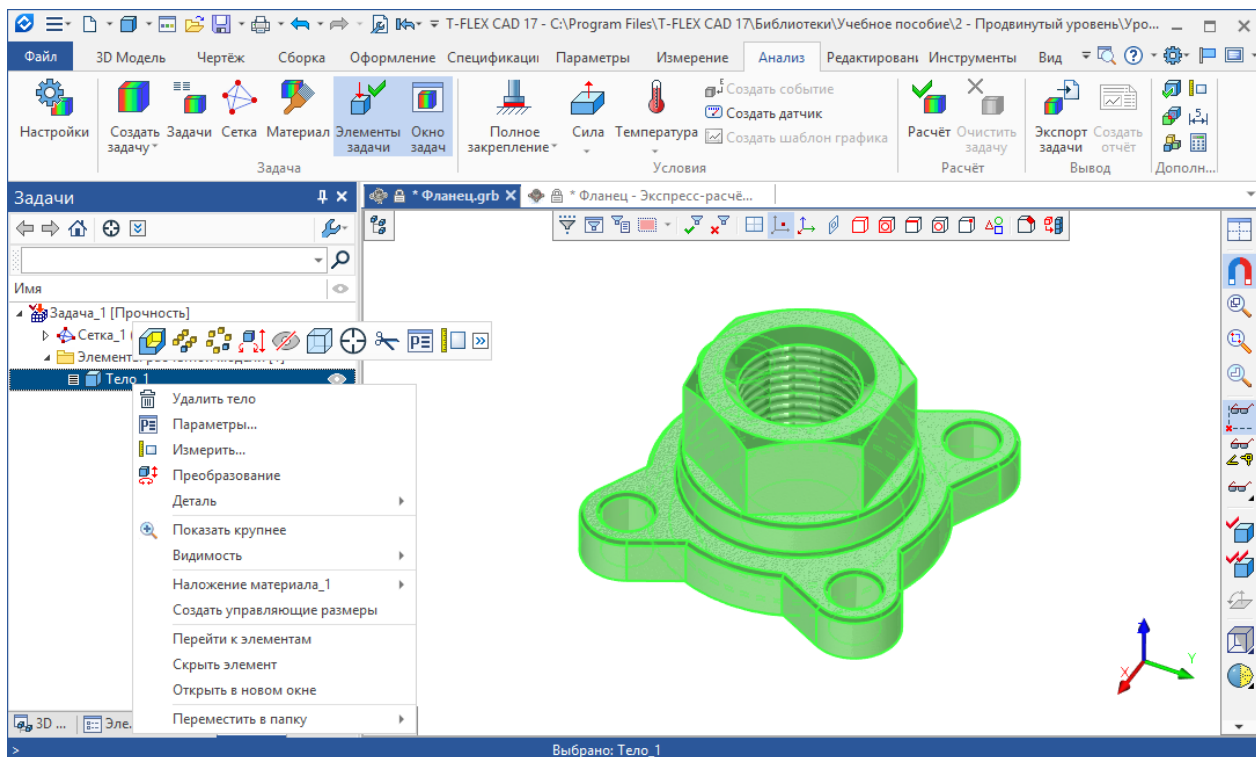


Если в документе много разных задач, то активной может быть только одна. Переключение между активными задачами осуществляется через контекстное меню, вызванное  по имени задачи. Для неактивных задач доступна команда «активизировать».



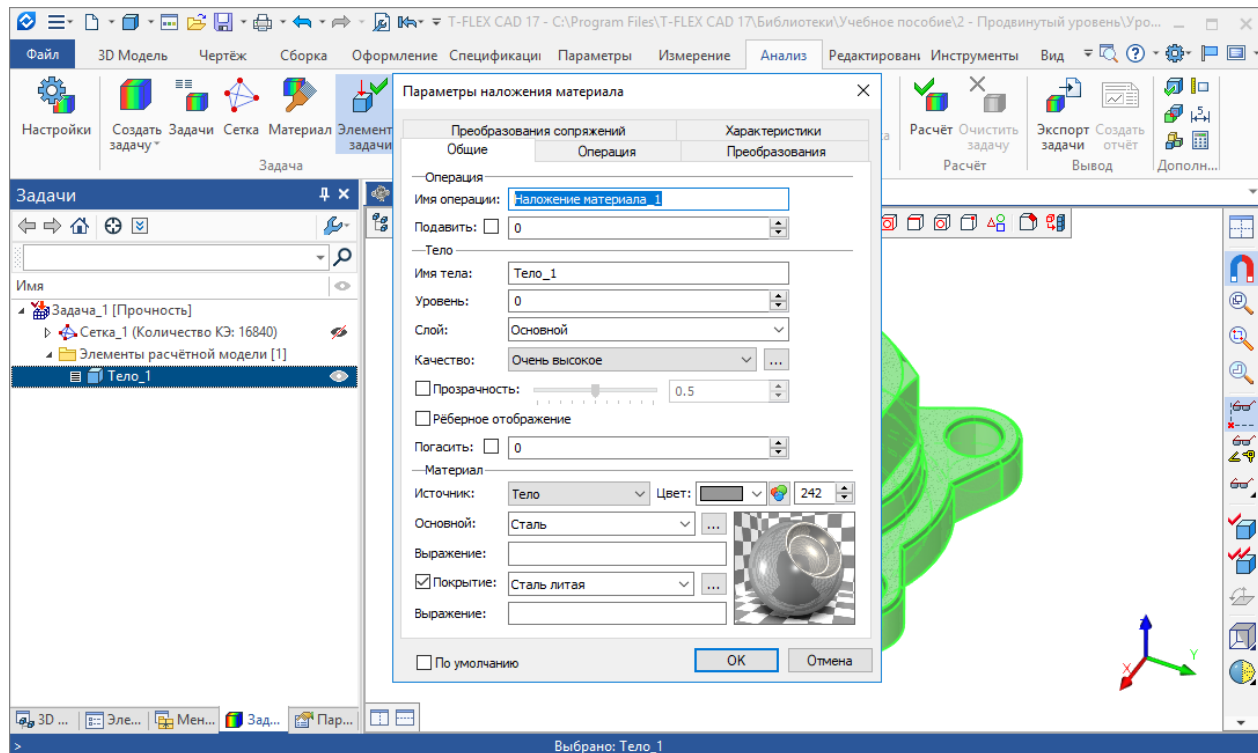
2.4. ЗАДАНИЕ МАТЕРИАЛА

Для того чтобы осуществлять какие-либо расчёты с твердотельной моделью детали необходимо определить материал, из которого она изготовлена. В T-FLEX Анализ есть две возможности задания материала для выполнения анализа. По умолчанию, в расчёте используются характеристики материала «с тела/с операции». Назначение материала для трёхмерной модели осуществляется в окне параметров операции. Для проверки или изменения материала в этом случае нужно вызвать окно параметров операции из контекстного меню по  на трёхмерном теле, созданном операцией или по имени операции в окне задач.

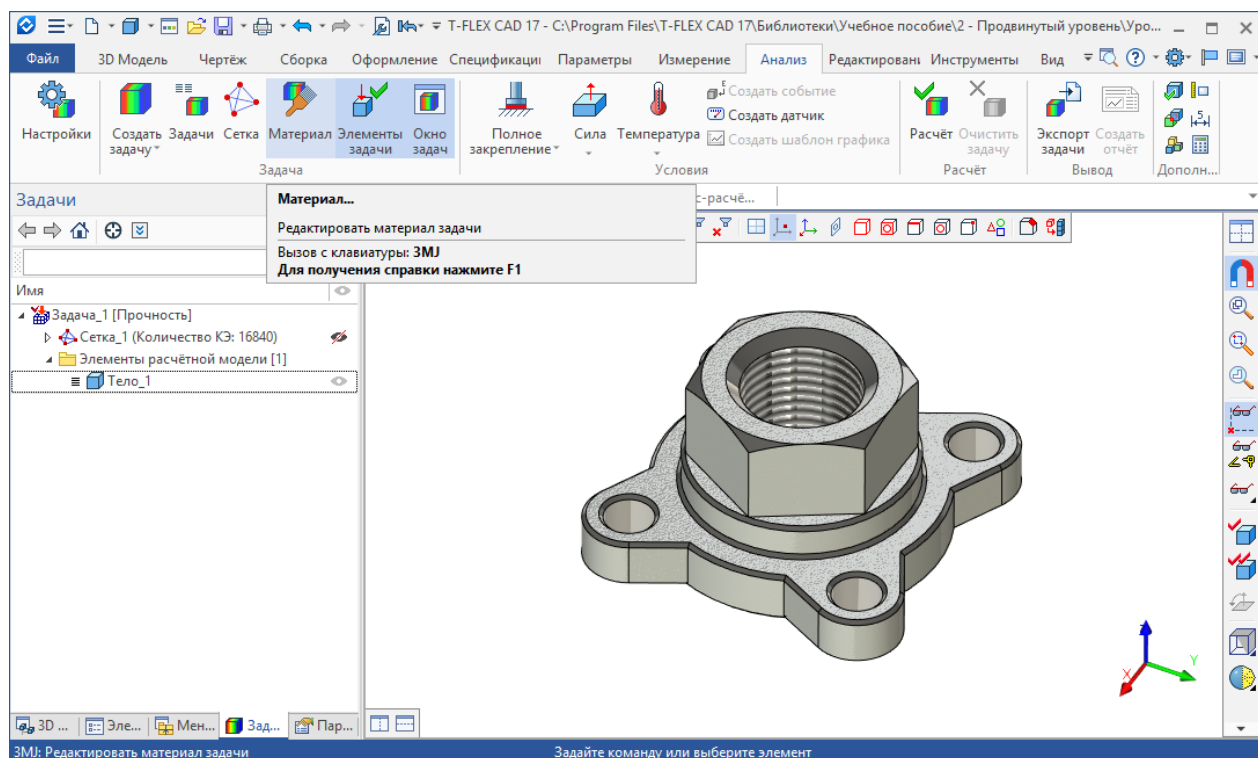


В диалоге параметров операции можно выбрать материал из стандартной библиотеки материалов T-FLEX CAD. При необходимости пользователь может пополнять стандартную базу материалов T-FLEX CAD своими материалами и изменять характеристики любых материалов из этой библиотеки.

Более подробную информацию по работе с материалами T-FLEX CAD можно прочесть в справке по T-FLEX CAD.

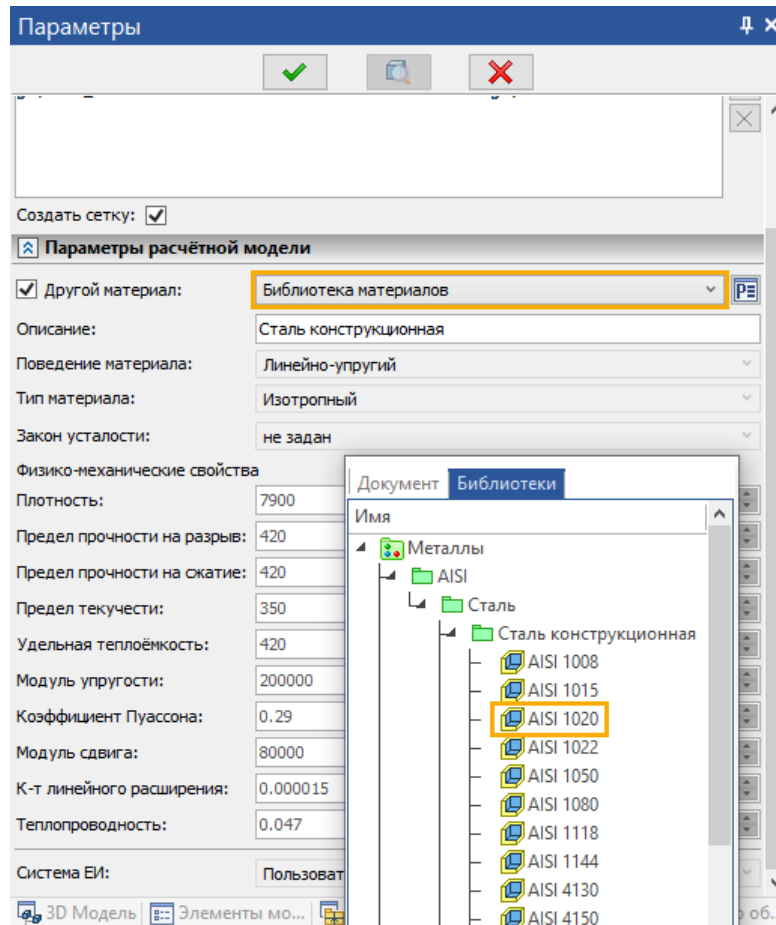


Выбрать материал для задачи из базы материалов можно в окне параметров задачи. Быстро открыть это окно для настройки материалов можно с помощью команды **Материал** на панели **Лента** или из контекстного меню дерева задач, отображаемого в окне задач.



В окне параметров необходимо выбрать опцию **Другой материал**, в выпадающем списке выбрать **Библиотека материалов** и выбрать требуемый материал.

Назначим для нашей модели материал «Сталь/AISI 1020» из базы материалов T-FLEX Анализа.



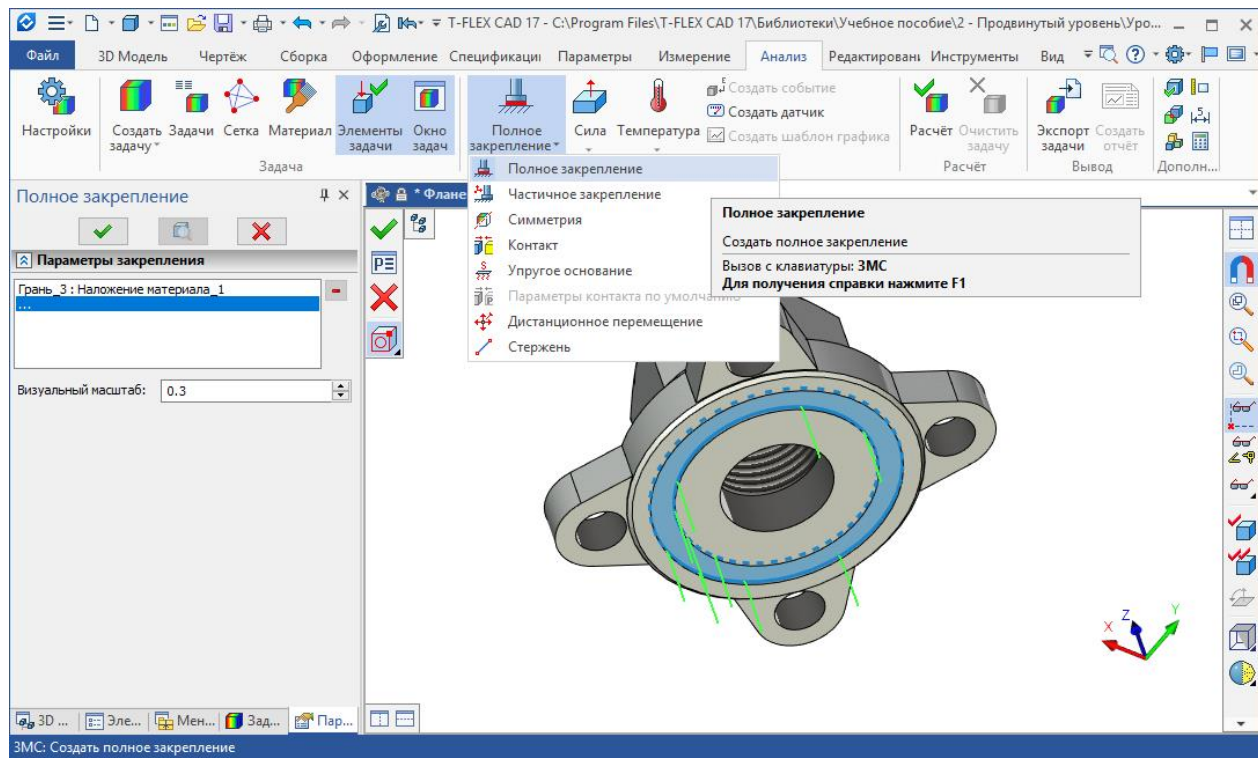
2.5. ЗАДАНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Для успешного решения физической задачи в конечно-элементной постановке помимо создания конечно-элементной сетки, необходимо корректно определить так называемые «граничные условия». В статике их роль выполняют закрепления и приложенные к системе внешние нагрузки.

Для задания закреплений в T-FLEX Анализе предусмотрены команды: **Полное закрепление**, **Частичное закрепление**, **Контакт**, **Симметрия**, **Упругое основание** и **Дистанционное перемещение**.

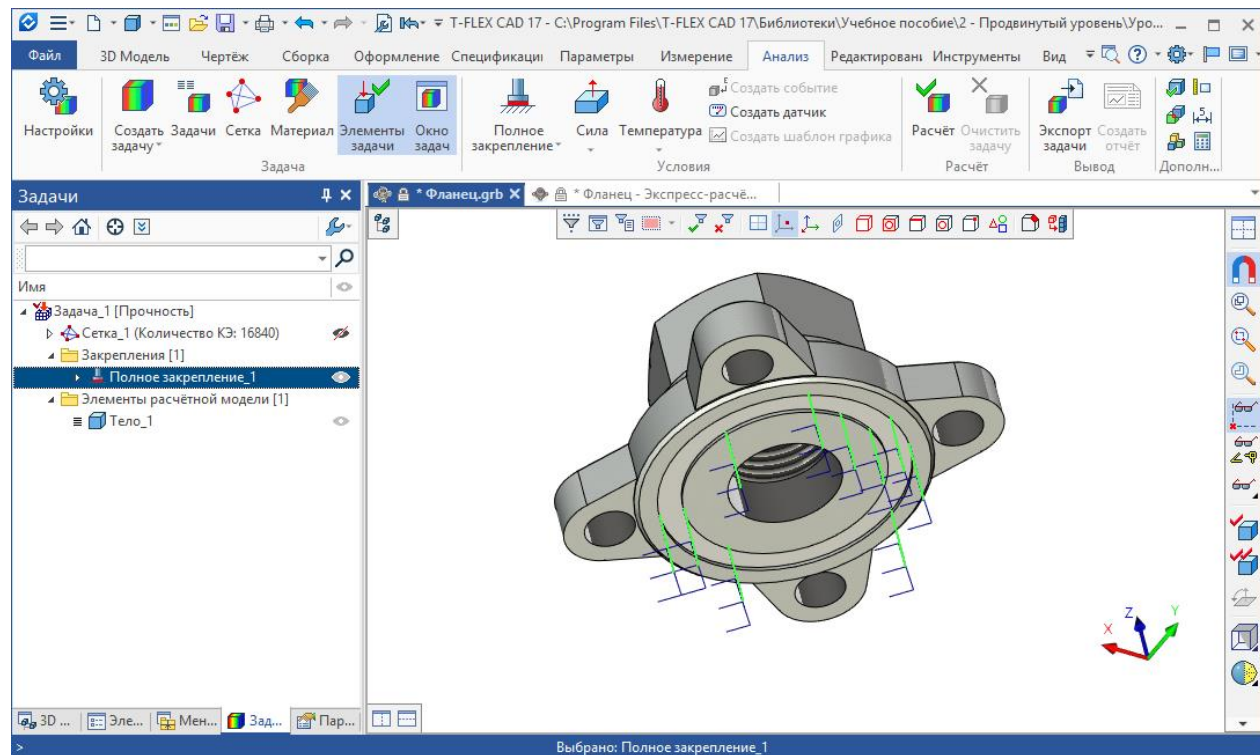
Команда **Полное закрепление** применяется к вершинам, граням и рёбрам модели. Она определяет, что данный элемент трёхмерного тела полностью неподвижен, т.е. сохраняет своё первоначальное расположение и не меняет своего положения под действием приложенных к системе нагрузок.

Используя команду **Полное закрепление**, которая находится на панели Лента в группе **Условия**, укажем с помощью  неподвижную грань нашей модели.



При задании граничных условий изображение конечно-элементной сетки автоматически гасится, чтобы дать возможность привязки граничных условий к элементам твердотельной модели (граням, рёбрам, вершинам).

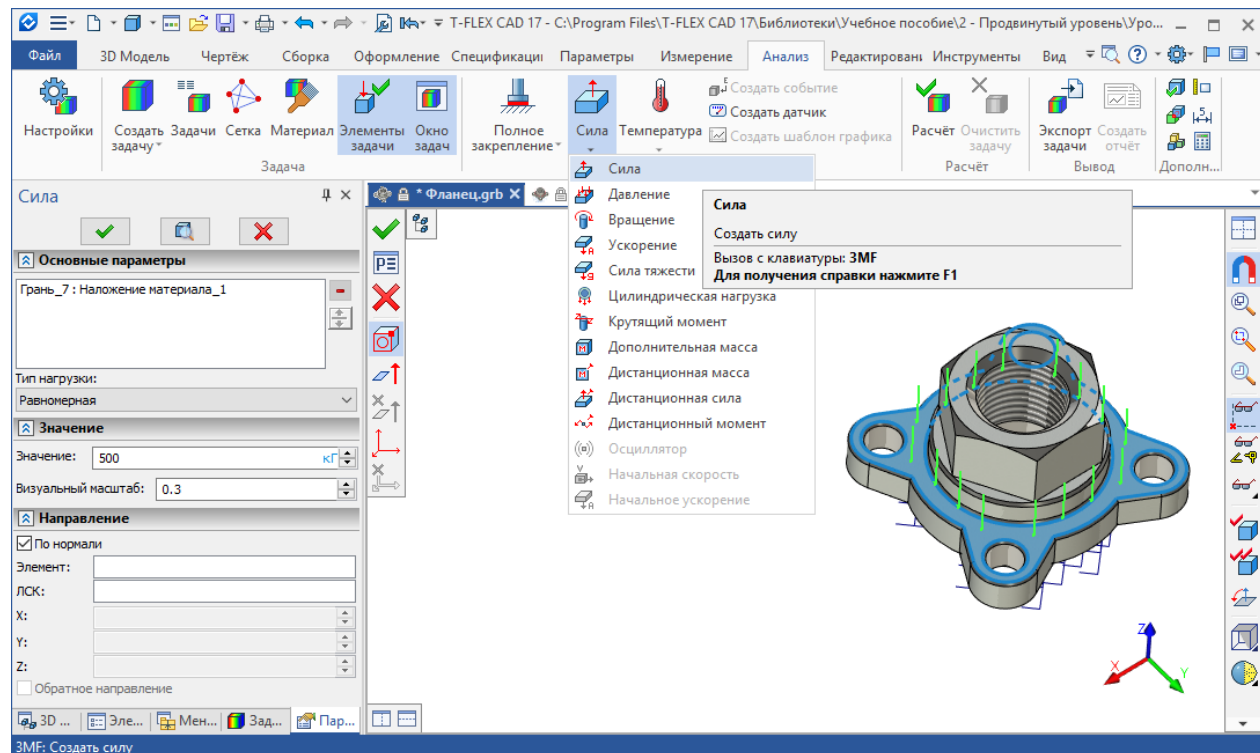
После успешного завершения команды создания закреплений в дереве задач, отображаемом в окне задач, появляется соответствующий элемент, указывающий на наличие данного граничного условия. В модельном окне T-FLEX CAD закрепление грани также отображается с помощью условных трёхмерных элементов (декораций).



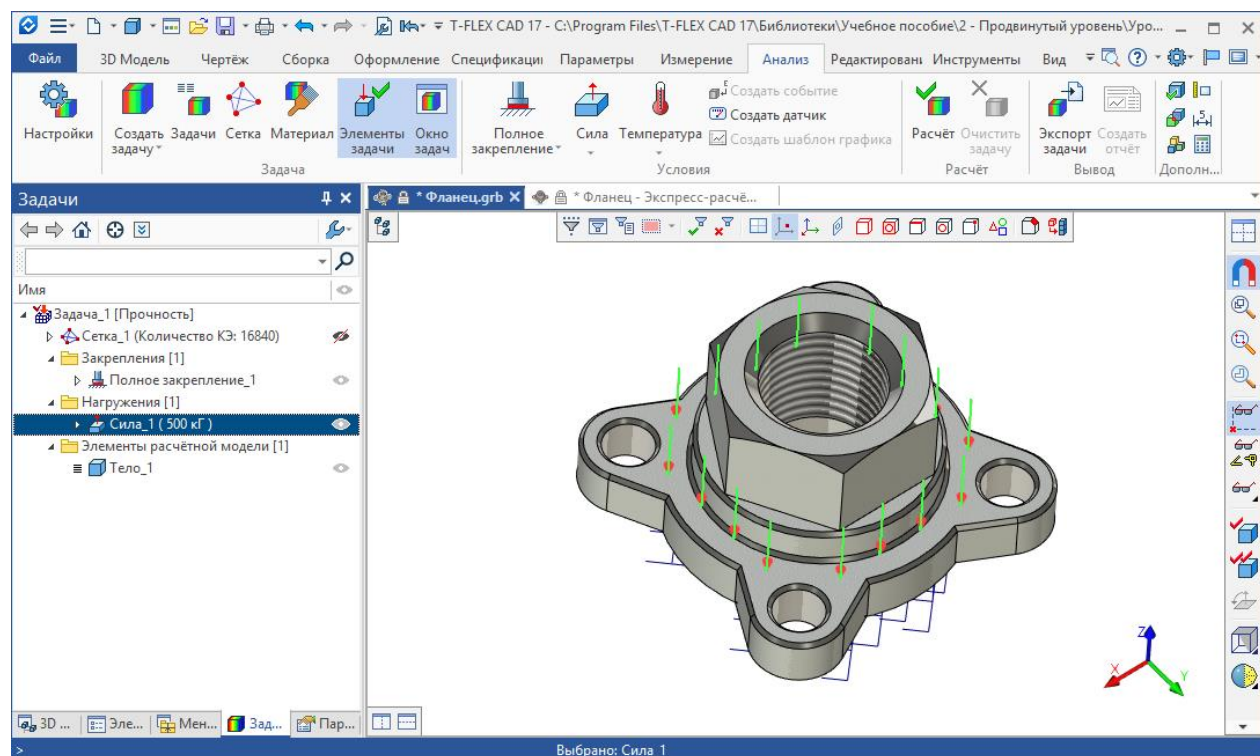
2.6. ЗАДАНИЕ НАГРУЖЕНИЙ

Для задания нагрузений в T-FLEX Анализе предусмотрен набор специализированных команд, доступ к которым осуществляется из группы **Условия** из выпадающего списка **Сила** на панели Лента.

Используя команду **Анализ** > **Сила**, укажем грань «Фланца», на которую приложена нагрузка. В диалоге параметров команды в поле **Значение** указываем значение силы (500 Ньютонов). Созданная сила равномерно распределится по указанной грани. Изначально направление действия силы берется по нормали к указанной плоской грани. При желании можно задать вектор направления действия силы.



После завершения команды создания нагружения на трёхмерной модели изделия появляется условное отображение созданных нагружений в виде условных обозначений, приложенных к соответствующим элементам модели.

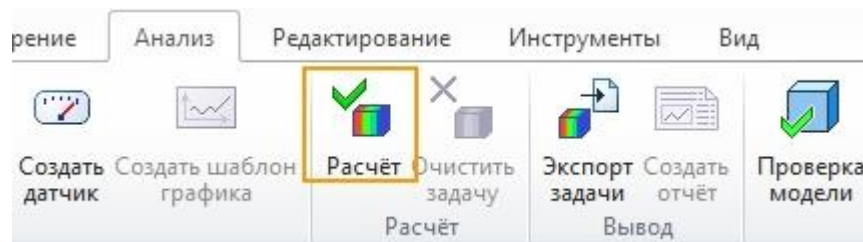


После успешного завершения команды задания нагружений в дереве задач имеются отображаются все четыре элемента, необходимые для выполнения расчёта:

- сетка;
- материал;
- закрепление;
- нагружение.

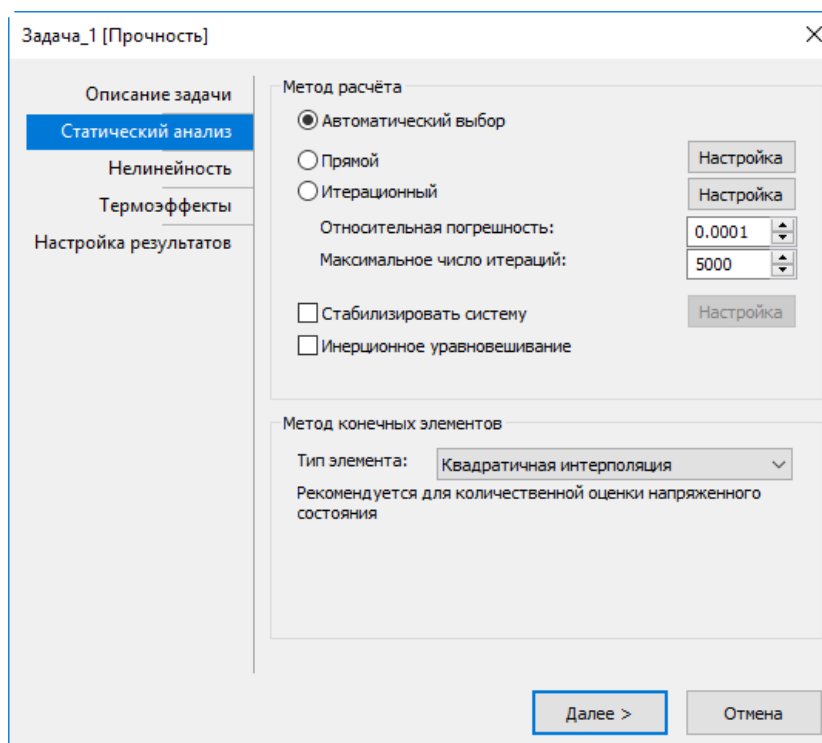
2.7. ВЫПОЛНЕНИЕ РАСЧЁТА

После создания конечно-элементной сетки и наложения граничных условий можно инициализировать команду **Анализ > Расчёт** и запустить процесс формирования систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) и их решения.

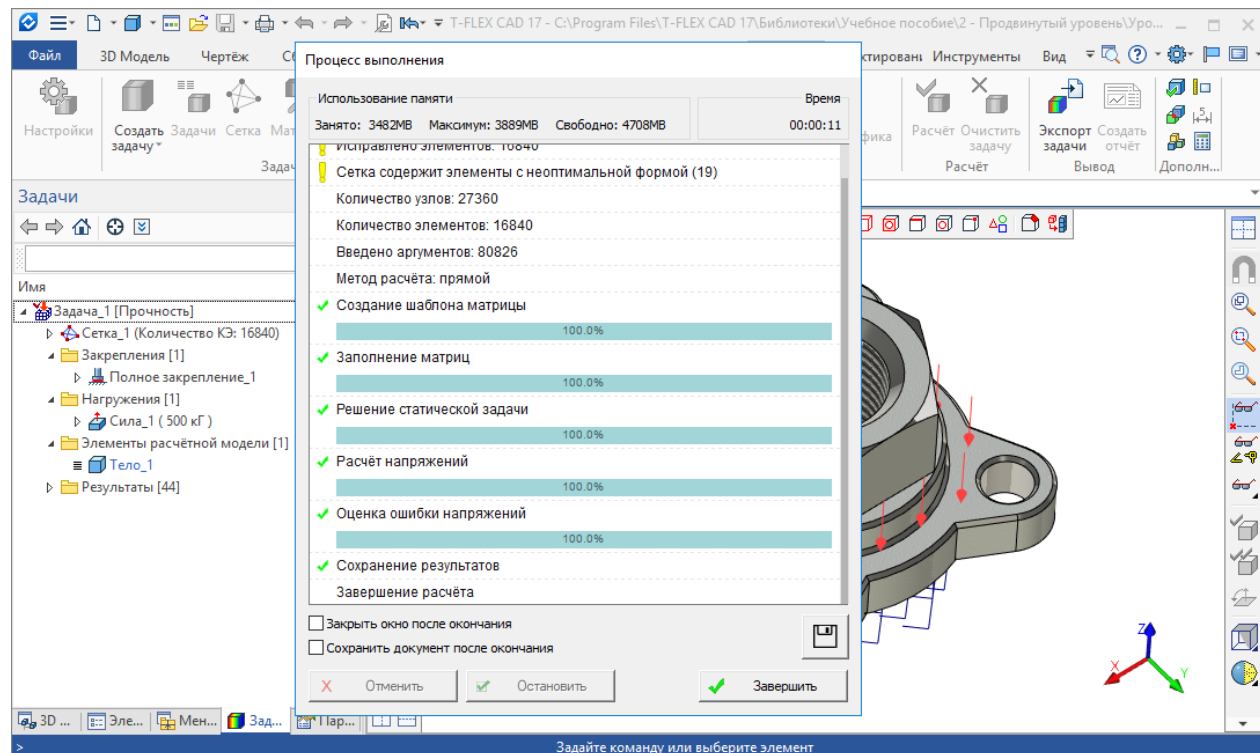


Доступ к команде **Расчёт** можно также получить из контекстного меню соответствующей задачи в дереве задач, отображаемом в окне задач.

Режимы для формирования СЛАУ и методы их решения выбираются автоматически процессором T-FLEX Анализ. Пользователь может самостоятельно изменить опции расчёта в диалоге параметров задачи, который по умолчанию открывается перед началом расчёта. В процессе решения СЛАУ доступен диалог с отображением этапов расчёта.

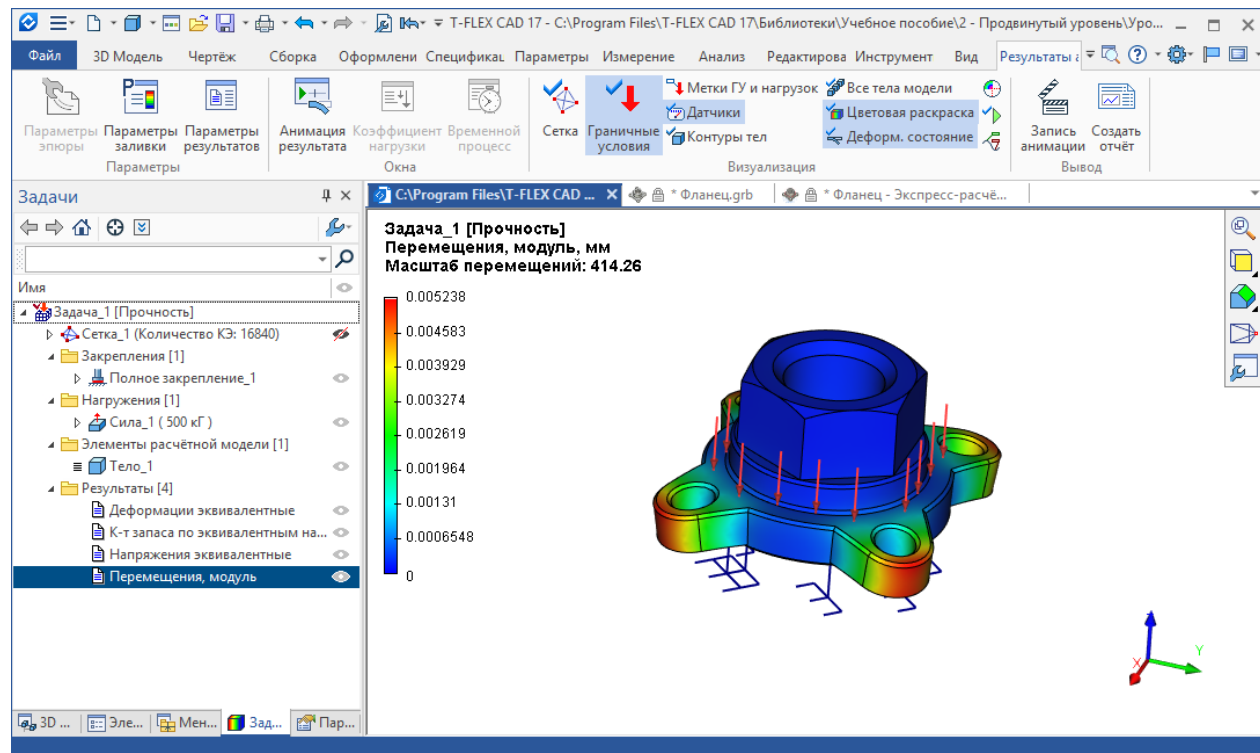


Процесс решения СЛАУ может занимать значительное время на задачах с сетками из большого количества тетраэдров. По окончании расчёта выводится соответствующее информационное сообщение.

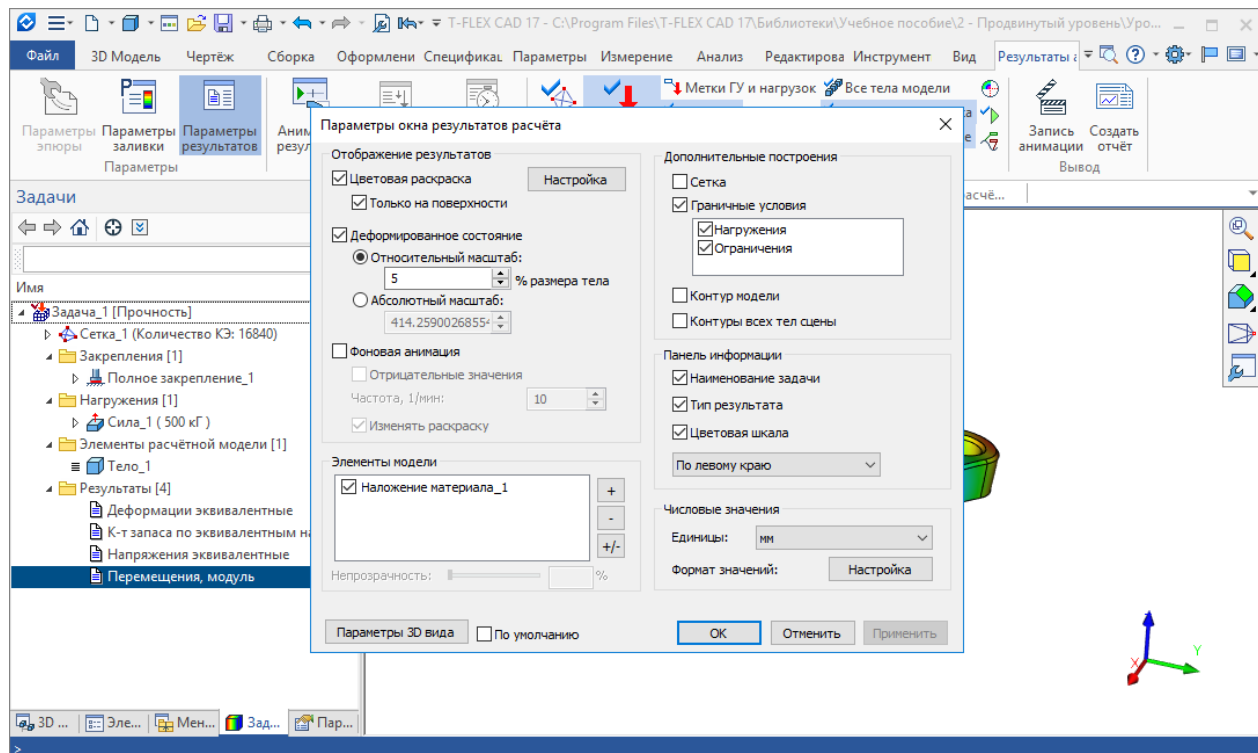


2.8. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТА РАСЧЁТА

Результаты расчёта отражаются в дереве задач. Доступ к результатам обеспечивается из контекстного меню для выбранной в дереве задач задачи по команде «Открыть» или «Открыть в новом окне». Визуализация результатов осуществляется непосредственно в интерфейсе T-FLEX CAD. Одновременно могут быть открыты несколько результатов одной или разных задач. Для пользователя доступны все команды масштабирования и позиционирования сеточной модели с результатами расчётов, используемые при работе с трёхмерными моделями в T-FLEX CAD. Кроме того, есть набор специализированных команд и опций позволяющих решать разнообразные сервисные функции по обработке результатов расчётов. Коротко отметим наиболее важные из них.

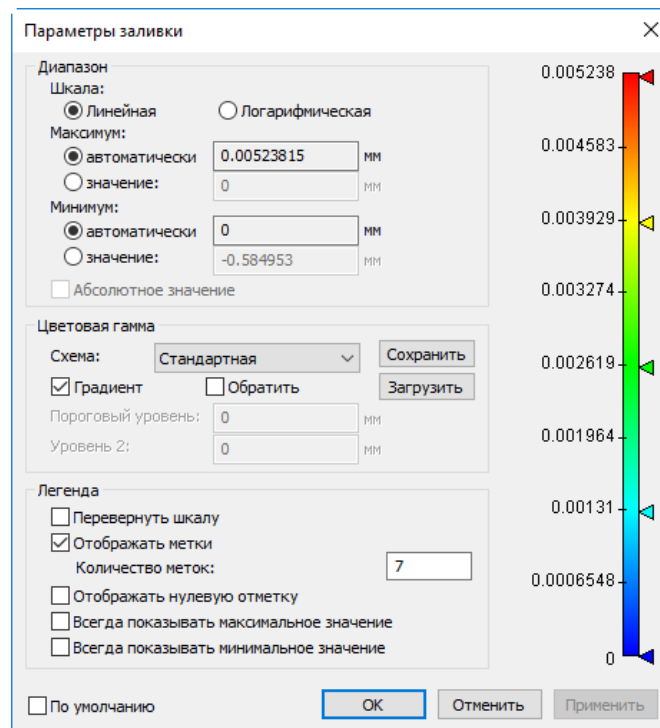


Управление отображением сеточной модели. Доступ осуществляется по двойному клику в области окна просмотра результатов расчёта или по команде **Параметры результатов** контекстного меню. Пользователь может задать различные режимы отображения результатов расчёта – с сеткой, без сетки, отображать ли контур исходной детали и других тел, присутствующих в сборке, отображать деформированное состояние, анимировать изображение и т.п.

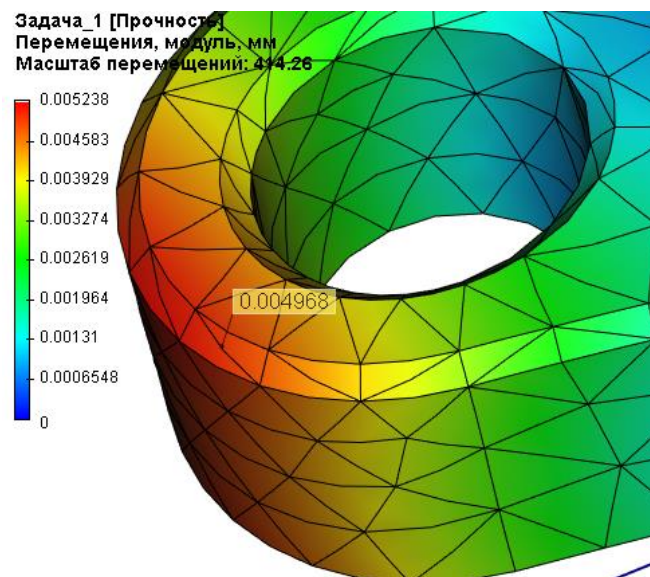


Параметр **Фоновая анимация** позволяет воспроизвести поведение исследуемой модели при плавно меняющейся нагрузке, с одновременным отображением полей напряжений или перемещений, соответствующих переменной нагрузке.

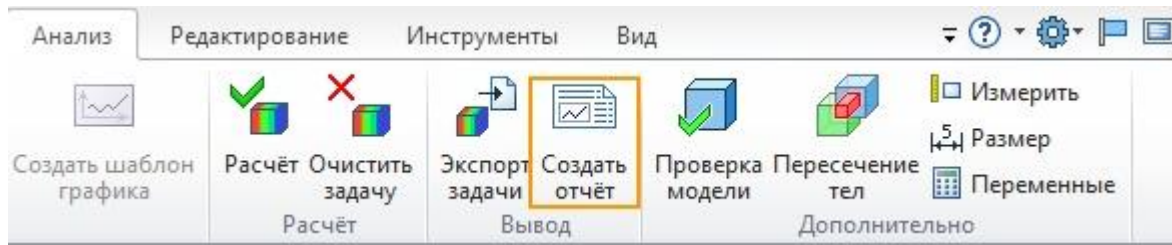
Настройка шкалы. Доступ осуществляется по двойному клику в области шкалы окна просмотра результатов расчёта или по команде **Параметры заливки** контекстного меню в окне просмотра результатов расчёта. Пользователь имеет набор возможностей по настройке панели отображения числовых значений. Можно использовать несколько predetermined типов шкал, а также есть уникальная возможность гибкой настройки шкалы любого цветового наполнения. Также имеется возможность установить минимальное и максимальное значения шкалы, выбрать отображение логарифмической шкалы.



Динамическое зондирование результата. Постпроцессор T-FLEX Анализа предоставляет удобную возможность для вывода результата непосредственно под курсором мыши. Пользователю достаточно навести курсор на интересующее его место сеточной модели, и появляется точное значение результата в этом месте. Зондирование работает и для режима отображения деформированного состояния модели. При зондировании внутренних участков модели можно использовать инструмент **Плоскость обрезки** T-FLEX CAD.



Создание отчёта – результаты решения задачи могут быть сохранены в виде независимого электронного документа. Доступ к диалогу формирования отчёта для активной задачи осуществляется с панели Лента или через пункт контекстного меню **Создать отчёт** задачи, выбранной в дереве задач.



3. ПРЕПРОЦЕССИНГ: РАСЧЁТНАЯ МОДЕЛЬ

Основное назначение препроцессора T-FLEX Анализа – подготовка исходных данных подлежащей анализу физической задаче в виде расчётной модели, которая будет адекватно отражать геометрические и физическо-механические свойства моделируемого изделия в определённых условиях. Она осуществляется на основе расчётной геометрии в интерактивном режиме с помощью команд препроцессора, работа с которыми описана в данной главе. Результатом работы препроцессора является расчётная модель изделия для которой:

- определена постановка и тип задачи (см. раздел [Управление задачами](#));
- назначен материал (см. раздел [Задание материала](#));
- создана конечно-элементная сетка (см. раздел [Управление сеткой](#));
- определены условия и нагрузки соответствующие моделируемой физической задаче (см. раздел [Условия и нагрузки](#));

Последовательность создания расчётной модели в T-FLEX Анализе в большинстве случаев не имеет значения, т.е. пользователь может сначала построить конечно-элементную сетку, а затем наложить граничные условия, или, наоборот, сначала задать условия и нагрузки, и лишь затем сгенерировать сетку из конечных элементов. Однако, непременным условием корректной расчётной модели является обязательное наличие всех её составляющих.

Модель T-FLEX CAD является параметрической. Преимущества параметрической модели можно в полной мере использовать при расчёте. В результате параметрических изменений трёхмерной модели все связанные с моделью элементы задач (нагрузки, закрепления, сетка) могут быть автоматически пересчитаны (перестроены), и не требуют повторного введения. Для элементов задач, требующих больших вычислительных ресурсов (например, сетки), есть возможность создания сетки по группам, позволяя задействовать новые сценарии при работе с сеткой (см. п. [Сценарии построения сетки](#)). После обновления данных задачи потребуется заново выполнить расчёт.

Основные темы в этом разделе:

- [Управление задачами](#)
- [Задание материала](#)
- [Управление сеткой](#)
- [Условия и нагрузки](#)
- [Сервисы препроцессинга](#)

3.1. УПРАВЛЕНИЕ ЗАДАЧАМИ

Задача – особый объект системы, объединяющий в себе данные и элементы, необходимые для выполнения расчёта модели. Задача содержит необходимые настройки параметров расчёта, а также информацию об используемых объектах (твёрдых телах и/или оболочках, и/или балках), на основе которых строится конечно-элементная модель, об условиях и нагрузках, и конечно-элементной сетки. После выполнения вычислений задача также содержит результаты расчёта.

Управление задачами осуществляется в группе «Задача» ленты Анализ, в ней доступны следующие команды: [Новая задача](#), [Окно Задач](#), [Настройки](#).

Основные темы в этом разделе:

- [Новая задача](#)
- [Настройки](#)

3.1.1. НОВАЯ ЗАДАЧА

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Задача > Новая задача > Конечно-элементный анализ
Клавиатура	Текстовое меню
<3MN>	Анализ > Новая задача > Конечно-элементный анализ

Из 3D сцены необходимо выбрать элементы для дальнейшего анализа.

Если в сцене присутствует всего один элемент, то он выбирается автоматически.

Выбрать объекты можно при помощи опции:



- выбрать элемент (тело/грань);



- выбрать все элементы задачи из сцены;

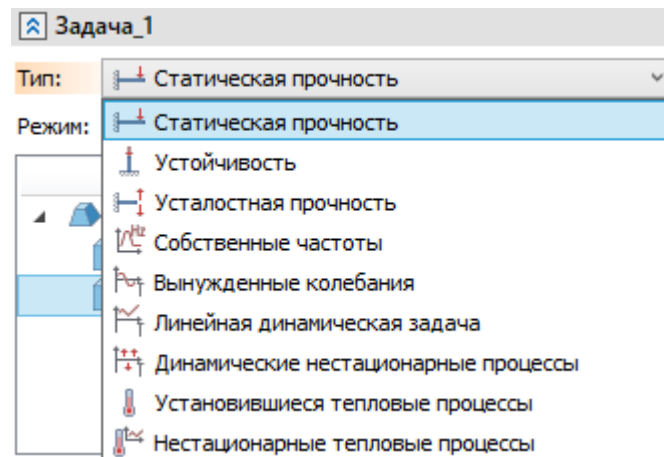


- отменить выбор всех элементов.

Система допускает использование в расчёте элементов разных типов – объёмных тел, поверхностных и балок (в этом случае получается так называемая «гибридная модель»). При этом все элементы задачи считаются единым целым (подобно клеевому соединению), и для них рассчитывается одна сетка. Поэтому каждый элемент задачи обязательно должен соприкасаться хотя бы с одним из оставшихся элементов, участвующих в данном расчёте, и эти элементы не должны проникать друг в друга.

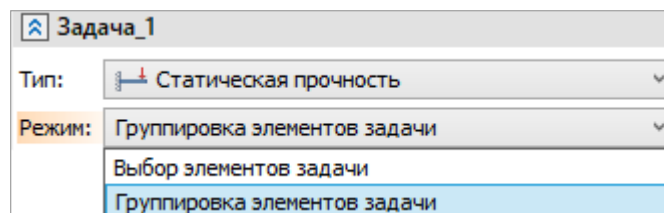
При создании **Новой задачи** необходимо указать её **Тип**:

- [Статическая прочность](#);
- [Устойчивость](#);
- [Усталостная прочность](#);
- [Собственные частоты](#);
- [Вынужденные колебания](#);
- [Линейная динамическая задача](#);
- [Динамические нестационарные процессы](#);
- [Установившиеся тепловые процессы](#);
- [Нестационарные тепловые процессы](#).



Так же при добавлении элементов, необходимо выбрать **Режим**:

- [Группировка элементов задачи](#);
- **Выбор элементов задачи.**



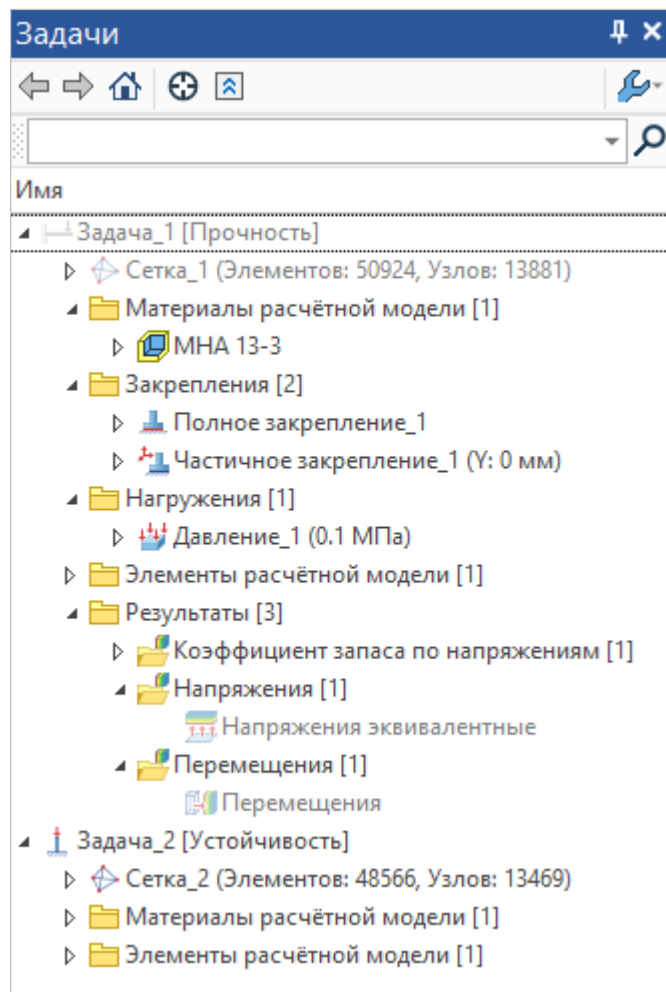
Окно Задач

Для работы с задачами существует специальное служебное окно «**Задачи**». В окне задач отображается вся информация в виде дерева о подготовленных задачах в данном документе, а также обо всех элементах, входящих в состав каждой задачи. Через окно задач можно осуществлять быстрый доступ к элементам каждой задачи. Каждый тип задач, а также каждый элемент задачи помечается своей специальной пиктограммой. Некоторые элементы задач (нагрузки, закрепления, результаты) объединены в группы.

Изменить настройки задачи можно после её создания в диалоге параметров. Диалог параметров задачи может появляться автоматически перед выполнением расчёта или при вызове соответствующей команды из контекстного меню, вызываемого при выборе задачи



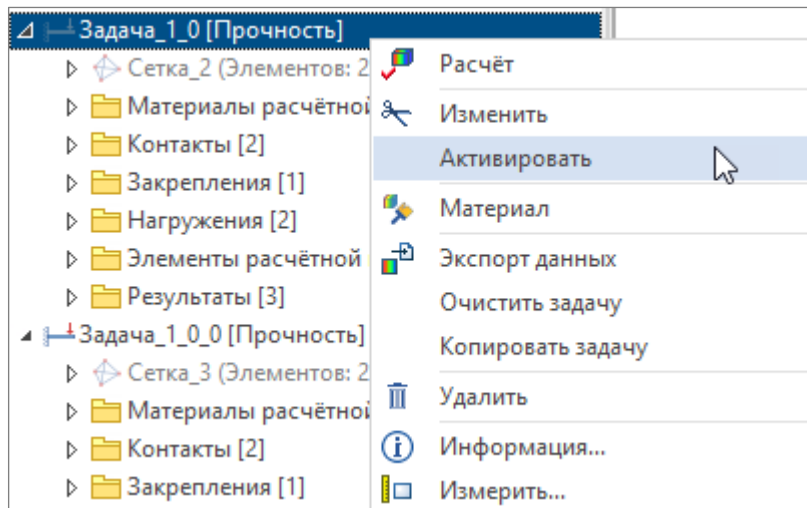
в окне задач.



Для того что бы переопределить тип задачи (вид анализа) нужно воспользоваться командой **Изменить** через контекстное меню при выборе **Задачи**  в дереве задачи окна **Задачи** или окна **3D Модель**.

Для быстрого создания похожих задач одного вида, с одной и той же моделью (например, чтобы сравнить результаты расчёта с разной сеткой или материалом) можно воспользоваться командой из контекстного меню копировать задачу см. п. [Копировать задачу](#).

Если в документе много разных задач, то активной может быть только одна. Переключение между задачами осуществляется через команду **Активировать** через контекстное меню при выборе задачи  в дереве задачи окна **Задачи** или окна **3D Модель**.



Основные темы в этом разделе:

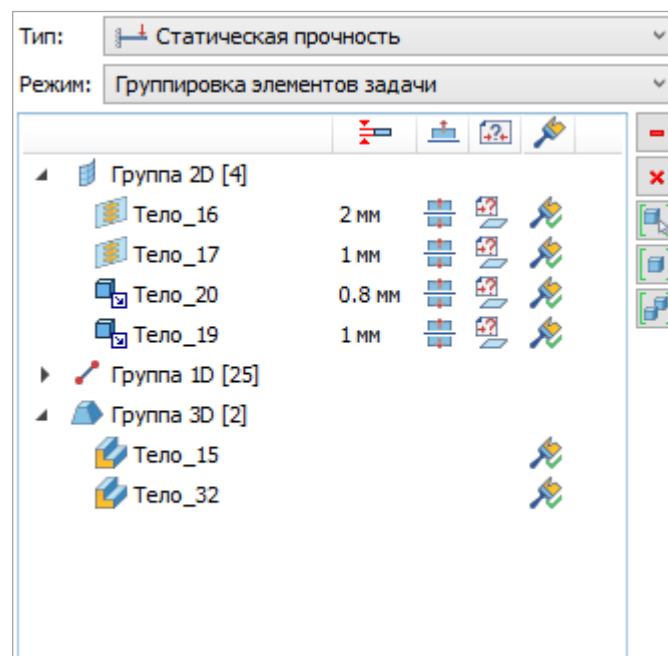
- [Группировка элементов задачи](#)
- [Параметры элементов задачи](#)
- [Диагностика материала](#)

3.1.1.1. ГРУППИРОВКИ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАДАЧИ

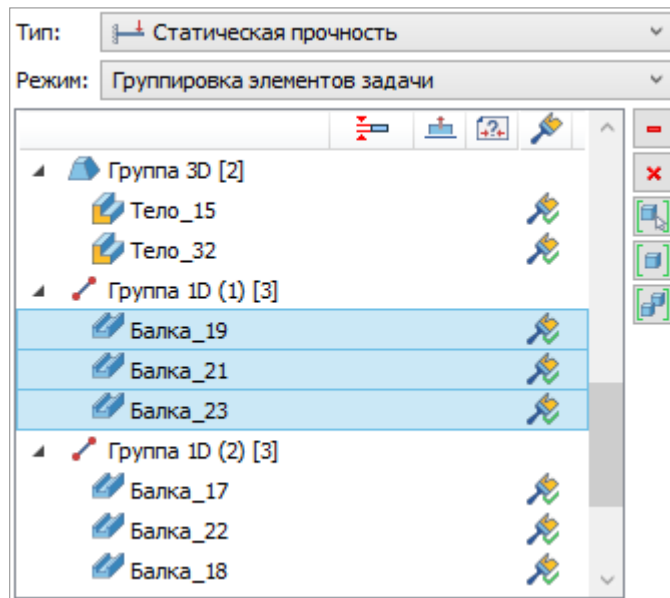
Для гарантированного получения сетки на любой модели предусмотрена группировка элементов задачи.

Группировка выполняется автоматически при добавлении элементов, формируя группы по типам элементов задачи (тела, оболочки и балки). Это позволяет в дальнейшем управлять параметрами гибридной сетки, т.к. для каждой группы, параметры сетки должны настраиваться индивидуально см. п. [Сценарии построения сетки](#). Между группами создаётся несогласованная сетка. Между элементами внутри группы - сетка согласованная.

При двойном клике на группу можно ввести пользовательское название.

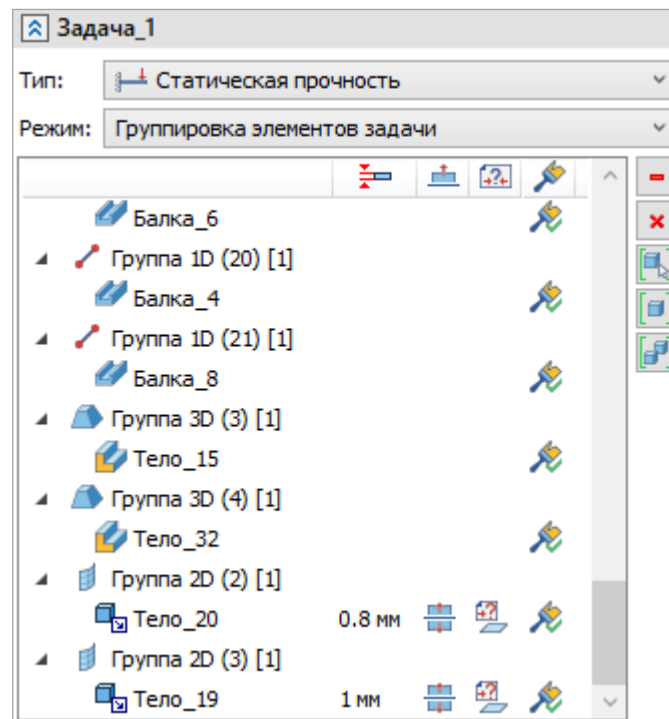


Есть возможность произвольно сгруппировать элементы задачи. Для этого нужно воспользоваться одной из вложенных команд . Произвольная группировка выполняется для элементов одного и того же типа.



В случае, если были внесены изменения в группы, и возникла необходимость вернуться к исходной группировке можно воспользоваться вложенной командой .

Есть возможность каждый элемент выделить в отдельную группу, используя вложенную команду . Это бывает необходимо, когда между элементами конструкции существуют зазоры или пересечения (явление интерференции). Для таких случаев согласованная сетка построиться не сможет. Поэтому для таких элементов необходимо получить независимую сетку и далее задать контакт «Жесткая связь», см. п. [Контакт](#).



При помощи вложенных команд можно:

-  - удалить выбранные элементы;
-  - очистить (удалить все элементы задачи);
-  - добавить выделенные элементы в группу;
-  - сгруппировать все элементы в отдельные группы;
-  - сгруппировать элементы по их типу.

3.1.1.2. ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАДАЧИ

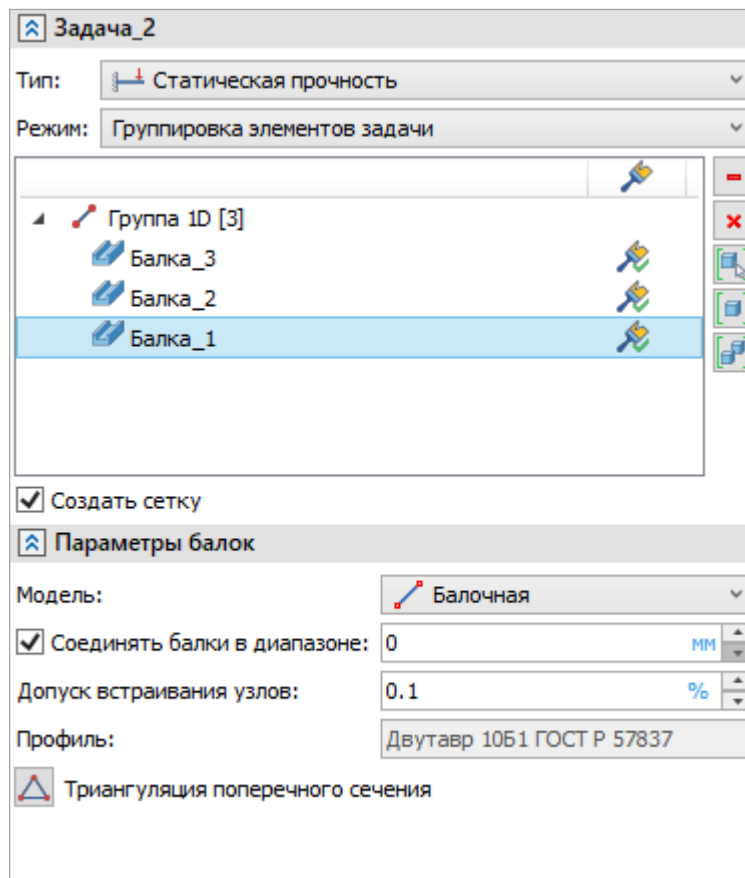
3.1.1.2.1. ПАРАМЕТРЫ БАЛОК

Для того, чтобы выполнить расчёт конструкции, состоящей из балок, которые были созданы в функционале металлоконструкций (T-FLEX CAD), необходимо добавить элементы в задачу. В качестве элементов задачи, которые будут участвовать в расчёте, можно выбрать балки как 1D тело (балочное) или объёмное тело.

При добавлении элементов в **Новую задачу** набор фильтров по умолчанию следующий:

-  <Ctrl+Alt+B> - выбрать тело;
-  <Ctrl+Alt+Y> - выбрать сварной шов;
-  - выбрать балки как 1D элемент;

С использованием фильтра по умолчанию, все выбранные элементы в данном случае попадают в одну 1D группу.



Группа «Параметры балок»

В группе настраиваются все возможные параметры балок:

- **Модель:** Балочная или Объёмная. Параметр для выбора или смены модели балок в используемой задаче. Настраивается для выбранных балок или тел, с которых были получены.

При нажатии на элемент в списке отображается какая модель для него используется.

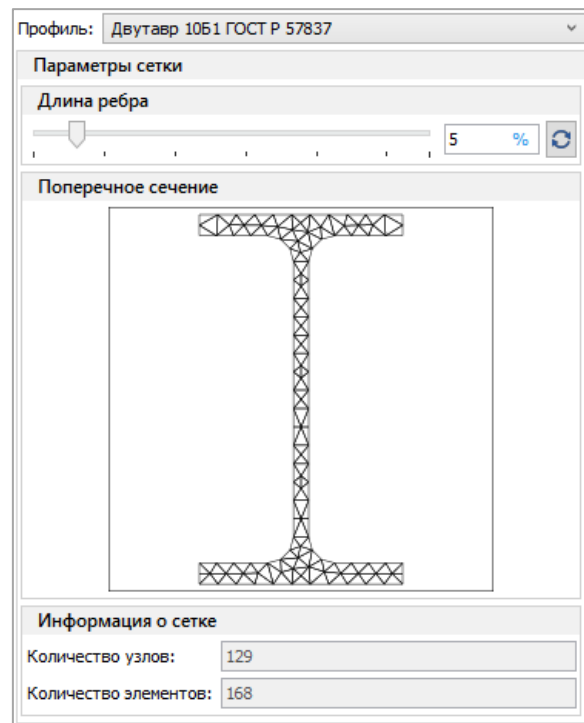
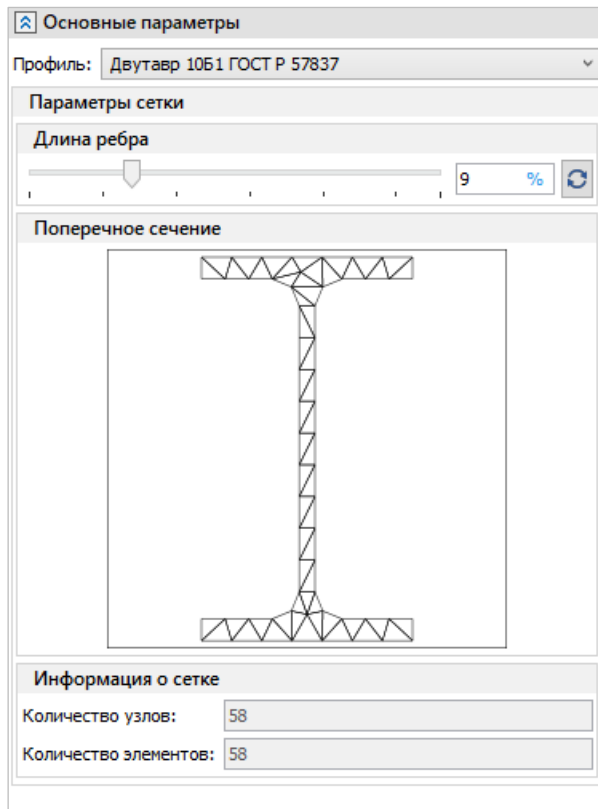
- **Соединить балки в диапазоне.** При активации переключателя необходимо ввести значение диапазона, после чего все балки будут соединены в указанном диапазоне жёсткой шарниром см. п. [Соединение балок](#).
- **Допуск встраивания узлов.**

Работает только для балочной модели.

- **Профиль.** Параметр представляющий информацию о используемом профиле поперечного сечения.

Триангуляция поперечного сечения

Относится только к балочной модели. Пользователь имеет возможность визуально оценить достаточность произведенной по умолчанию триангуляции сечения. При необходимости, пользователь имеет возможность уточнить качество сетки в профиле поперечного сечения.



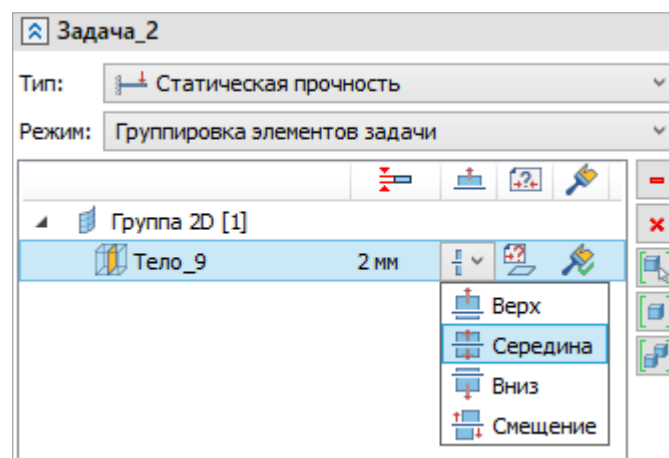
3.1.1.2.2. ПАРАМЕТРЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ

При расчёте тонкостенных конструкций пользователь может определить, какие фрагменты модели необходимо рассчитывать с использованием пластинчатых (треугольных) КЭ.

В качестве элементов задачи, которые будут участвовать в расчёте, необходимо выбрать грани 3D тела или любое поверхностное тело. Далее выбрать **Тип задачи** и **Режим**, см. п. [Ноявая задача](#).

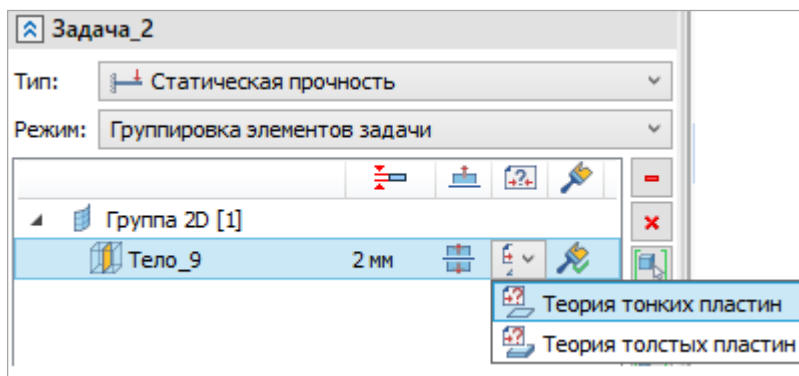
Для каждой выбранной поверхности установить:

- Толщину;
- Тип смещения;



- Гипотезу расчёта:

- Теория тонких пластин (теория пластин Кирхгофа-Лява);
- Теория толстых пластин (теория пластин Рейсснера-Миндлина).



Эти теории, соответственно, разделяют оболочечные тела на тонкостенные и толстостенные и позволяют свести трехмерную задачу механики сплошной среды к двумерной. Так пластины (прямолинейные оболочки) с соотношением между толщиной и пролетом (минимальным размером в плане) $1/20$ - $1/100$ считаются тонкими, а с соотношением $\approx 1/5$ - $1/20$ – толстыми. Пластины с пограничным соотношением между толщиной и пролетом, т.е. около $1/20$, обычно считаются по теории толстых пластин, как по более общей и более точной.

При выборе теории для оболочек малой кривизны можно пользоваться указанным соотношением между толщиной и пролетом. В общем случае для криволинейных оболочек и, в частности, для оболочечных тел с выраженной кривизной, толщину необходимо сравнивать не с пролетом, а с радиусом кривизны оболочки, в то время как численное соотношение остаются неизменным. Оболочечные тела, у которых указанное соотношение около $1/5$ или более, должны моделироваться твердотельными элементами.

Деление оболочек на тонкие и толстые условно, численные границы, по которым производится разделение, приближительны. Теория толстых пластин является более универсальной и может использоваться в том числе и для тонких оболочек и пластин. Оболочки, у которых указанное соотношение менее $1/100$, проявляют ярко выраженные мембранные свойства, которые не учитываются в теориях пластин.

Подробнее:

[Теория тонких и толстых платин](#)

Группа «Параметры поверхностей»

С помощью вложенных команд можно:



- показать цветом верх/низ поверхности;



- поменять местами верх/низ поверхности;



- отображение поверхностей, см. п. [Отображение поверхностей](#).

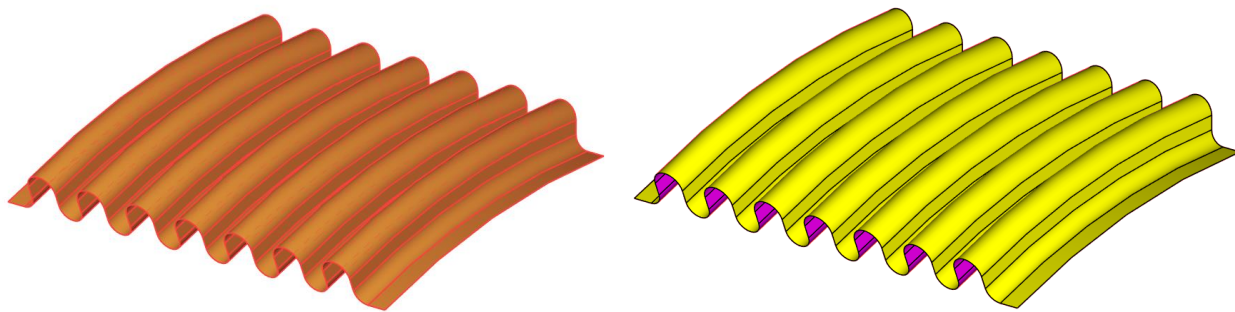


Рис. 1 – Отображение верха и низа поверхности с помощью вложенной команды. Здесь желтым цветом – верх, пурпурным – низ поверхности.

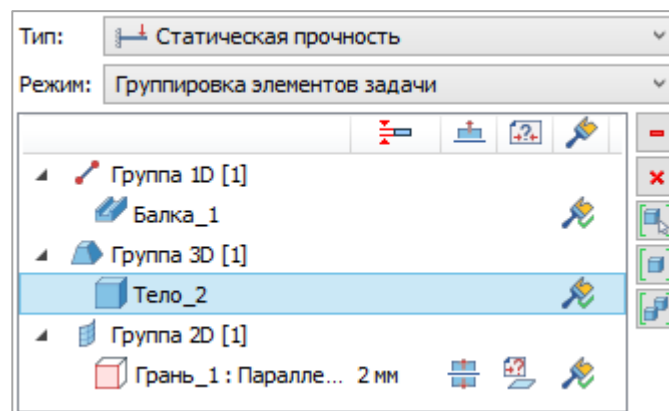
Так же при добавлении элементов в задачу система производит диагностику материала в последнем столбце таблицы, см. п. [Диагностика материала](#).



3.1.1.3. ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛА

Диагностика материалов выполняется для любого типа элементов и без принадлежности к группам.

При добавлении элементов в задачу система производит диагностику материала, а именно на наличие или корректности заданных свойств материала для используемого типа задачи.



В последнем столбце таблицы у каждого элемента будут появляться специальные пиктограммы:

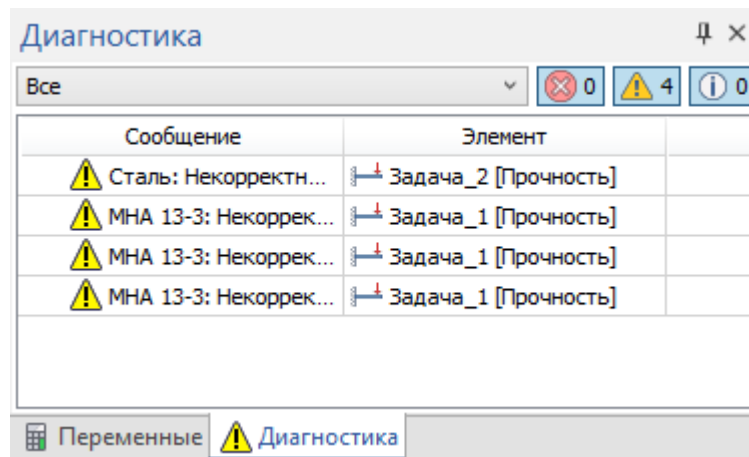


- некорректные свойства материала (не все обязательные параметры заполнены или введены некорректные значения);



- ошибки отсутствуют.

Кроме того, сообщения о некорректности материала всех задач отображаться в окне **Диагностика**, отслеживающие ошибки и предупреждения.



3.1.2. НАСТРОЙКИ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Задача > Настройки
Клавиатура	Текстовое меню
	Анализ > Задача > Настройки

С помощью команды пользователь может определить глобальные настройки системы T-FLEX Анализ.

Вкладка «Процессор»

Каталог временных файлов – определяет путь к каталогу, в котором сохраняются промежуточные рабочие данные при решении систем уравнений. По умолчанию рабочие файлы сохраняются в папке, определяемой системной переменной "TEMP", ("TMP") ОС Windows. При необходимости пользователь может переопределить этот путь.

Группа «Ресурсы»

Приоритет потока решателя – позволяет определить системный приоритет модулей, ответственных за решение систем уравнений. Можно выбрать следующие приоритеты потока решателя:

- Реального времени;
- Высокий;
- Выше среднего;
- Средний;
- Ниже среднего;
- Низкий.

В зависимости от установленного приоритета операционная система Windows будет распределять системные ресурсы, отдавая предпочтение более высокому приоритету. Например, если планируется длительное время решать большую задачу с использованием дисковой

памяти, пользователь может предварительно установить приоритет «Ниже среднего или «Низкий», что позволит ему без особых ограничений осуществлять параллельную работу в других приложениях Windows.

Ограничение использования оперативной памяти – позволяет задать объём оперативной памяти, при превышении которого система будет переходить в режим решения уравнений с использованием дисковой памяти, на что, обычно, требуется значительно больше времени.

Группа «Критерии проверки качества элементов»

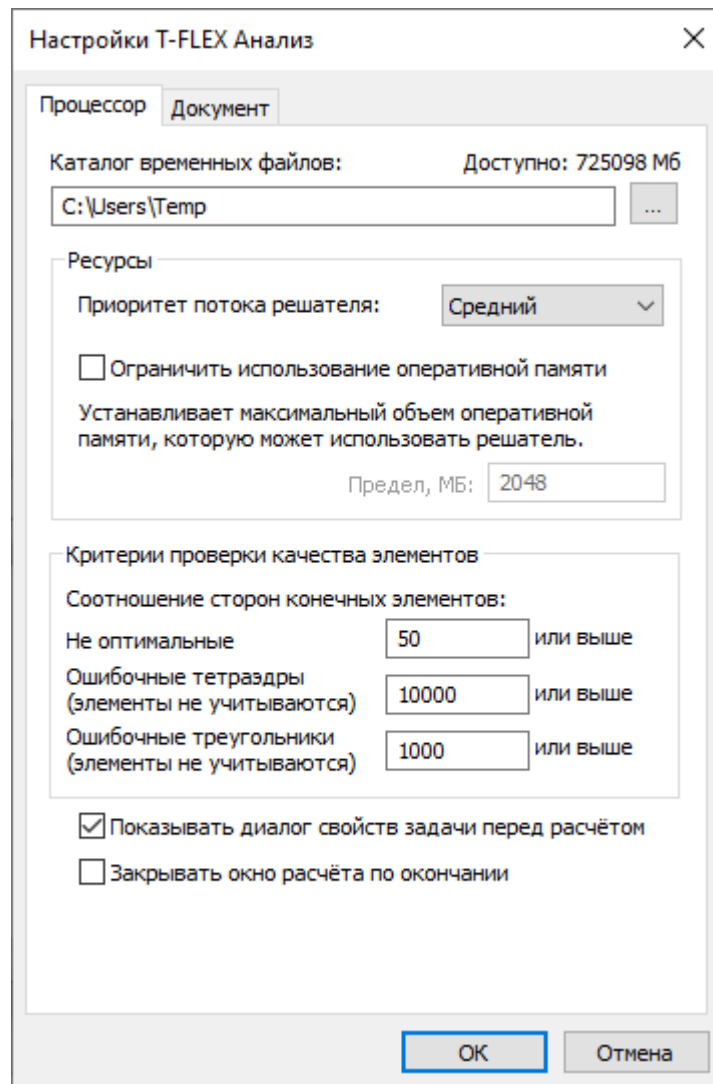
В группе задаются соотношения сторон конечных элементов (объёмных и поверхностных) при которых система будет рассматривать их как:

- Не оптимальные;
- Ошибочные тетраэдры;
- Ошибочные треугольники.

Ошибочные элементы вынужденно удаляются из сетки, т.к. приводят к сингулярности систем уравнений. Обычно это практически плоские или вырожденные в точку тетраэдры или вырожденные в линию треугольные конечные элементы. Пользователь может изменять эти параметры в случае необходимости.

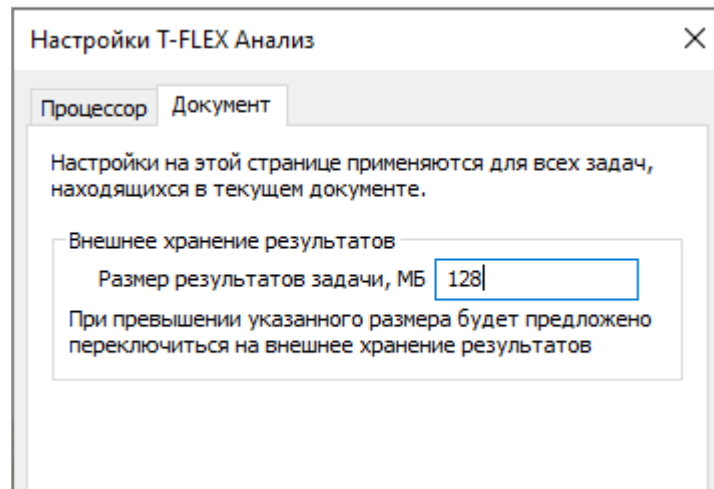
Показывать диалог свойств задачи перед расчётом – активный элемент управления включает режим автоматического вызова диалога параметров задачи при инициализации команды **Расчет** (по умолчанию для всех задач).

Закрывать окно расчёта по окончании - элемент управления включает режим автоматического закрытия информационного окна с отображением процесса решения систем уравнений во всех задачах. По умолчанию этот режим не активирован.



Вкладка «Документ»

Можно активировать опцию сохранения результатов расчёта задач в отдельном внешнем файле. По умолчанию результаты расчётов сохраняются в основном файле документа T-FLEX (расширение .grb). При активации внешнего хранения результатов в директории исходного документа создаётся файл с именем, с расширением .tfa). Данная опция может быть полезной при решении задач с большими объёмами результатов, а также может ускорять сохранение документа (зависит от операционной системы) см. п. [Внешнее хранение результатов](#).



3.2. ЗАДАНИЕ МАТЕРИАЛА

Материал – это элемент T-FLEX CAD. Он содержит перечень характеристик реального материала, с которым пользователь имеет дело в действительности.

Характеристики материала можно условно разделить на два типа. К характеристикам первого типа относятся характеристики, влияющие на отображение трёхмерных объектов в 3D окне. Характеристики второго типа – это различные физические параметры материала такие, как плотность, модуль упругости, предел прочности на разрыв и т.д. Именно характеристики материала, относящиеся ко второму типу, являются необходимыми при проведении расчётов. По умолчанию свойства материала модели для расчёта задачи наследуются из параметров используемой операции. О назначении материала операции можно прочесть в справке **T-FLEX CAD**.

Реакция детали на нагрузки напрямую зависит от того, из какого материала она сделана.

В T-FLEX Анализ поддерживаются следующие типы материала: **Изотропные** и **Анизотропные** (Ортотропный и Трансверсально-изотропный);

Так же реализована возможность задания поведения и соответствующих им моделей материалов:

- **Линейно-упругое;**
- **Гиперупругое (Изотропный):** (модель материала: (Муни-Ривлин (2 константы), Муни-Ривлин (5 констант), Муни-Ривлин (9 констант), Блейц-Ко, Нео-Гука);
- **Пластичное:** (модель материала (Билинейная или Мультилинейная)

Кроме того, T-FLEX Анализ предоставляет возможность моделирования композитов, подробнее см. п. [Составные материалы для моделирования композитов](#).

Основные темы в этом разделе:

- [Материал](#)
- [Ориентация материала](#)
- [Библиотека материалов](#)

3.2.1. МАТЕРИАЛ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Подготовка модели > Материал > Материал
Клавиатура	Текстовое меню
<3MJ>	Анализ > Подготовка модели > Материал

Для каждого элемента задачи можно назначить свой материал. Для этого необходимо выбрать элементы в сцене. Выбранные элементы отображаются в списке окна **Основные параметры**.

При помощи вложенных команд можно:



- удалить выбранные элементы;



- очистить (удалить все элементы задачи);



- выбрать все элементы задачи из сцены;



- выбрать элементы задачи без назначенного материала (диагностика материалов задачи).

Параметры материала служат для отображения информации физико-механических свойств.

Если элемент задачи задан [составным материалом](#), то его свойства можно просмотреть только в задаче, используя команду «Материал» , см. [Свойства составного материала в задаче](#)

Основные параметры

Представление: По элементам

Элемент	Материал
Тело_1	Сталь

☐ Другой материал Сталь

Параметры материала

Поведение материала

Описание: Другие металлы

Поведение материала: Линейно-упругий

Тип материала: Изотропный

Закон усталости: не задан

Физико-механические свойства

Плотность: 7800 кг/м³

Предел прочности на разрыв: 400 Н/мм²

Предел прочности на сжатие: 400 Н/мм²

Предел текучести: 220 Н/мм²

Удельная теплоёмкость: 440 Дж/(кг·К)

Модуль упругости: 210000 Н/мм²

Есть два способа назначения материалов: **По элементам** и **По материалам**.

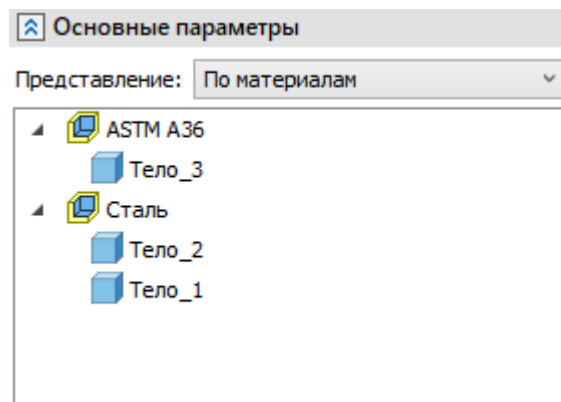
В режиме «По элементам задачи» список из элементов задачи изначально должен быть пустой. Пользователь методически его наполняет и переназначает материал только для тех элементов, которые считает необходимыми.

Основные параметры

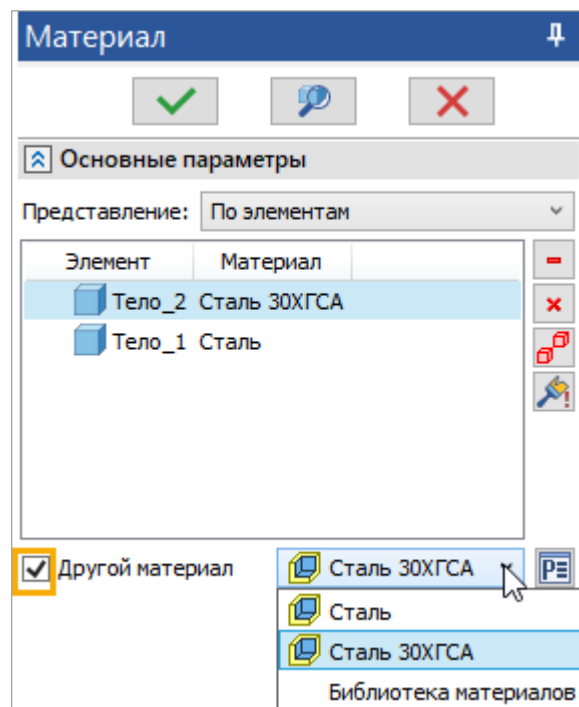
Представление: По элементам

Элемент	Материал
Тело_1	Сталь
Тело_2	Сталь

В режиме «**По материалам**» список заполнен материалами и элементами, к которым данный материал назначен. Пользователь может перезадать материал, как для всей группы элементов, так и для конкретного элемента. В последнем случае данный элемент войдёт в состав группы с новым материалом.



Для задания **Другого материала** нужно выбрать один или несколько элементов задачи (материал), активировать переключатель **Другой материал** и выбрать материал, который есть в документе или из [библиотеки материалов](#), как локальной, так и из справочников T-FLEX DOC's.



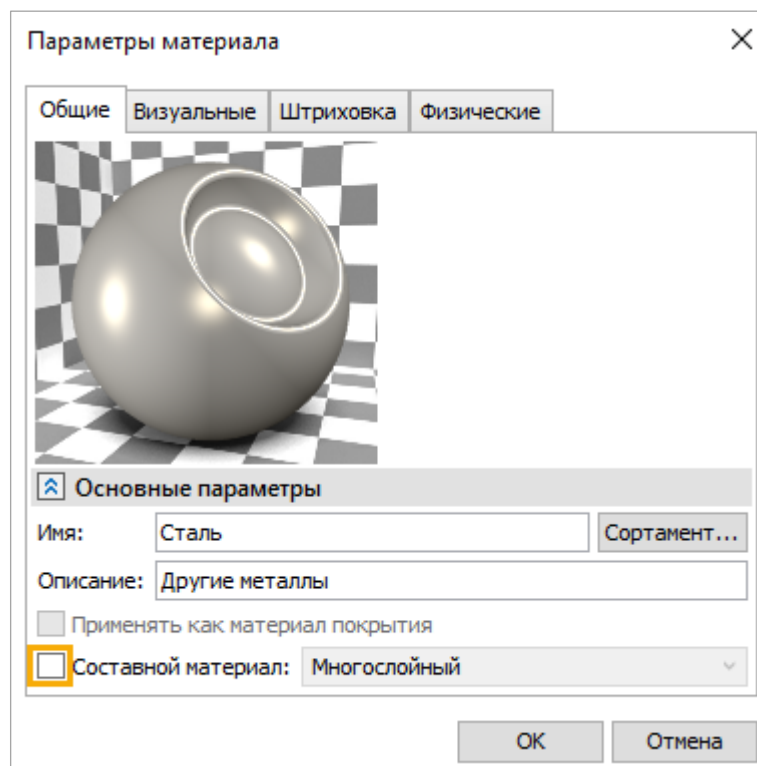
Библиотека материалов, доступная в списке материалов документа, открывает специальное окно быстрого просмотра материалов документа и библиотек. Окно предназначено для быстрого добавления в автоматическом режиме материала библиотеки в материалы документа, с последующим назначением его материалом элемента (или нескольких элементов). Выбрав в окне просмотра материалов на закладке **Библиотеки** материал библиотеки - он

будет автоматически добавлен в материалы документа и назначен как материал элемента задачи.

Материалы документа - это локальные материалы, свойства которых определены только в рамках текущего документа. Чтобы материал документа был зависим от внешней библиотеки необходимо его сопоставить с материалом библиотеки при помощи специальной команды окна **Материалы**.

Каждый материал документа можно сопоставить с указанным материалом библиотеки и в автоматическом режиме считать его свойства.

Можно редактировать **Параметры материалов** в команде  или двойным щелчком  на материал в задаче. В модальном окне **Параметры материала** во вкладке **Общее** можно изменить **Имя** и дать **Описание**. Так же можно активировать переключатель **Составной материал** для создания композитов, см. п. [Составные материалы для моделирования композитов](#).



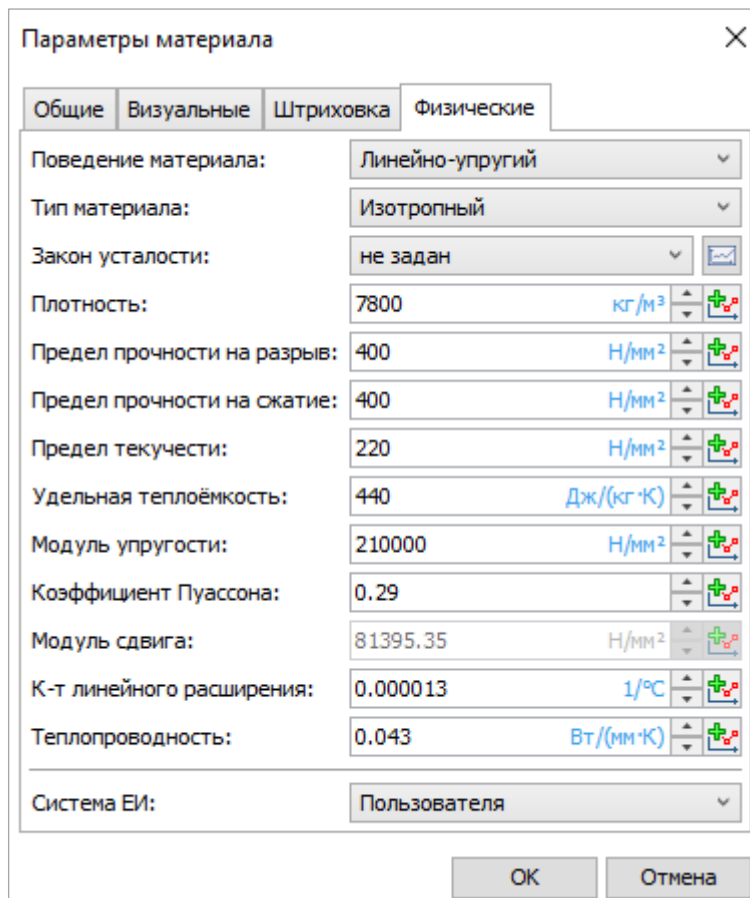
В модальном окне **Параметры материала** во вкладке **Физические** можно:

- определить **Поведение материала** подробнее см. п. [Поведение материала](#);
- определить **Тип материала**;
- определить **Модель материала**;
- задать **Закон усталости** (кроме гиперупругого материала). Выбрать кривую усталости. Команда  позволяет редактировать кривую усталости;
- задать физические свойства материала;
- выбрать **Систему ЕИ** (Единиц измерений).

Для любого свойства материала можно определить его зависимость от температуры, которую можно задать с помощью графика.

Для задания зависимости параметра материала от температуры необходимо добавить график зависимости с помощью команды  справа от параметра. После чего открывается редактор графиков, в котором и задается необходимая зависимость, см. п. [Использование графиков для задания параметров](#).

Для того чтобы температурные зависимости свойств материалов учитывались в процессе расчёта, должна быть активирована соответствующая опция на вкладке **Термоэффекты** в диалоге параметров конкретной задачи.



Параметры материала			
Общие	Визуальные	Штриховка	Физические
Поведение материала:	Линейно-упругий		
Тип материала:	Изотропный		
Закон усталости:	не задан		
Плотность:	7800	кг/м ³	
Предел прочности на разрыв:	400	Н/мм ²	
Предел прочности на сжатие:	400	Н/мм ²	
Предел текучести:	220	Н/мм ²	
Удельная теплоёмкость:	440	Дж/(кг·К)	
Модуль упругости:	210000	Н/мм ²	
Коэффициент Пуассона:	0.29		
Модуль сдвига:	81395.35	Н/мм ²	
К-т линейного расширения:	0.000013	1/°C	
Теплопроводность:	0.043	Вт/(мм·К)	
Система ЕИ:	Пользователя		

OK Отмена

Основные темы в этом разделе:

- [Типы материалов](#)
- [Поведение материала](#)
- [Составные материалы для моделирования композитов](#)

3.2.1.1. ТИПЫ МАТЕРИАЛОВ

В T-FLEX Анализ поддерживаются следующие типы материалов: **Изотропные** и **Анизотропные** (Ортотропный и Трансверсально-изотропный).

3.2.1.1.1. ИЗОТРОПНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Изотропные материалы характеризуются тем, что физические свойства материала (модуль упругости, коэффициент Пуассона, коэффициенты теплопроводности и линейного расширения) считаются инвариантными к направлению ориентации тела в пространстве, т.е. одинаковыми во всех направлениях. Подавляющее большинство конструкционных материалов, используемых в машиностроении и приборостроении, обычно рассматриваются как изотропные.

В диалоговом окне **Параметры материала** во вкладке **Физические** задаются характерные изотропному материалу параметры:

- Модули упругости – E ;
- Коэффициенты Пуассона ν ;
- Коэффициенты линейного расширения;
- Коэффициенты теплопроводности;

Плотность:	7800	кг/м ³	
Предел прочности на разрыв:	400	Н/мм ²	
Предел прочности на сжатие:	400	Н/мм ²	
Предел текучести:	220	Н/мм ²	
Удельная теплоёмкость:	440	Дж/(кг·К)	
Модуль упругости:	210000	Н/мм ²	
Коэффициент Пуассона:	0.29		
Модуль сдвига:	81395.35	Н/мм ²	
К-т линейного расширения:	0.000013	1/°C	
Теплопроводность:	0.043	Вт/(мм·К)	

Типичный порядок действий при задании изотропного материала:

- создать/редактировать **Другой материал**;
- в модальном окне **Параметры материала** во вкладке **Физические** выбрать: поведение материала - «**Линейно-упругий**», тип материала - «**Изотропный**»;
- задать необходимые физические свойства;
- завершить команду.

3.2.1.1.2. АНИЗОТРОПНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Анизотропные материалы отличаются от изотропных тем, что их физические свойства (упругость, коэффициенты Пуассона, теплопроводность и т.д.) имеют различные значения в зависимости от ориентации физического тела в пространстве. Среди всего многообразия анизотропных конструкционных материалов наибольшее практическое значение имеют т.н. **ортотропные** и **трансверсально-изотропные** материалы. T-FLEX Анализ обеспечивает работу с обоими из этих видов анизотропных материалов.

Ортотропный материал

Вид анизотропного материала, для которого имеются три взаимно ортогональные плоскости упругой симметрии, относительно которых его характеристики не изменяются. К таким ма-

териалам относятся древесина, бумага, фанера, (если пренебречь неоднородностью расположения волокон, т.е. размеры образца достаточно велики) композиты регулярного строения (например, слоистый стеклопластик, тканевой стеклопластик).

В диалоговом окне **Параметры материала** во вкладке **Физические** задаются характерные ортотропному материалу параметры:

Модули упругости – E_x , E_y , E_z ;

Коэффициенты Пуассона – ν_x , ν_y , ν_z ;

Модули сдвига – G_x , G_y , G_z ;

Коэффициенты линейного расширения вдоль осей системы координат;

Коэффициенты теплопроводности вдоль осей системы координат.

Плотность:	7800	кг/м ³
Предел текучести:	220	Н/мм ²
Удельная теплоёмкость:	440	Дж/(кг·К)
Предел прочности на разрыв (X Y Z):		
400 Н/мм ²	400 Н/мм ²	400 Н/мм ²
Предел прочности на сжатие (X Y Z):		
400 Н/мм ²	400 Н/мм ²	400 Н/мм ²
Предел прочности на сдвиг (XY, YZ, XZ):		
0 Н/мм ²	0 Н/мм ²	0 Н/мм ²
Модуль упругости (X Y Z):		
210000 Н/мм ²	210000 Н/мм ²	210000 Н/мм ²
Коэффициент Пуассона (XY, YZ, XZ):		
0.29	0.29	0.29
Коэффициент линейного расширения (X Y Z):		
0.000013 1/°C	0.000013 1/°C	0.000013 1/°C
Теплопроводность (X Y Z):		
0... Вт/(мм·К)	0... Вт/(мм·К)	0... Вт/(мм·К)
Модуль сдвига (XY, YZ, XZ):		
81395... Н/мм ²	81395... Н/мм ²	81395... Н/мм ²

Направление осей симметрии определяется системой координат, заданной для каждого элемента.

Один и тот же ортотропный материал может быть задан для нескольких элементов, а для каждого элемента направления осей симметрии могут быть заданы отдельной системой координат.

Главные направления упругости (нормали к плоскостям симметрии) будут направлены вдоль осей системы координат, указанной для элемента. Задать систему координат материала для данного элемента можно с помощью команды [Ориентация материала](#).

Просмотреть, какая ЛСК связана с данным ортотропным телом, можно раскрыв папку Системы координат в дереве задач.

По умолчанию используется глобальная система координат.

Типичный порядок действий при задании ортотропного материала:

- создать/редактировать **Другой материал**;
- в модальном окне **Параметры материала** во вкладке **Физические** выбрать: поведение материала - «**Линейно-упругий**», тип материала - «**Ортотропный**»;
- задать необходимые физические свойства;
- задать каждому элементу «**Ориентацию материала**»;
- завершить команду.

Подробнее:

[Критерии прочности ортотропных материалов](#)

Трансверсально – изотропный

Вид анизотропного материала, для каждой точки которого имеются параллельные плоскости упругой симметрии, в которых вдоль всех направлений его характеристики не изменяются. Ортогонально к плоскостям симметрии располагаются оси симметрии вращения.

Примером таких материалов могут служить слоеные трубки, поперек слоев которых (по радиусу) свойства материала иные, чем вдоль образующей и касательной.

Трансверсально – изотропный материал характеризуется следующими упругими постоянными: модуль упругости E , коэффициент Пуассона ν , и модуль сдвига G , действующие в плоскостях симметрии, при этом . Во всех плоскостях, ортогональных плоскостям симметрии действуют модуль упругости E' , коэффициент Пуассона ν' , и модуль сдвига G' , а для некоторых материалов может выполняться соотношение:

Плотность:	7800	кг/м ³
Предел текучести:	220	Н/мм ²
Удельная теплоёмкость:	440	Дж/(кг·К)
Предел прочности на разрыв:		
X,Y:	400	Н/мм ²
Z:	400	Н/мм ²
Предел прочности на сжатие:		
X,Y:	400	Н/мм ²
Z:	400	Н/мм ²
Предел прочности на сдвиг:		
XZ,YZ:	0	Н/мм ²
Модуль упругости:		
X,Y:	210000	Н/мм ²
Z:	210000	Н/мм ²
Коэффициент Пуассона:		
YZ,XZ:	0.29	
XY:	0.29	
К-т линейного расширения:		
X,Y:	0.000013	1/°C
Z:	0.000013	1/°C
Теплопроводность:		
X,Y:	0.043	Вт/(мм·К)
Z:	0.043	Вт/(мм·К)
Модуль сдвига:		
XZ,YZ:	81395.3488372093	Н/мм ²

В диалоговом окне **Параметры материала** во вкладке **Физические** задаются характерные трансверсально – изотропный материалу параметры:

- Модуль упругости в направлении плоскости симметрии и ортогонально к ней
- Коэффициенты Пуассона в направлении плоскости симметрии и ортогонально к ней
- Модули сдвига в направлении плоскости симметрии и ортогонально к ней
- Коэффициенты линейного расширения, и теплопроводности

Система координат, в которой действуют эти параметры задается также как для ортотропного тела.

Типичный порядок действий при задании свойств трансверсально – изотропный материала

- создать/редактировать **Другой материал**;
- в модальном окне **Параметры материала** во вкладке **Физические** выбрать: поведение материала - «**Линейно-упругий**», тип материала - «**Трансверсально изотропный**»;
- задать необходимые физические свойства;
- задать каждому элементу ЛСК. При необходимости задать закон изменения направления оси Z по пути и закон изменения направления оси Y по нормали к поверхности;
- завершить команду.

3.2.1.2. ПОВЕДЕНИЕ МАТЕРИАЛА

Поведение материала бывает разным в зависимости от его механических свойств. В T-FLEX Анализ возможно моделирование материалов:

- **Линейно-упругих**
- **Гиперупругих (Изотропный):** (модель материала: (Муни-Ривлин (2 константы), Муни-Ривлин (5 констант), Муни-Ривлин (9 констант), Блейц-Ко, Нео-Гука);
- **Пластичных:** (модель материала (Билинейная или Мультилинейная).

3.2.1.2.1. ЛИНЕЙНО-УПРУГИЙ МАТЕРИАЛ

Материал, подчиняющийся закону Гука, который гласит, что удлинение материала пропорционально силе, то есть зависимость между силой и перемещением является линейной и графически представлена прямой линией (рис.1).

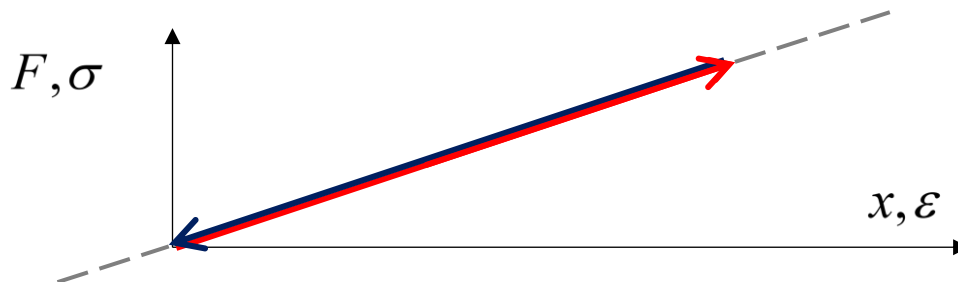


Рис 1: Линейное соотношение между силой F и удлинением x , между напряжением σ и ϵ деформацией. Здесь стрелками показан процесс нагрузки-разгрузки тела

Характеристики материала называются упругими, при линейно пропорциональном смещении относительно приложенной нагрузки, с возвратом к недеформированному состоянию, после снятия нагрузки.

Модель линейно-упругого материала следует применять в случае упруго-пластичного материала, когда прогнозируются напряжения, не превышающие предел текучести σ_T , или в случае хрупкого материала. В противном случае необходимо использовать модель пластичного материала.

Подробнее:

[Диаграмма деформирования модели линейно-упруго материала](#)

3.2.1.2.2. ГИПЕРУПРУГИЙ (ИЗОТРОПНЫЙ) МАТЕРИАЛ

Гиперупругие (сверхупругие) материалы – резиноподобные материалы с низкой жесткостью, которые при деформировании способны многократно изменять свои размеры и существенно изменять форму. Обычно при снятии нагрузки такие материалы возвращают свои первоначальные размеры и форму. Изменение объема гиперупругих тел при деформировании пренебрежимо мало. Поэтому принято считать их условно несжимаемыми (ν -т Пуассона равен 0.49).

К гиперупругим материалами относятся эластомеры: резины, каучуки, полиуретаны и т.п., а также мягкие биологические ткани.

Модели гиперупругих материалов, в отличие от модели линейно-упругих материалов, имеют нелинейную зависимость напряжений от деформаций. Это связано с изменением жесткостных свойств материала в процессе деформирования. Причем даже в рамках одного

материала при разных типах напряженно-деформированного состояния эта зависимость будет отличаться. Так же, в отличие от упруго-пластичных материалов (линейно-упругих и пластичных) материалов, для гиперупругих материалов график зависимости напряжения-деформации не является нечётным, т.е (рис.1):

$$\sigma(-\varepsilon) \neq -\sigma(\varepsilon)$$

Другими словами, гиперупругие материалы, в отличие от упруго-пластичных, не ведут себя (условно) одинаково при растяжении и сжатии, закон одноосного растяжения отличается от закона одноосного сжатия (то же самое с двусосным напряженным состоянием и с чистым сдвигом).

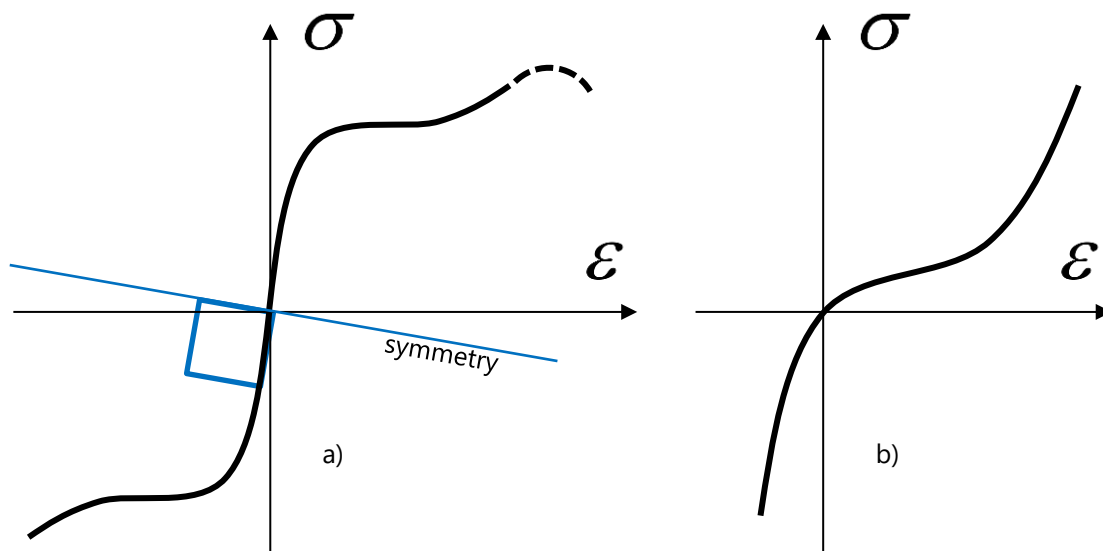


Рис.1. Типовые диаграммы напряжения растяжения-сжатия: а) упруго-пластичных материалов, б) гиперупругих материалов. Здесь голубым цветом показана линия условной симметрии для упруго-пластичного материала

Подробнее:

[Гиперупругий материал. Модель Муни-Ривлина, Нео-Гука, Блейц-Ко;](#)
[Калибровка модели. Данные эксперимента. Коэффициент отклонения.](#)

В T-FLEX Анализе гиперупругий материал поддерживается только для изотропных материалов.

В T-FLEX Анализе реализованы 5 моделей поведения гиперупругого материала: модели Муни-Ривлина с 2, 5, 9 константами, модель Блейц-Ко, модель Нео-Гука.

Для гиперупругого материала параметры можно задавать напрямую (в том числе в виде зависимости от температуры), либо задать (использовать) графики экспериментальных данных.

1) модель Муни-Ривлин (2 константы)

Двухпараметрическая модель Муни – Ривлина хорошо описывает диапазон деформаций растяжения 90–100 %, но достаточно плохо – эффекты жесткости материала и поведение материала при сжатии.

Параметры материала

Общие Визуальные Штриховка Физические

Поведение материала: Гиперупругий (Изотропный)

Модель материала: Муни-Ривлин (2 константы)

Плотность: 7800 кг/м³

Предел прочности на разрыв: 400 МПа

Удельная теплоемкость: 440 Дж/(кг·К)

Коэффициент Пуассона: 0.29

К-т линейного расширения: 0.000013 1/°C

Теплопроводность: 0.043 Вт/(мм·К)

Константы Муни-Ривлина:

1. C10: 0 МПа

2. C01: 0 МПа

Система ЕИ: Пользователя

OK Отмена

2) модель Муни-Ривлин (5 констант)

Пятипараметрическая модель Муни – Ривлина может быть использована для случаев с деформацией до 100–200%.

Параметры материала

Общие Визуальные Штриховка Физические

Поведение материала: Гиперупругий (Изотропный)

Модель материала: Муни-Ривлин (5 константы)

Плотность: 7800 кг/м³

Предел прочности на разрыв: 400 МПа

Удельная теплоемкость: 440 Дж/(кг·К)

Коэффициент Пуассона: 0.29

К-т линейного расширения: 0.000013 1/°C

Теплопроводность: 0.043 Вт/(мм·К)

Константы Муни-Ривлина:

1. C10: 0 МПа

2. C01: 0 МПа

2. C20: 0 МПа

4. C11: 0 МПа

5. C02: 0 МПа

Система ЕИ: Пользователя

OK Отмена

3) модель Муни-Ривлина (9 констант)

Девятипараметрическая модель Муни – Ривлина может быть использована для случаев с деформацией до 100–200%. Однако эта модель требует большого количества констант, описывающих материал.

The screenshot shows the 'Параметры материала' (Material Parameters) dialog box with the 'Физические' (Physical) tab selected. The 'Поведение материала' (Material Behavior) is set to 'Гиперупругий (Изотропный)' (Hyperelastic (Isotropic)). The 'Модель материала' (Material Model) is set to 'Муни-Ривлин (9 константы)' (Mooney-Rivlin (9 constants)).

The following parameters are defined:

Параметр	Значение	Единица
Плотность:	7800	кг/м³
Предел прочности на разрыв:	400	МПа
Удельная теплоемкость:	440	Дж/(кг·К)
Коэффициент Пуассона:	0.29	
К-т линейного расширения:	0.000013	1/°C
Теплопроводность:	0.043	Вт/(мм·К)

The 'Константы Муни-Ривлина' (Mooney-Rivlin Constants) section lists nine constants, all currently set to 0:

Константа	Значение	Единица
1. C10:	0	МПа
2. C01:	0	МПа
2. C20:	0	МПа
4. C11:	0	МПа
5. C02:	0	МПа
6. C30:	0	МПа
7. C21:	0	МПа
9. C12:	0	МПа
9. C03:	0	МПа

The 'Система ЕИ:' (SI System) is set to 'Пользователя' (User).

Buttons: OK, Отмена (Cancel).

4) модель Блейц-Ко

Наиболее применима для сжимаемых вспененных полиуретановых форм каучуков.

Параметры материала

Общие Визуальные Штриховка Физические

Поведение материала: Гиперупругий (Изотропный)

Модель материала: Блейц-Ко

Плотность: 7800 кг/м³

Предел прочности на разрыв: 400 МПа

Удельная теплоемкость: 440 Дж/(кг·К)

Коэффициент Пуассона: 0.25

К-т линейного расширения: 0.000013 1/°C

Теплопроводность: 0.043 Вт/(мм·К)

Начальный модуль упругости: 0 МПа

Система ЕИ: Пользователя

OK Отмена

5) модель Нео-Гук

Модель Нео-Гука может применяться только для деформаций в диапазоне до 30–40 % и до 80–90% чистого сдвига. Это самая простая гиперэластичная модель, в которой используется постоянный модуль сдвига.

Параметры материала

Общие Визуальные Штриховка Физические

Поведение материала: Гиперупругий (Изотропный)

Модель материала: Нео-Гук

Плотность: 7800 кг/м³

Предел прочности на разрыв: 400 МПа

Удельная теплоемкость: 440 Дж/(кг·К)

Коэффициент Пуассона: 0.29

К-т линейного расширения: 0.000013 1/°C

Теплопроводность: 0.043 Вт/(мм·К)

Начальный модуль упругости: 0 МПа

Система ЕИ: Пользователя

OK Отмена

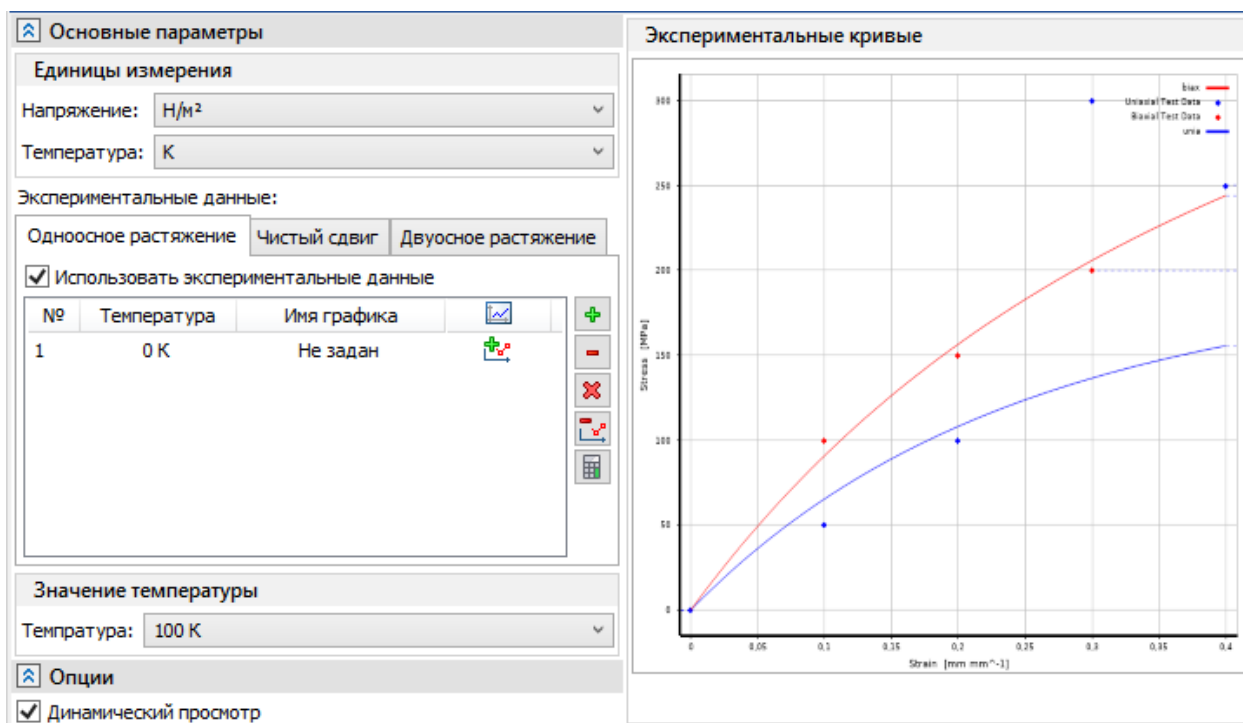
Задание экспериментальных данных

Что бы задать экспериментальные данные для определённой модели гиперупругого материала, в диалоговом окне **Параметры материала** во вкладке **Физические** необходимо вызвать команду . **Использовать экспериментальные данные**. После этого откроется модальное диалоговое окно, где можно выбрать эксперимент (**Одноосное растяжение/Чи-**

стый сдвиг/ Двуосное растяжение) и далее необходимо заполнить таблицу - «Экспериментальные данные»: Температура, Имя графика, График. Для создания графика (кривой эксперимента) используется команда . Открывается редактор графиков, в котором и строится зависимость см. п. [Использование графиков для задания параметров](#). Так же выбирается ЕИ.

С помощью стандартных команд можно:

-  - добавить данные при другой температуре;
-  - удалить строку с данными;
-  - удалить все элементы
-  - удалить график эксперимента
-  - выполнить расчёт констант гиперупругих материалов.



Зависимость свойств от температуры

Отличительной особенностью при задании параметров гиперупругих материалов, зависящих от температуры, то что они должны задаваться совместно при одних и тех же температурах. Для задания зависимости свойств от температуры необходимо в диалоговом окне **Параметры материала** во вкладке **Физические** воспользоваться командой по созданию графика .

Константы Муни-Ривлина:

1. C10:	0	МПа	
2. C01:	0	МПа	
2. C20:	0	МПа	
4. C11:	0	МПа	
5. C02:	0	МПа	
6. C30:	0	МПа	
7. C21:	0	МПа	
9. C12:	0	МПа	
9. C03:	0	МПа	

После чего, открывается модальное диалоговое окно, где необходимо заполнить таблицу.

Основные параметры

Единицы измерения

Напряжение: МПа

Температура: К

Вид: Список

Температурная зависимость:

№	Параметр	Значение
▶ Температура_1		293
▶ Температура_2		600

График изменения параметров от температуры

Параметры отображения

Способ отображения: Все графики

Параметр: Первая константа (C01)

Опции

☒ Динамический просмотр

Задание констант, зависящих от температуры осуществляется в таблице **Температурная зависимость**, которая может быть представлена в двух видах: **Список**, **Таблица**. По умолчанию значения задаются в виде списка.

Температурная зависимость:

№	Параметр	Значение
▲ Температура_1		293
	C01	38
	C10	48
	C20	48
	C11	48
	C02	48

С помощью стандартных команд можно:

-  - добавить температуру;
-  - удалить строку с данными;
-  - удалить все элементы
-  - представить результаты в виде графика;

3.2.1.2.3. ПЛАСТИЧНЫЙ МАТЕРИАЛ

Пластичность — способность материала, не разрушаясь, получать большие деформации при напряжениях, превышающих предел текучести.

В T-FLEX Анализ реализованы две модели пластичного поведения материала: **Билинейная** и **Мультилинейная**.

Подробнее:

[Интенсивность напряжений. Интенсивность деформаций. Деформирование пластичных материалов. Гипотезы, положенные в основу деформационной теории пластичности.](#)

1) Билинейная модель материала

Эта модель пластичности материала используется при анализе больших деформаций. В данной модели диаграмма деформирования аппроксимируется (упрощается) 2 отрезками. Первый отрезок соответствует упругой зоне и характеризуется модулем упругости E , второй отрезок соответствует (упруго-)пластической зоне и характеризуется касательным модулем упрочнения E_T . Переход от упругой зоны к пластической детектируется превышением напряжениями предела текучести σ_T .

Пластическая деформация наблюдается в большинстве материалов, особенно в металлах. Если в материале прогнозируются напряжения, превосходящие предел текучести, следует использовать пластическую модель поведения материала.

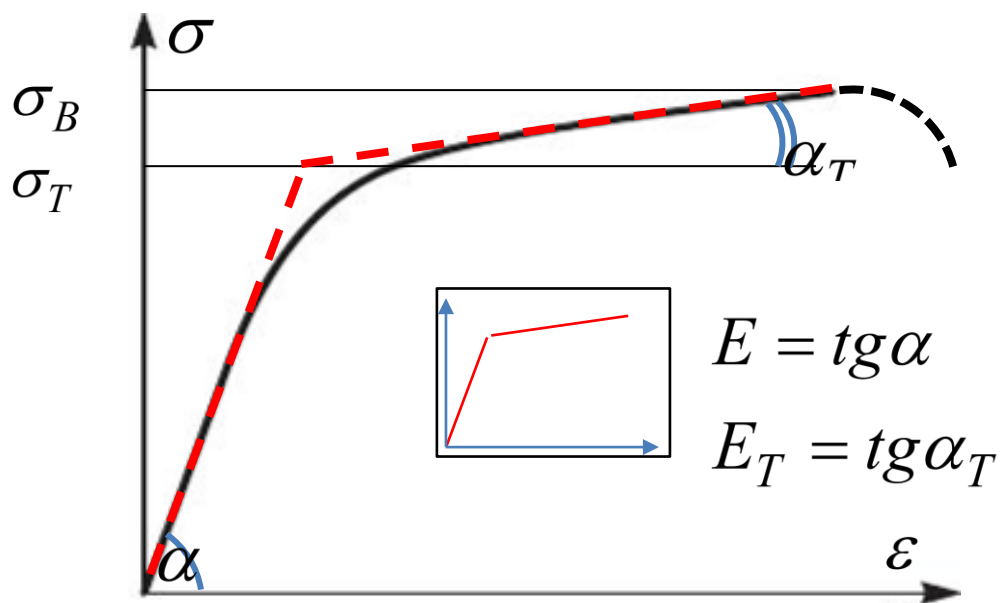


Рис.1. Диаграммы деформирования Билинейной модели пластичности. Кривая черного цвета – реальная диаграмма деформирования, красного – аппроксимированная Билинейной моделью диаграмма деформирования

Для построения билинейной диаграммы деформирования в диалоговом окне **Параметры материала** во вкладке **Физические** необходимо ввести предел текучести σ_T и модуль упрочнения E_T .

Модуль упрочнения E_T можно задавать константой или графиком зависимости от температуры  см. п. [Использование графиков для задания параметров.](#)

Параметры материала			
Общие	Визуальные	Штриховка	Физические
Поведение материала:	Пластичный		
Модель материала:	Билинейная		
Закон усталости:	не задан		
Плотность:	7800	кг/м ³	
Предел прочности на разрыв:	400	Н/мм ²	
Предел прочности на сжатие:	400	Н/мм ²	
Предел текучести:	220	Н/мм ²	
Удельная теплоёмкость:	440	Дж/(кг·К)	
Модуль упругости:	210000	Н/мм ²	
Коэффициент Пуассона:	0.29		
Модуль сдвига:	81395.35	Н/мм ²	
К-т линейного расширения:	0.000013	1/°C	
Теплопроводность:	0.043	Вт/(мм·К)	
Модуль упрочнения:	715	Н/мм ²	
Система ЕИ:	Пользователя		

Параметры материала с билинейной диаграммой деформирования

Типичный порядок действий при задании пластичного материала с билинейной моделью деформирования:

- создать/редактировать **Другой материал**;
- в модальном окне **Параметры материала** во вкладке **Физические** выбрать **поведение материала** - «Пластичный», **модель материала** – «Билинейная»;
- задать необходимые физические свойства;
- завершить команду.

2) Мультилинейная модель материала

Эта модель пластичности материала используется при анализе больших деформаций. В данной модели диаграмма деформирования упрощается до кусочно-линейной функции, состоящей из произвольного количества отрезков. Диаграмма задается явно, т.е. через координаты точек σ - ϵ . При этом первая точка диаграммы соответствует пределу текучести и началу пластической зоны, вторая и последующие точки – пластическим зонам.

Мультилинейная модель отличается от билинейной тем, что разбиение диаграммы растяжения осуществляется не на две, а на произвольное количество отрезков, что позволяет более точно описать поведение реального материала при деформировании. Также установлено, что мультилинейная модель пластичности дает наилучшее согласование с экспериментальными данными, и в отличие от билинейной модели является более информативной.

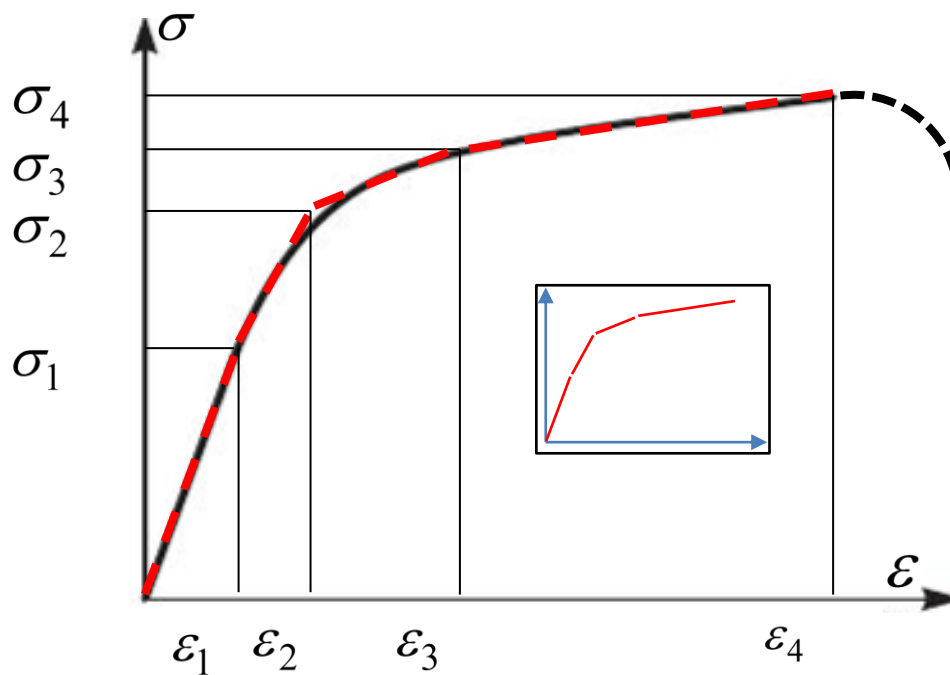


Рис.2. Диаграммы деформирования Мультилинейной модели пластичности. Кривая черного цвета – реальная диаграмма деформирования, красными отрезками – аппроксимированная Мультилинейной моделью диаграмма деформирования

Для мультилинейной модели материала в диалоговом окне **Параметры материала** во вкладке **Физические** необходимо обязательно задать **Закон деформирования** в виде одного графика напряжения-деформации (σ - ϵ), не привязанного к температуре, или в виде набора графиков напряжения-деформации (σ - ϵ), каждый из которых привязан к определенной температуре.

The screenshot shows the 'Параметры материала' (Material Parameters) dialog box with the 'Физические' (Physical) tab selected. The dialog contains several input fields and dropdown menus for defining material properties. The 'Закон деформирования' (Deformation Law) is set to 'Зависимость от температуры' (Dependence on temperature), which is highlighted with a blue icon. Other parameters include density, tensile and compressive strength, specific heat capacity, Poisson's coefficient, linear expansion coefficient, and thermal conductivity. The 'Система ЕИ' (Units System) is set to 'Пользователя' (User).

Параметр	Значение	Единица
Поведение материала:	Пластичный	
Модель материала:	Мультилинейная	
Закон деформирования:	Зависимость от температуры	
Закон усталости:	не задан	
Плотность:	7800	кг/м³
Предел прочности на разрыв:	400	МПа
Предел прочности на сжатие:	400	МПа
Удельная теплоемкость:	440	Дж/(кг·К)
Коэффициент Пуассона:	0.29	
К-т линейного расширения:	0.000013	1/°C
Теплопроводность:	0.043	Вт/(мм·К)
Система ЕИ:	Пользователя	

Задание закона деформирования

В Параметрах материала во вкладке **Физические**, что бы задать закон деформирования для мультилинейной модели материала необходимо воспользоваться командой **Редактировать закон деформирования**. После чего, откроется модальное диалоговое окно, где необходимо заполнить таблицу: **Температура**, **Имя графика**, **График**. По умолчанию **Закон деформирования** задаётся при 0 °C. Для создания графика (закона деформирования) используется команда . Открывается редактор графиков, в котором и задается зависимость напряжения-деформации, см. п. [Использование графиков для задания параметров](#). Так же выбирается ЕИ функции (напряжений).

С помощью стандартных команд можно:

- добавить закон деформирования
- удалить закон деформирования;
- удалить все элементы
- удалить график
- редактировать выбранный график

Закон деформации

Основные параметры

№	Температура	Имя графика	График
1	0 °C	Закон деформирования_1	
2	20 °C	Закон деформирования_2	
3	0 K	Не задан	

Параметры отображения

Единицы измерения

Напряжение: Н/м²

Температура: °C

Значение температуры

Температура: Весь диапазон температур

Типичный порядок действий при задании пластичного материала с мультилинейной моделью деформирования:

- создать/редактировать Другой материал;
- в модальном окне Параметры материала во вкладке Физические выбрать поведение материала - «Пластичный», модель материала – «Мультилинейная»;
- задать Закон деформирования и необходимые физические свойства;
- завершить команду

3.2.1.3. СОСТАВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПОЗИТОВ

Составной материал (композит) состоит из нескольких компонент (материалов), которые представлены в виде отдельных слоев существенно отличающихся по физико-механическим характеристикам и жестко соединенных по всей площади друг с другом.

Обычно в качестве слоев выступают ортотропные (или трансверсально-изотропные) материалы, но могут иметь место и изотропные слои.

В армированных (волоконных) слоях композита разделяют две основные группы компонентов, называемых фазами – армирующие элементы (наполнитель) и матрицу (связующее, рис.1). Армирующие элементы обеспечивают необходимые механические характеристики слоя. Матрица придает слою заданную форму и монолитность, обеспечивает передачу и распределение нагрузки в объеме материала, защищает армирующие элементы от внешних воздействий и обеспечивает их совместную работу.

Свойства многослойных композитов не являются следствием суперпозиции их компонентов. Такое сочетание приводит к созданию нового материала, свойства которого количественно и качественно отличаются от свойств каждого из его составляющих.

Материал предназначен для расчета оболочек. Поэтому присваиваться может только телам-поверхностям.

Итоговые свойства композита зависят не только от свойств и толщин его слоев, но и от порядка их чередования. Нумерация слоев традиционно начинается снизу-вверх относительно нормали к поверхности (рис1). Минимально допустимое число слоев 2.

Каждый слой может являться как однородным (однородным), т.е. **монослоем** – слоем из одного материала, так и составным (**многослойным**) – т.е. композитный слой. Т.о. в качестве слоя композита может выступать другой композит.

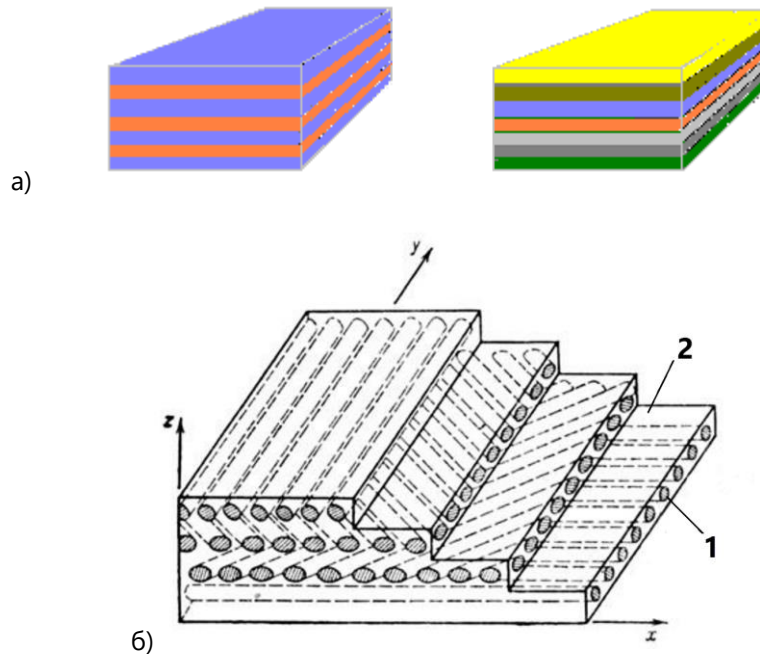


Рис.1.Многослойные композиты: а) внешний вид структуры, б) схема с изображением: 1 – армирующих элементов, 2 – матрицы

Составной материал может быть:

- **Многослойный** - состоящий из двух и более ориентированных определенным образом слоёв;
- **Сэндвич-панель** - состоящий строго из трёх ориентированных определенным образом слоёв.
- **Монослой** - под которым зачастую подразумевают однонаправленный композит. Применяться для моделирования типов «волокнистый композит» и «нанокompозит» на основе «матрицы» и «наполнения»;

Ряд допущений при расчётах:

- компоненты композиционного материала являются однородными и линейно-упругими материалами;
- связующее является изотропным, а волокна могут быть изотропными или трансверсально-изотропными;
- армирующие волокна параллельны друг другу, распределены равномерно и имеют одинаковое сечение;
- сама модель работы композитов предполагает, что между арматурой и связующим существует жесткое сцепление, т. е. отсутствует скольжение. Поры как в арматуре, связующем, так и на поверхности их раздела условно отсутствуют.

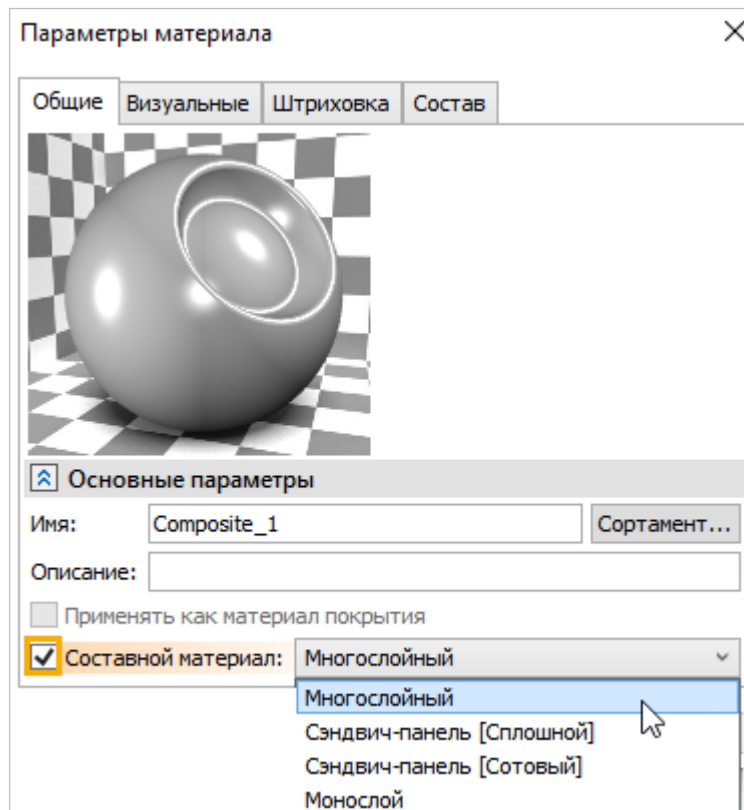
Подробнее:

[Закон деформирования многослойного композита](#)

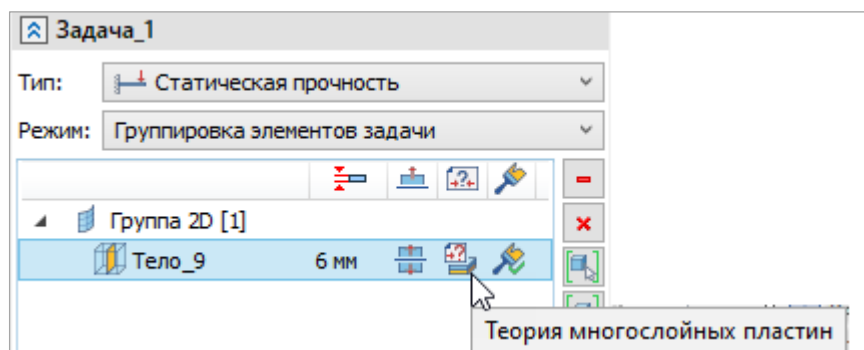
[Критерии прочности слоистых композитов](#)

3.2.1.3.1. МНОГОСЛОЙНЫЙ

В **Параметрах материала** во вкладке **Общее** необходимо активировать переключатель **Составной материал** для создания композитов. Выбрать тип составного материала **Многослойный**.



При включении в задачу элементов с составным материалом типа **Многослойный**, в свойствах задачи для данных элементов необходимо указать гипотезу расчёта – «**Теория многослойных пластин**».



Параметры материала

Общие Визуальные Штриховка Состав

Слоёв: 6 Толщина пакета: 6 мм

☐ Схема укладки: s[-45/0/45]

Слои:

Слой	Материал	Толщина	Угол
6	Углепластик	1 мм	45 °
5	Пенополивинилхлорид (ППВХ)	1 мм	0 °
4	Углепластик	1 мм	-45 °
3	Углепластик	1 мм	-45 °
2	Пенополивинилхлорид (ППВХ)	1 мм	0 °
1	Углепластик	1 мм	45 °

Компоненты монослоя:

Материал	Угол
Стеклоткань	-
Углеродный препрег (230 ГПа)	0 °
Стеклоткань	-

OK Отмена

Есть два способа формирования пакета: через **Схему укладки** или основной способ - вручную, заполняя таблицу «Слой», используя вложенные команды «Управление слоями».

Схема укладки

В **Параметрах материала** во вкладке **Состав** необходимо активировать переключатель **Схема укладки**, после чего, поле становится редактируемым. В нем необходимо задать нужное количество слоёв и углы армирования, где крайнее левое значение угла занимает последний слой, а крайнее правое значение угла первый слой. Параметр «s» в выражении говорит о том, что слои будут симметрично отображены относительно срединной поверхности.

Общие Визуальные Штриховка Состав

Слоёв: 6 Толщина пакета: 6 мм

☒ Схема укладки: s[-45/0/45]

Ориентация углов армирования задаётся для каждого слоя по схеме:

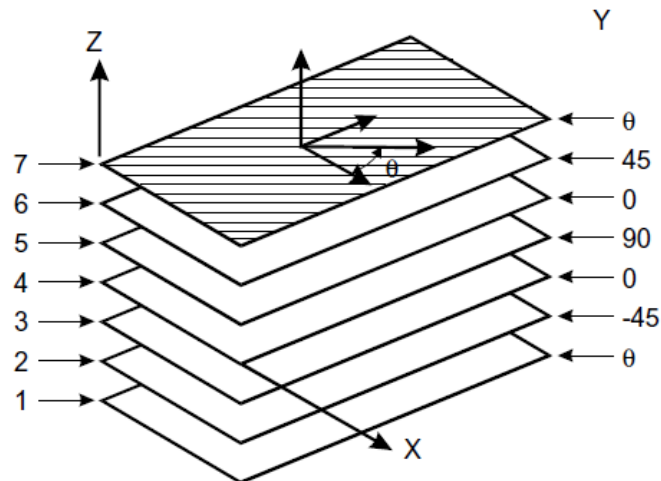
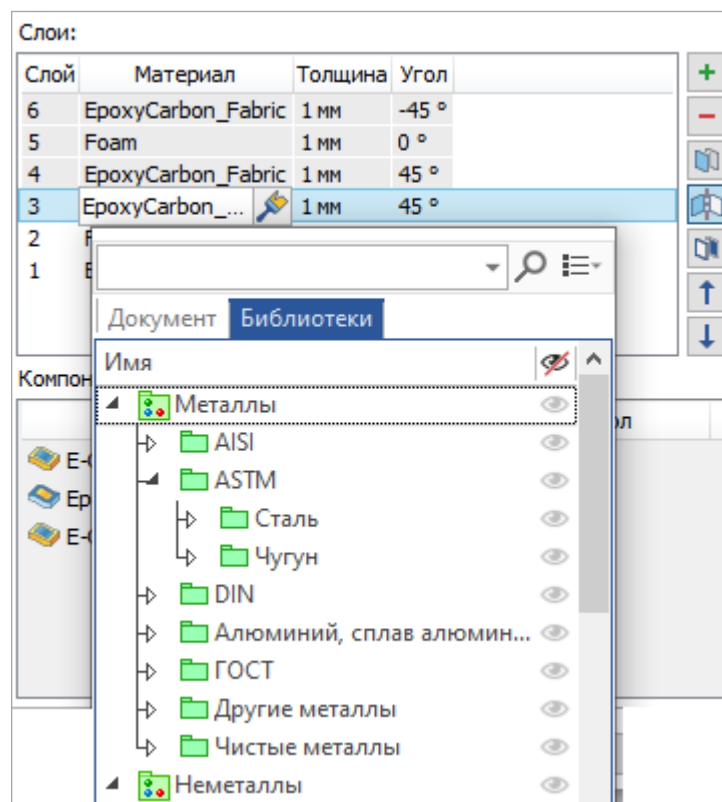


Таблица «**Слои**» заполнится автоматически согласно введенному обозначению. Нумерация слоев осуществляется снизу-вверх. Далее необходимо присвоить материал и толщину слоям. При активации колонки материал появляется стандартное окно «Материалы». Задать материал для слоя можно из документа локальной библиотеки материалов или библиотеки материалов справочников T-FLEX Офис.



Основной способ задания

При этом способе, параметр **Схема укладки** не активирован, необходимо заполнить таблицу «**Слои**» вручную: задать слои, присвоить им материал, толщину и угол укладки.

После создания пакета, в этом же диалоговом окне можно: оценить информацию о следующих параметрах: количестве слоев, суммарной толщине пакета, о составных материалах слоёв, если они были заданы монослоем или многослойным материалом (отображаются в окне - **Компоненты монослоя**).

Суммарная толщина пакета передаётся в задачу для дальнейшего анализа.

При помощи вложенных команд в блоке «Управление слоями» можно:

-  - добавить слой в таблице;
-  - удалить выбранный слой в таблице;
-  - дублировать слои;
-  - отразить слои симметрично (в отраженные строки нельзя вносить изменения);
-  - инвертировать слои (меняет местами слои относительно срединного слоя);
-  - переместить слой выше;
-  - переместить слой ниже.

Типичный порядок действий при задании составного материала типа Многослойный:

- создать/редактировать **Другой материал**;
- в модальном окне **Параметры материала**, во вкладке **Общее** активировать переключатель **Составной материал** и выбрать тип составного материала - **Многослойный**;
- в модальном окне **Параметры материала**, во вкладке **Состав** задать схему укладки, и необходимые параметры для каждого слоя.
- завершить команду.

3.2.1.3.2. СЭНДВИЧ-ПАНЕЛИ

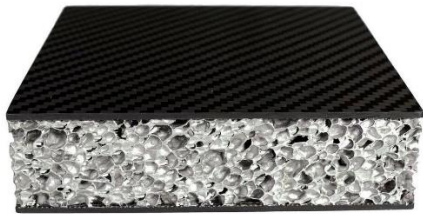
Сэндвич-панели – вид многослойного композита из трех слоев, у которого тангенциальная жесткость промежуточного слоя, называемого сердцевиной или наполнителем, существенно меньше, чем у внешних слоев, называемых обшивкой или покрытием. В качестве сердцевины, как правило, выступают материалы с низкой плотностью.

Для расчёта сэндвич-панелей применяется иной алгоритм, нежели чем для обычных слоистых композитов. Поэтому, если промежуточный слой композита не является «легким», т.е. тангенциальные жесткости всех слоев сопоставимы, то применять теорию Сэндвич-панелей неуместно, а необходимо использовать обычную теорию Многослойных композитов.

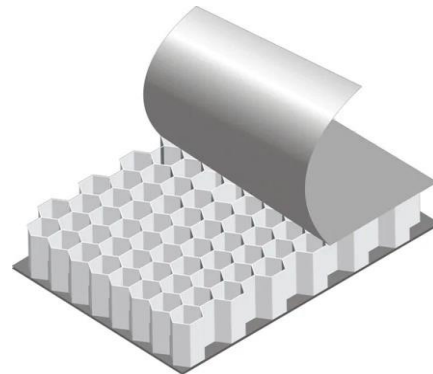
В рамках теории Сэндвич-панели разделят на несколько типов в соответствии со структурой сердцевины:

- **Однородная (гомогенная) сердцевина**

Сердцевина считается условно однородной, т.е. наличие пор в сердцевине допускается, но принимается, что их диаметры достаточно маленькие по сравнению с толщиной сердцевины, а их распределение внутри сердцевины равномерное, сама же сердцевина условно изотропная. Примером однородной сердцевины является металлическая пена, пенопласт, минеральная вата.



- **Сотовая сердцевина (поперечные ячейки)**



- **Гофрированная сердцевина (продольные ячейки)**

Гофрированной сердцевина считается, если гофры или ячейки располагаются вдоль срединной поверхности сэндвич-панели. Если продольные ячейки располагаются в несколько рядов (рис.4.г, д), то сердцевина все равно считается сплошной, а ее толщина – равной суммарной толщине рядов

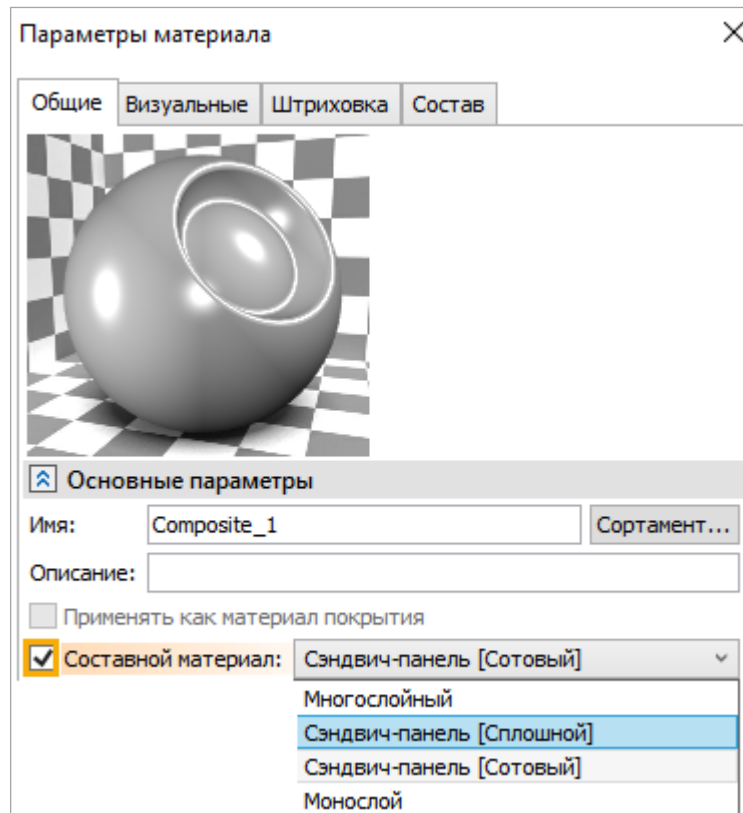


Указание типа сердцевины важно при проведении анализа. В зависимости от типа сердцевины алгоритм расчёта существенно меняется.

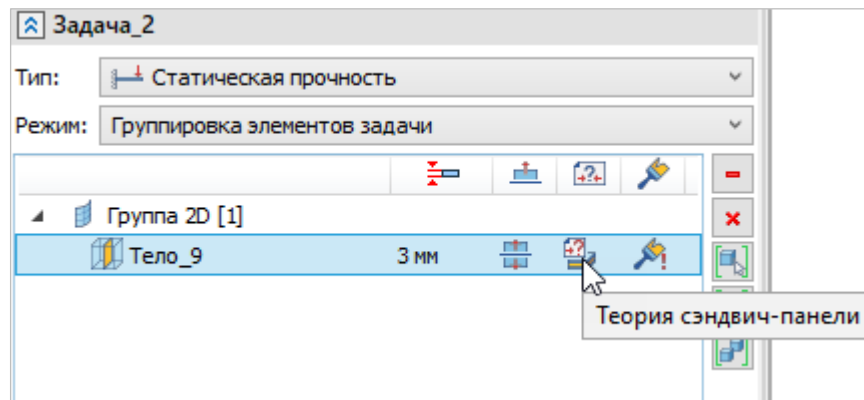
Подробнее:

[Критерии прочности сэндвич-панелей](#)

В **Параметрах материала** во вкладке **Общее** необходимо активировать переключатель **Составной материал** для создания композитов. Выбрать тип составного материала **Сэндвич-панель** (в зависимости от типа структуры **Сплошной** или **Сотовый**).



При включении в задачу элементов с составным материалом типа **Сэндвич-панель**, в свойствах задачи для данных элементов необходимо указать гипотезу расчёта – «**Теория сэндвич-панелей**».



Формирование пакета составного материала типа **Сэндвич-панель** задаётся так же, как и для **Многослойный**, см. п. [Многослойный](#).

Параметры материала

Общие Визуальные Штриховка Состав

Слоёв: 3 Толщина пакета: 3 мм

☐ Схема укладки: [-45/0/45]

Слои:

Слой	Материал	Толщина	Угол
3	Углепластик	1 мм	-45 °
2	Пенополивинилхлорид (ППВХ)	1 мм	0 °
1	Углепластик	1 мм	45 °

Компоненты монослоя:

Материал	Угол
Стеклоткань	-
Углеродный препрег (230 ГПа)	0 °
Стеклоткань	-

OK Отмена

Составной материал типа **Сэндвич-панель** содержит строго **3 слоя** материала (нумерация слоев осуществляется снизу-вверх):

- слой 1 и 3 - покрытие;
- слой 2 – наполнитель (сердцевина).

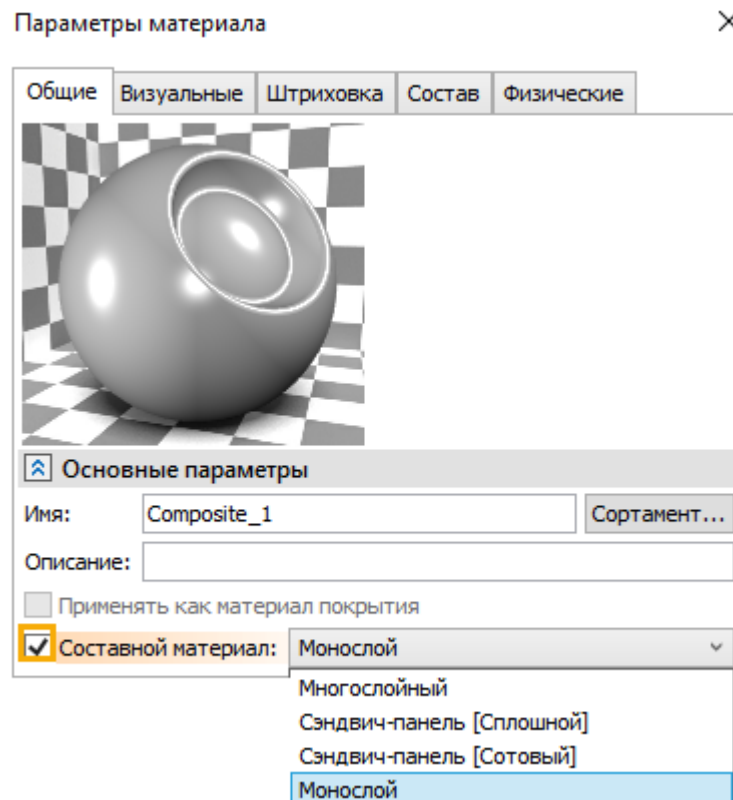
При помощи вложенных команд в блоке «Управление слоями» можно:

- инвертировать слои (меняет местами слои относительно серединного слоя);
- переместить слой выше;
- переместить слой ниже.

Типичный порядок действий при задании составного материала типа Сэндвич-панель:

- создать/редактировать **Другой материал**;
- в модальном окне **Параметры материала**, во вкладке **Общее** активировать переключатель **Составной материал** и выбрать тип составного материала - **Сэндвич-панель (Сплошной/Сотовый)**;
- в модальном окне **Параметры материала**, во вкладке **Состав** задать схему укладки, необходимые параметры для каждого слоя;
- завершить команду.

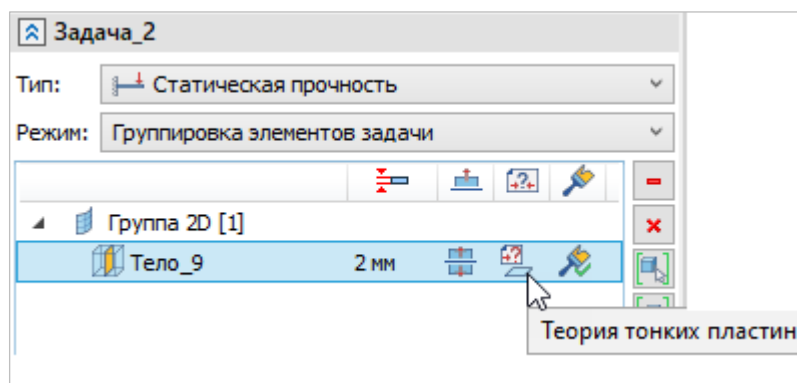
В **Параметрах материала** во вкладке **Общее** необходимо активировать переключатель **Составной материал** для создания композитов. Выбрать тип составного материала **Монослой**.



При включении в задачу элементов с составным материалом типа **Монослой**, в свойствах задачи для данных элементов необходимо указать гипотезу расчёта – «**Теория тонких пластин**».

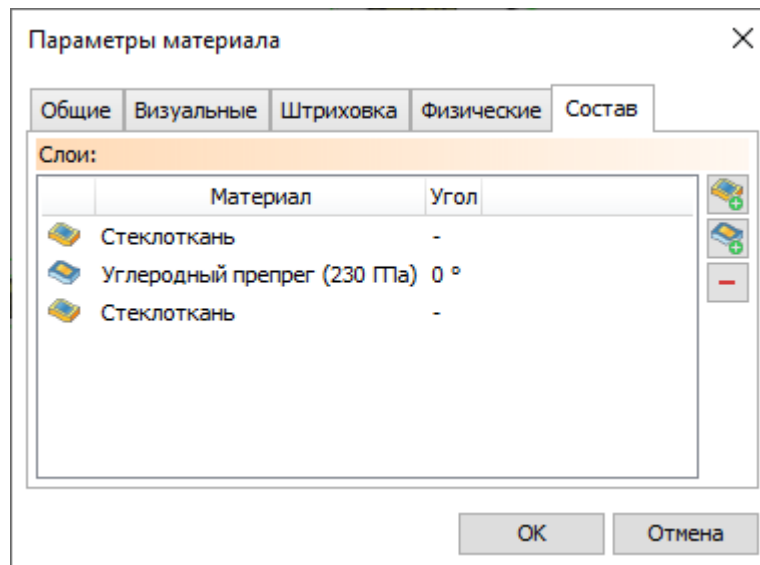
Подробнее:

[Теория тонких и толстых пластин](#)



В **Параметрах материала** во вкладке **Физические** задаются характерные ортотропному материалу параметры, см. п. [Анизотропные материалы](#).

В **Параметрах материала** во вкладке **Состав** необходимо задать компоненты, монослоя (матрица, наполнение), далее присвоить материал и угол.



При помощи вложенных команд можно:

- создать матрицу;
- создать наполнение;
- удалить матрицу/наполнение.

Типичный порядок действий при задании составного материала типа Монослой:

- создать/редактировать **Другой материал**;
- в модальном окне **Параметры материала**, во вкладке **Общее** активировать переключатель **Составной материал** и выбрать тип составного материала - **Монослой**;
- в модальном окне **Параметры материала**, во вкладке **Физические** задать свойства ортотропного материала;
- в модальном окне **Параметры материала**, во вкладке **Состав** задать схему укладки, и необходимые параметры для каждого компонента;
- завершить команду.

3.2.1.3.4. СВОЙСТВА СОСТАВНОГО МАТЕРИАЛА В ЗАДАЧЕ

Если элемент задачи задан составным материалом, то для таких элементов в задаче с помо-

щью команды **Материал** , пользователь может просмотреть его свойства в виде:

- Параметров материала**;
- Схемы укладки**;
- Полярной диаграммы**.

Материал

✓
🔍
✗

Основные параметры

Представление: По материалам

▶ Слоистый композит

☒ Другой материал Слоистый композит PE

Параметры материала

Слои

Слои:

Слой	Материал	Толщина	Угол	Цвет
6	Углепластик	3 мм	45 °	Синий
5	Пенополивинилхлорид (ППВХ)	1 мм	0 °	Зелёный
4	Углепластик	3 мм	-45 °	Красный
3	Углепластик	3 мм	-45 °	Красный
2	Пенополивинилхлорид (ППВХ)	1 мм	0 °	Зелёный
1	Углепластик	3 мм	45 °	Синий

Компоненты слоя:

Материал	Угол
Стеклоткань	-
Углеродный препрег (230 ГПа)	0 °
Стеклоткань	-

☒ Полярная диаграмма

Схема укладки

Вид: Таблица

Схема укладки:

☒ Оболочка в целом

☒ Слои

☒ Вложенные слои

Подпись:

☒ Номер слоя

☒ Материалы

☒ Углы

☒ Толщины

Отображение толщин: Равномерное

Масштабный к-т: 1

Раскраска слоёв: Заливка и углы укладки

№		Материал	Угол	Толщина
4		Углепластик	45 °	1 мм
5		Пенополивинилхлорид (ППВХ)	0 °	1 мм
6		Углепластик	-45 °	1 мм
3		Углепластик	-45 °	1 мм
2		Пенополивинилхлорид (ППВХ)	0 °	1 мм
1		Углепластик	45 °	1 мм

Параметры материала

Параметры материала служат для отображения информации о составном материале (количество слоёв, материале, толщине, углах армирования). Есть возможность управления цветом для слоя составного материала, который в последующем попадет в **Схему укладки**.

Схема укладки

Для лучшей оценки и визуализации схемы укладки пакета пользователь сам настраивает необходимые ему параметры:

- **Вид.** Схема укладки может быть представлена в виде **Графика** или **Таблицы**.
- **Схема укладки.** Пользователь сам отмечает необходимые ему параметры для отображения в схеме укладки: **Оболочка целиком**, **Слои**, **Вложенные слои**, **Номер слоя**, **Материалы**, **Углы**, **Толщины**.
- **Отображение толщин.** Отображать толщину оболочек можно в различном представлении:
 - **Реальное** – график показывается в реальных толщинах заданных слоёв;
 - **Равномерное** – показываются все слои и подслои в одинаковом размере. Можно сочетать с заданием масштабного коэффициента;
 - **Масштабный коэффициент** – график показывается с учётом реальных толщин умноженного на масштабный коэффициент.

Для табличного представления используется только **Равномерное** отображение толщин, без использования масштаба.

- **Масштабный коэффициент.** В активном поле задаётся коэффициент, на который будет умножена толщина слоёв и подслоёв.
- **Раскраска слоёв.** Для отображения визуального представления слоя и подслоя на схеме укладки можно выбрать раскраску слоев:

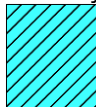
- Только заливка;



- Только углы укладки;



- Заливка и углы укладки.



Полярная диаграмма

Полярная диаграмма – это график, характеризующий изменения инженерных констант при повороте ламината от 0 до 360 градусов. Этот график характеризует анизотропию ламината и показывает при каких углах модули упругости и модуль сдвига достигают своих максимальных и минимальных значений.

3.2.2. ОРИЕНТАЦИЯ МАТЕРИАЛА

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Подготовка модели > Материал > Ориентация материала
Клавиатура	Текстовое меню
<Q3>	Анализ > Подготовка модели > Ориентация материала

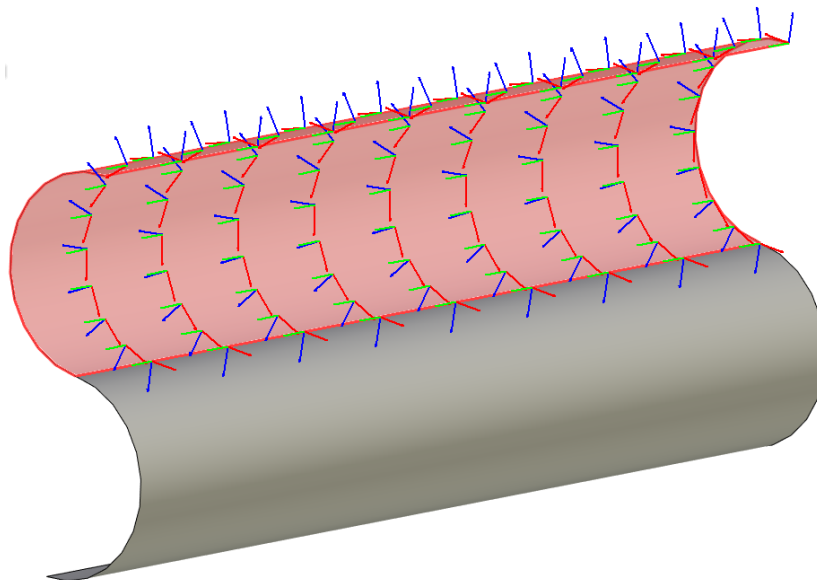
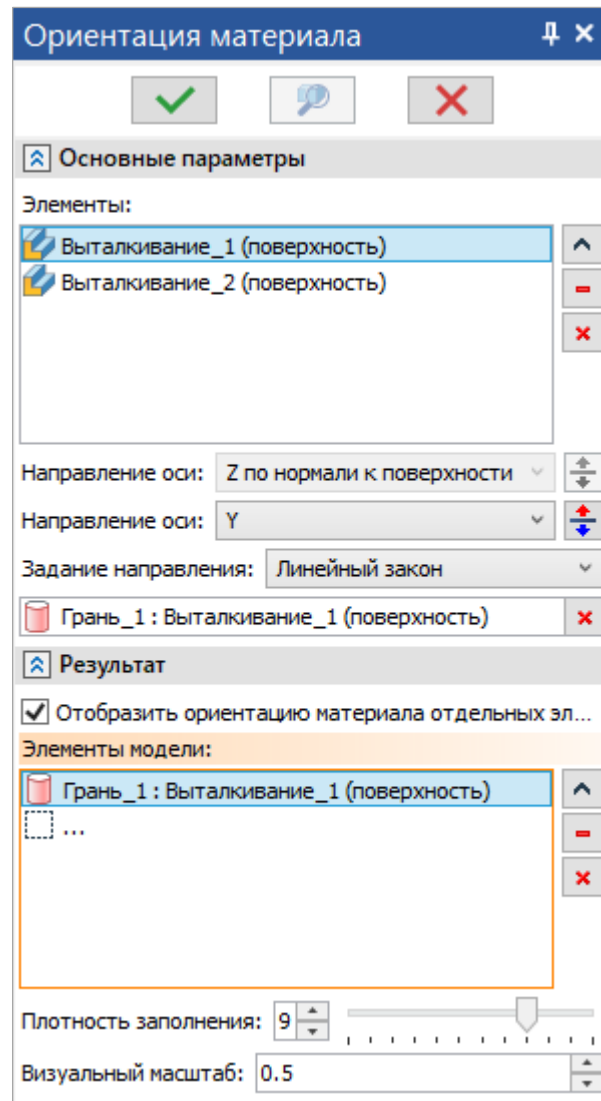
Команда **Ориентация материала** необходима для определения направлений ортотропных, трансверсально-изотропных материалов и составных материалов, которые назначаются этим объектам.

Ориентация материала для пластинчатых тел

Пластинчатое тело может моделировать как однослойный материал, так и многослойный. В случае использования многослойного материала необходимо установить базовую систему координат и опорную поверхность.

Для выбранных элементов необходимо задать на выбор направление двух осей. Задание направления может осуществляться:

- по **Системе координат**;
- **Линейному закону**;
- **По нормали к поверхности**.

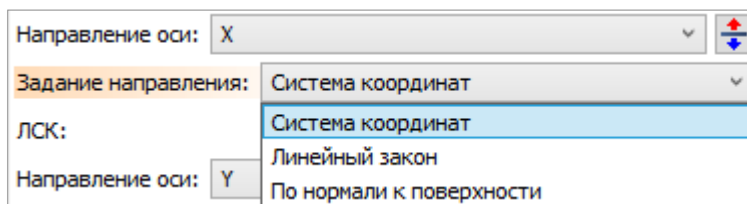


Задание ориентации материала для пластины

Ориентация материала для объёмных тел

Для выбранных элементов необходимо задать на выбор направление двух осей. Задание направления может осуществляться:

- по **Системе координат**;
- **Линейному закону**;
- **По нормали к поверхности**.



Направление третьей, оставшейся, оси вычисляется автоматически из условия ортогональности и правой тройки векторов.

При выборе режима по **Системе координат**, необходимо указать в поле заранее созданную ЛСК или создать ее из-под диалога. Оси ЛСК должны быть однозначно определены, как того требует конкретная задача.

При выборе режима **Линейный закон** в качестве элемента направления можно выбрать грани, рёбра и 3D кривые.

При выборе режима **По нормали к поверхности** в качестве элемента направления можно выбрать только грани.

При выборе любого режима активируются советующие фильтры выбора геометрических объектов, а именно:



<Ctrl+Alt+Q> - выбрать грани;



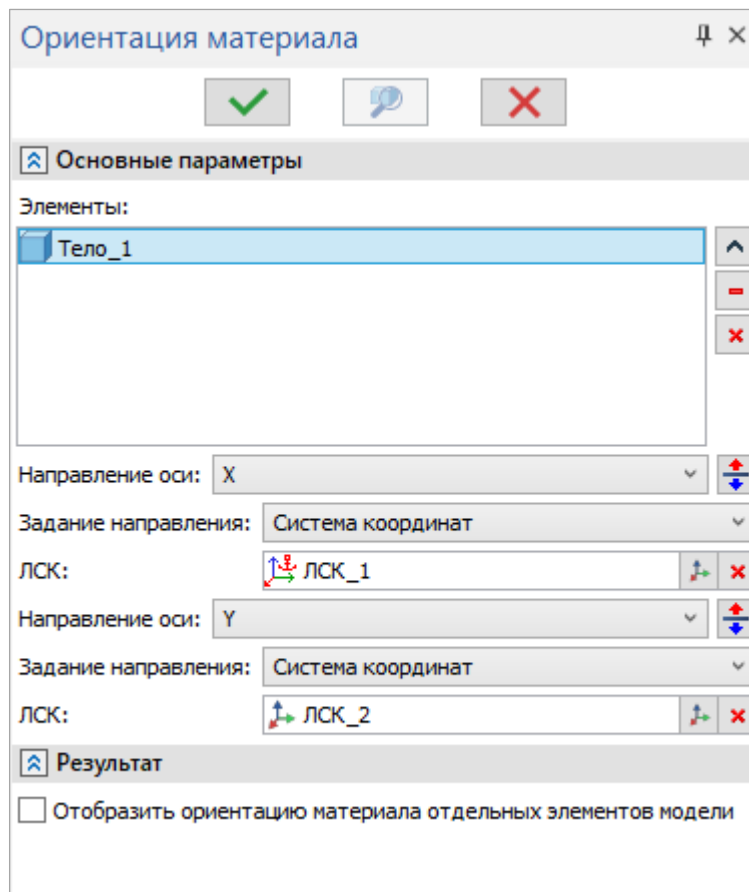
<Ctrl+Alt+E> - выбрать рёбра;



<Ctrl+Alt+H> - выбрать 3D кривые;



<Ctrl+Alt+L> - выбрать ЛСК.



3.2.3. БИБЛИОТЕКА МАТЕРИАЛОВ

Каждый материал элемента задачи является материалом документа, т.е. локальным материалом, определённым только в рамках документа.

Прямую ссылку материала элемента задачи на внешний материал библиотеки создать нельзя. При помощи команды **Сопоставить материалы** можно задавать связь между материалами документа и материалами библиотек.

Это решает следующие важные задачи:

- Материалы элементов задачи никогда не будут потеряны при передаче документа с расчётами на другие рабочие места;
- Материалы элементов задачи можно быстро и легко связать (сопоставить) с материалами любой внешней библиотеки, не изменяя каждый раз имена материалов и без правок ссылок в каждом элементе задачи.
- Контроль пользователем процесса изменения физических параметров материалов элементов задачи.

Работа с материалами осуществляется в окне **Материалы**.

Пиктограмма	Лента
	3D Модель > Стилъ > Материалы Сборка > Стилъ > Материалы
Клавиатура	Текстовое меню
<Alt+8>	Настройка > Окна > Материалы

Подробно о всех возможностях работы с окном **Материалы** можно прочесть в справке **T-FLEX CAD**. Работа с окном **Материалы** предоставляет для пользователя много сценариев работы с материалами документа:

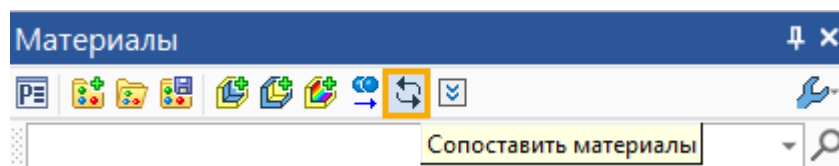
- можно создавать свои пользовательские библиотеки на основе уже существующих материалов других библиотек;
- можно создавать каждый материал заново;
- можно копировать материалы других библиотек и вносить в них правки;
- можно использовать только материалы других библиотек и не создавать пользовательскую библиотеку;
- можно скопировать материал библиотеки в документ и указать сопоставление;
- можно сначала создать материал документа, а потом сопоставить его с материалом библиотеки.

Имена материалов документа можно назначать как в библиотеке или давать отличные имена.

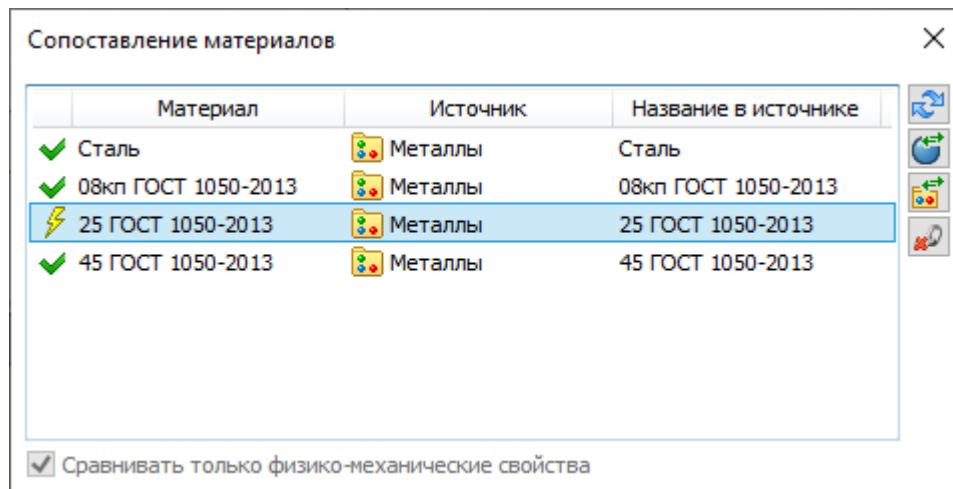
Для передачи свойств материала библиотеки в материал документа нужно их сопоставить.

Материалы документа будут автоматически сопоставлены с материалами стандартной библиотеки если были из неё скопированы.

Команда **Сопоставить материалы** доступна в окне **Материалы**.



Команда **Сопоставить материалы** вызывает специальное окно сопоставления.



Если физические параметры материала документа отличаются от сопоставленного библиотечного материала, то в первой колонке будет пиктограмма ⚡. Если физические параметры идентичны - пиктограмма ✓. Если невозможно автоматически сопоставить материал из-за того, что библиотека содержит несколько идентичных материалов - в первой колонке будет пиктограмма .

В таблице «Сопоставление материалов» колонка:

- **Материал** - имя материала документа;
- **Источник** - имя библиотеки с сопоставляемым материалом;
- **Название в источнике** - имя сопоставляемого библиотечного материала.

При помощи вложенных команд можно:



- Обновить. Команда доступна для материалов документа у которых были найдены отличия физических параметров от физически параметров сопоставляемого библиотечного материала. Команда изменяет физические параметры материала документа делая их идентичными библиотечному материалу;



- Связать с материалом из библиотеки. Позволяет вручную задать сопоставление материала документа с нужным материалом конкретной библиотеки. При вызове этой команды будет открыто окно просмотра материалов документа и библиотек;



- Связать с одинаковым материалом из библиотеки. Позволяет автоматически задать сопоставление материала документа с материалом указанной библиотеки на основе идентичности физических параметров;



- Сбросить связь. Разрывает сопоставление материала документа с материалом библиотеки.

3.3. УПРАВЛЕНИЕ СЕТКОЙ

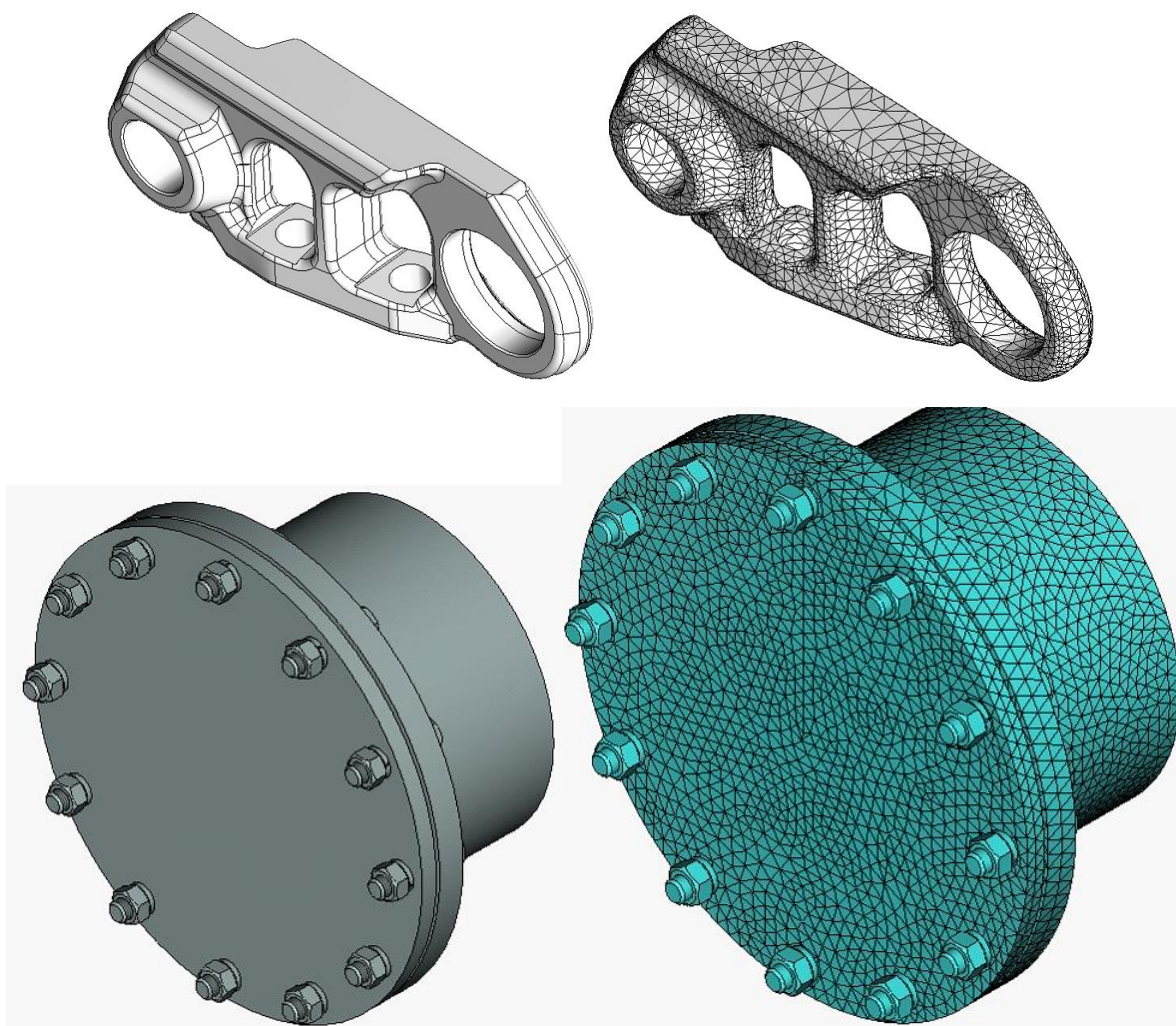
Типы конечно-элементных сеток

В зависимости от геометрических особенностей конструкции, в T-FLEX Анализ возможно построение конечно-элементных моделей следующих типов:

- тетраэдральная конечно-элементная модель;

- пластинчатая конечно-элементная модель;
- балочная конечно-элементная модель;
- гибридная конечно-элементная модель.

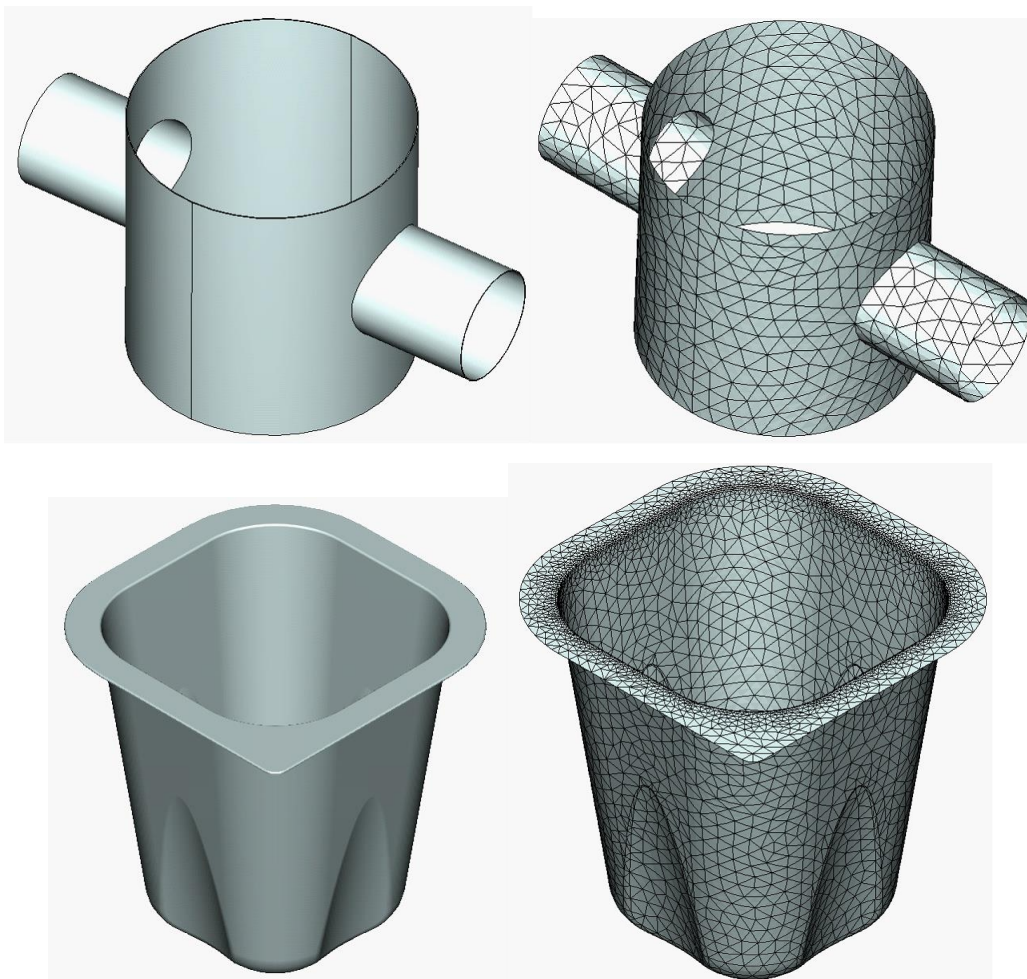
Тетраэдральная конечно-элементная модель. В данном случае для аппроксимации геометрии моделируемого изделия используется объёмные конечные элементы тетраэдральной формы. Тетраэдральная конечно-элементная сетка хорошо аппроксимирует сколь угодно сложную форму изделия и обеспечивает удовлетворительные результаты моделирования физических задач для объектов произвольной формы, характерные геометрические размеры которых по трём измерениям (длина, ширина, высота) сопоставимы между собой. К таким объектам можно отнести большинство деталей и узлов традиционного машиностроения и приборостроения. Сетка может быть создана для группы 3D с настроенными параметрами или параметрами по умолчанию см. п. [Параметры сетки](#).

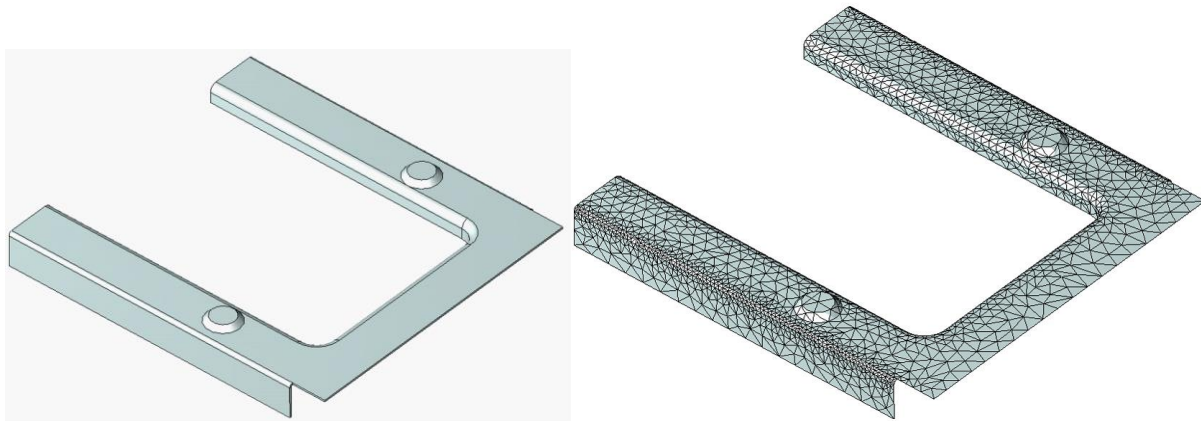


Тетраэдральные конечно-элементные модели

Пластинчатая конечно-элементная модель. В данном случае для аппроксимации геометрии моделируемого изделия используется пластинчатые (оболочочные) треугольные конечные элементы. Сетка может быть создана для группы 2D с настроенными параметрами или

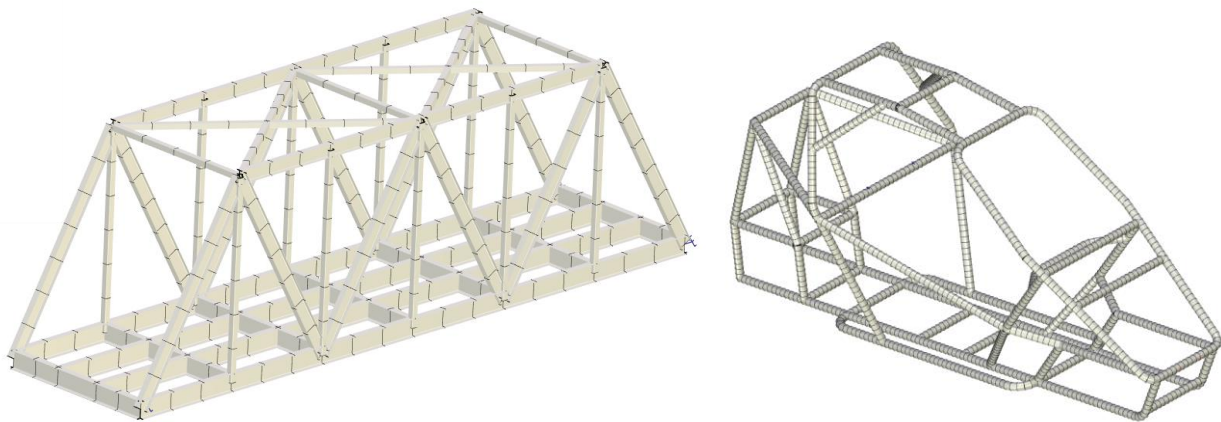
параметрами по умолчанию см. п. [Параметры сетки](#). Как правило, такими элементами моделируются тонкостенные конструкции, характерные геометрические размеры которых одно из измерений (толщина) значительно меньше двух других ширины и длины. Например, в машиностроении такими конструкциями могут служить корпуса всевозможных машин, улитки турбин; в приборостроении – гибкие упругие элементы: сильфоны, мембраны, в том числе гофрированные, тарельчатые пружины; в строительстве – покрытия и перекрытия, пандусы, навесы и козырьки; в кораблестроении – корпуса судов; в авиастроении – фюзеляжи и крылья самолётов; в промышленности – всевозможные емкости: цистерны, резервуары и т.п.





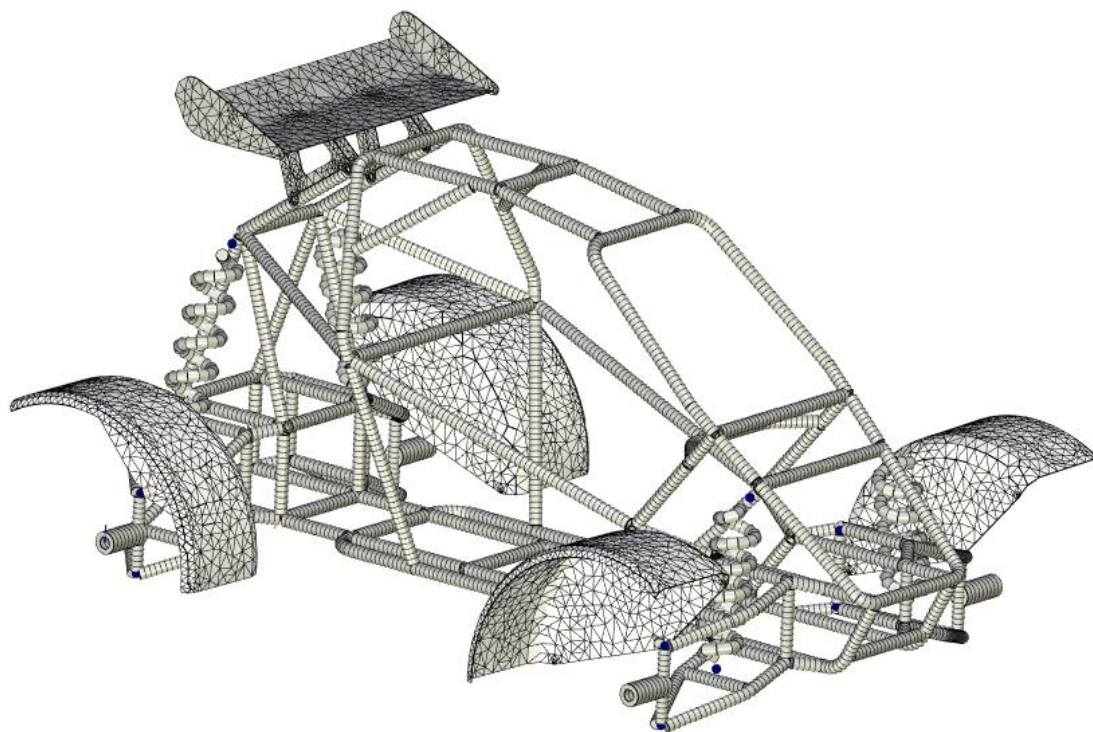
Пластиначные конечно-элементные модели

Балочная конечно-элементная модель В данном случае геометрия конструкции будет представлена балочными конечными элементами. Балочный элемент является линейным элементом, определенным двумя конечными точками и поперечным сечением. Сетка может быть создана для группы 1D с настроенными параметрами или параметрами по умолчанию см. п. [Параметры сетки](#).



Балочные конечно-элементные модели

Гибридная конечно-элементная модель В данном случае для аппроксимации сложной геометрии моделируемого изделия используются конечные элементы всех трёх типов: тетраэдральные, пластиначные (оболочочные) и балочные. Сетка может быть создана для всех групп с настроенными параметрами или параметрами по умолчанию см. п. [Параметры сетки](#).



Гибридная конечно-элементная модель «Багги»



Гибридная конечно-элементная модель «Многоэтажное здание»

Назначение и роль сеток

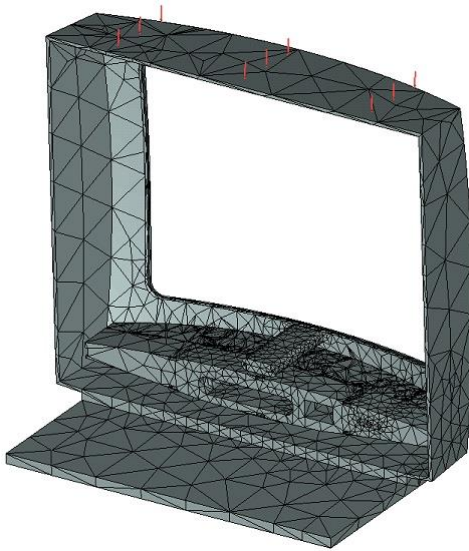
Основное назначение конечно-элементной сетки – аппроксимация геометрии моделируемого тела, учитывающая все важные для расчёта нюансы геометрии изделия.

Препроцессор T-FLEX Анализа имеет эффективный автоматический генератор конечно-элементных сеток, который позволяет пользователю управлять различными режимами генерации сеток, чтобы получать сетки нужного качества на разных моделях.

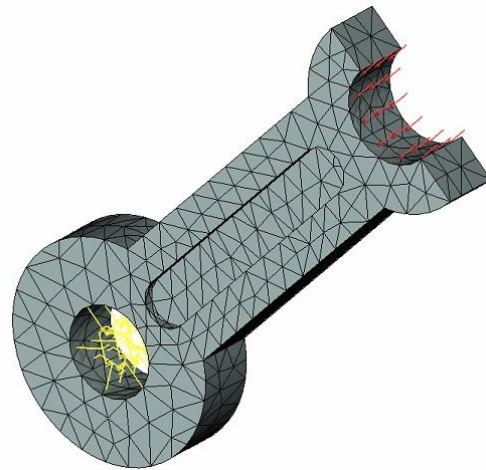
В T-FLEX Анализ для построения конечно-элементных сеток используются объёмные тетраэдральные, пластинчатые(оболочные) треугольные и балочные конечные элементы, которые, теоретически, позволяют с любой требуемой точностью аппроксимировать произвольную геометрию большинства изделий. Однако необходимо отметить несколько предварительных рекомендаций, касающихся корректности расчётных моделей при использовании конечных элементов.

Во-первых, точность получаемого решения может зависеть от **формы** конечных элементов. Наилучшие результаты конечно-элементного моделирования достигаются, если элементы

(тетраэдры и треугольники), образующие сеточную модель, близки по форме к равнобедренным. Особенно это справедливо для тетраэдральных элементов. Напротив, если сеточная модель содержит конечные элементы, у которых ребра, образующие элементы имеют сильно отличающиеся размеры, результаты моделирования могут иметь недостаточную точность. В этом случае, желательно, используя параметры настроек генератора конечно-элементных сеток, добиться уменьшения количества подобных элементов (подробнее см. п. [Параметры сетки](#)).

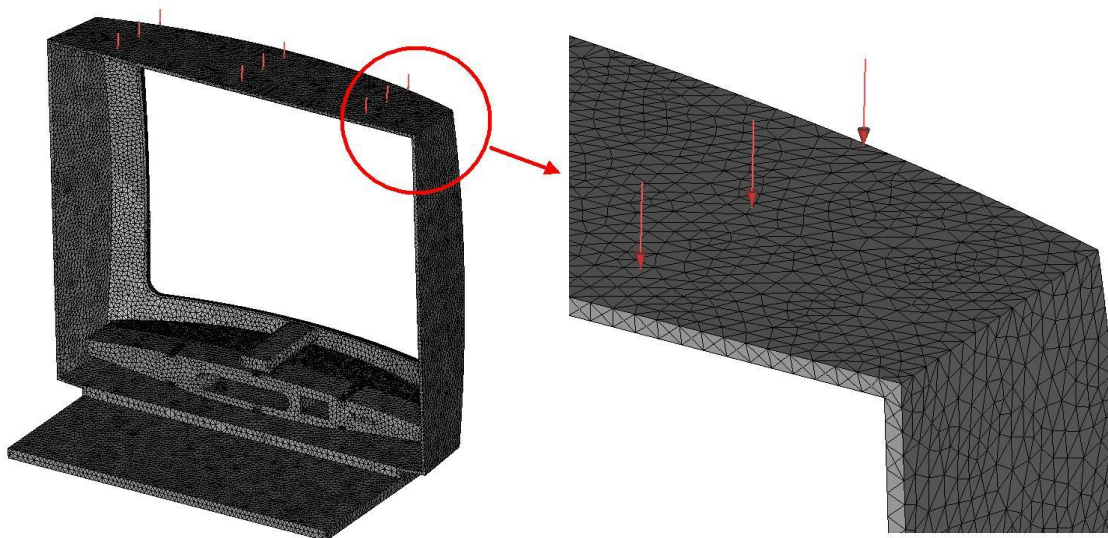


Не структурированная сетка КЭ модели



Структурированная сетка КЭ модели

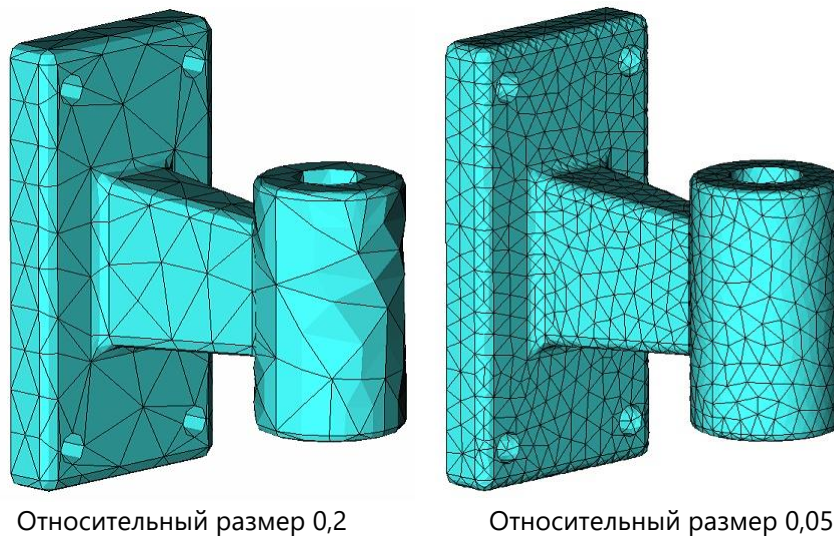
Таким образом, необходимо визуально или с помощью «**Параметров сетки**» контролировать «качество» построенной конечно-элементной модели, добиваясь по возможности создать на модели регулярную сетку.



КЭ модель, полученная после использования настроек параметров сетки

Во-вторых, кроме формы конечных элементов на качество решения определяющим образом влияет также степень дискретизации исходной геометрической модели, т.е. «густота»

конечно-элементной сетки. Пользователь может управлять этим параметром генератора сеток, указывая относительный или абсолютный средний размер конечных элементов, аппроксимирующих геометрию тела или меняя параметры, влияющие на генерацию сетки на криволинейных моделях. Обычно, более мелкое разбиение даёт лучшие по точности результаты. Однако следует помнить, что аппроксимация модели большим количеством маленьких конечных элементов неизбежно приводит к системе алгебраических уравнений большого порядка, что может существенно сказаться на скорости выполнения расчёта. Оценить качество конечно-элементной модели можно последовательным решением нескольких задач с различными возрастающими степенями дискретизации. Если решение (например, максимальные перемещения и напряжения) перестают заметно меняться при использовании более густой сетки, то можно со значительной долей уверенности считать, что мы достигли некоторого оптимального уровня дискретизации и дальнейшее увеличение дискретизации сетки нерационально.



Во многих случаях ориентировочным минимальным уровнем разбиения можно считать разбиение тела на два-три слоя конечных элементов в направлении действия нагрузок и предполагаемых перемещений.

Кроме того, средствами генератора сеток возможно искусственное создание «сгущений» сетки в областях модели с резко меняющейся кривизной, в которых можно ожидать больших градиентов искомых величин (например, напряжений).

Таким образом, при построении конечно-элементной модели, необходимо уделять пристальное внимание генерируемой сеточной модели, следя за тем, чтобы конечно-элементная сетка соответствовала геометрии модели и имела достаточное качество с точки зрения обеспечения надёжного и достоверного решения моделируемой физической задачи.

Основные темы в этом разделе:

- [Сетка](#)
- [Анализ сетки](#)

3.3.1. СЕТКА

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Подготовка модели > Сетка
Клавиатура	Текстовое меню
<3MM>	Анализ > Подготовка модели > Сетка

Команда **Сетка** автоматически вызывается после завершения команды [Новая задача](#).

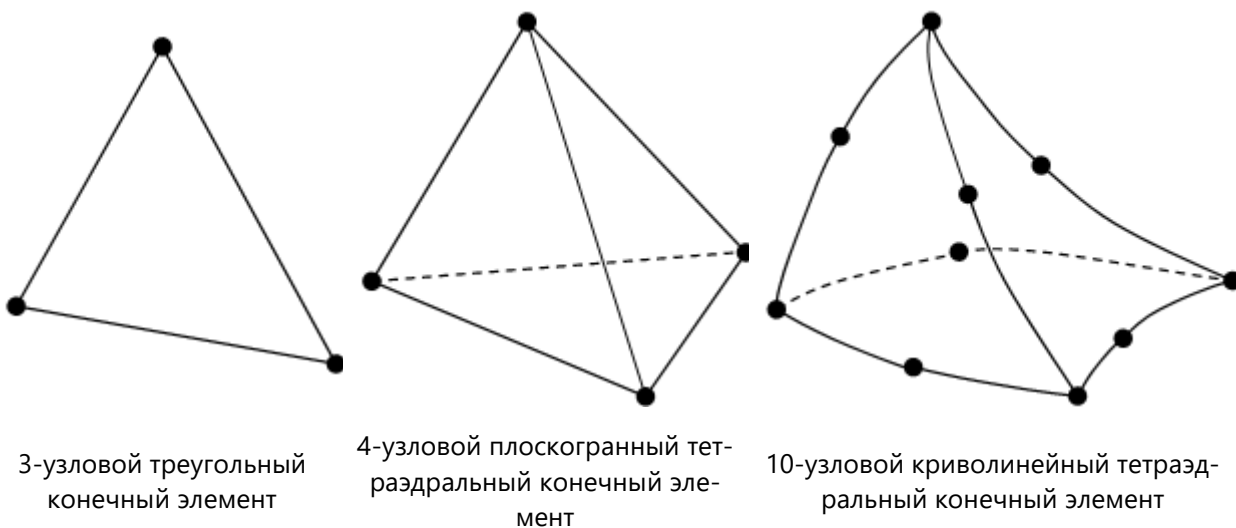
Команда запускает процедуру работы с сеткой в активной задаче. В зависимости от наличия сетки в активной задаче, система будет создавать новую или редактировать существующую сетку.

Сетка создаётся на основе операции, выбранной при создании текущей активной задачи. Для одной задачи может быть создана только одна сетка.

T-FLEX Анализ использует следующие конечные элементы:

- Трёхузловой треугольный конечный элемент. Используется для дискретизации пластин и оболочек;
- Четырёхузловой плоскостной тетраэдральный конечный элемент (линейный тетраэдр). Используется для дискретизации объёмных тел;
- Десятиузловой криволинейный тетраэдральный конечный элемент (квадратичный тетраэдр). Используется для уточнённой дискретизации объёмных тел. Сетка таких элементов строится на основе сетки четырёхузловых элементов. Сетка из десятиузловых элементов используется по умолчанию для большинства типов задач.

Изменить тип сетки с 10-и узловой на 4-х узловую можно в диалоге параметров расчёта см. п. [Расчёт задачи](#).



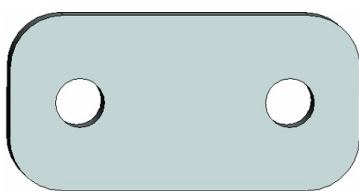
Применение криволинейного конечного элемента позволяет точнее аппроксимировать сложную геометрию границ тела и получать более высокую точность решения при меньшем

числе элементов. Таким образом, для более точного описания сложной геометрии границ необходимо использовать либо большое количество 4-х узловых элементов с прямыми сторонами (гранями), то есть плоскогранных конечных элементов, либо использовать криволинейные элементы.

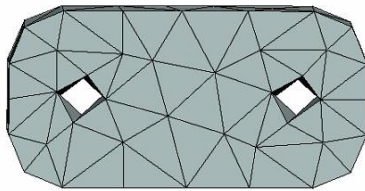
Необходимо заметить, что при одинаковом шаге дискретизации генерация сетки криволинейных элементов требует больше времени, чем генерация сетки плоскогранных элементов, особенно на моделях с большим количеством радиусов и скруглений. В отдельных случаях сетка криволинейных элементов может не строиться совсем.

Поэтому, если для конкретной модели сложной геометрической формы не удаётся построить сетку из криволинейных конечных элементов, или генерация такой сетки занимает слишком много времени, рекомендуется построить сетку плоскогранных конечных элементов с достаточно мелким шагом дискретизации, и использовать для расчёта её.

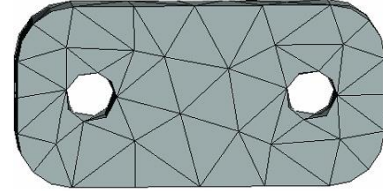
На иллюстрации ниже приведены примеры разбиения модели на конечные элементы каждого типа.



Исходная модель

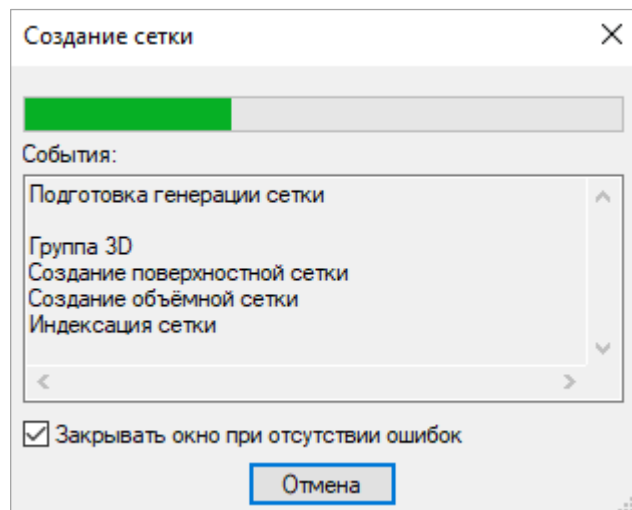


Сетка из плоскогранных элементов



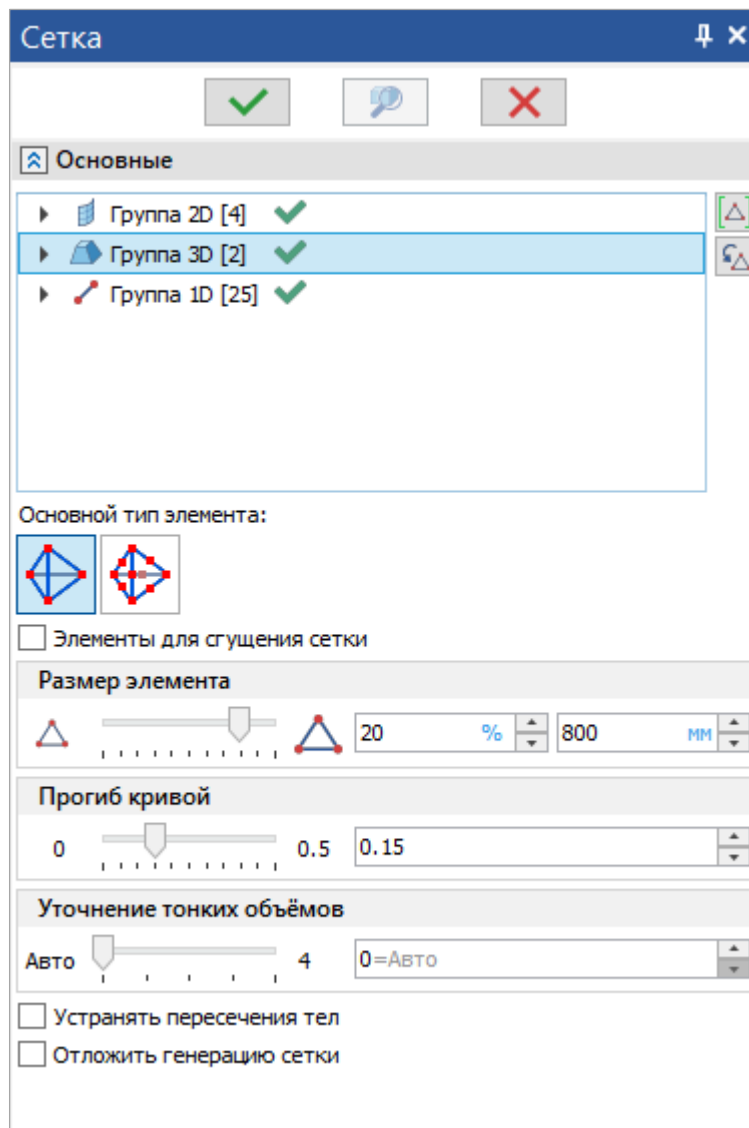
Сетка из криволинейных элементов

В момент построения сетки, система выводит служебное окно, в котором отображает ход процесса генерации. В этом окне есть кнопка **Отмена**, при помощи которой можно остановить процесс расчёта сетки.



3.3.1.1. ПАРАМЕТРЫ СЕТКИ

Функциональность создания сетки по группам позволила задействовать новые сценарии при работе с сеткой см. п. [Сценарии построения сетки](#).



Что бы построить сетку на расчётной геометрии необходимо настроить следующие параметры:

- **Основной тип элемента;**

Тетраэдр или **Криволинейный тетраэдр** - для объёмных тел, **Треугольник** – для пластин и оболочек.

- **Элементы для сгущения сетки;**

При создании сетки можно выбрать элементы модели для получения в локальных зонах более мелкую сетку. Это могут быть, например, места приложения сосредоточенной силы, или опасные места расчётной модели. Это делается с целью получения более точных результатов расчёта и избежании концентраторов напряжений.

Выбрать элементы для улучшения сетки можно с помощью опции автоменю:



<L> - выбрать элементы модели для сгущения,

а именно:



<P> - выбрать 3D узел;



<F> - выбрать грань;



<E> - выбрать ребро;

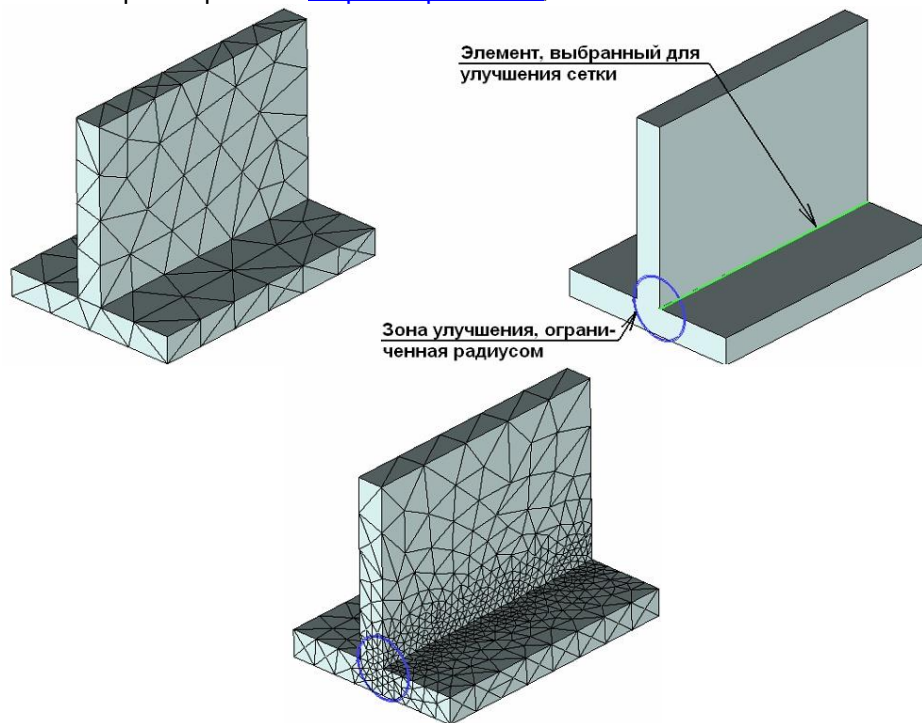


<V> - выбрать вершину;

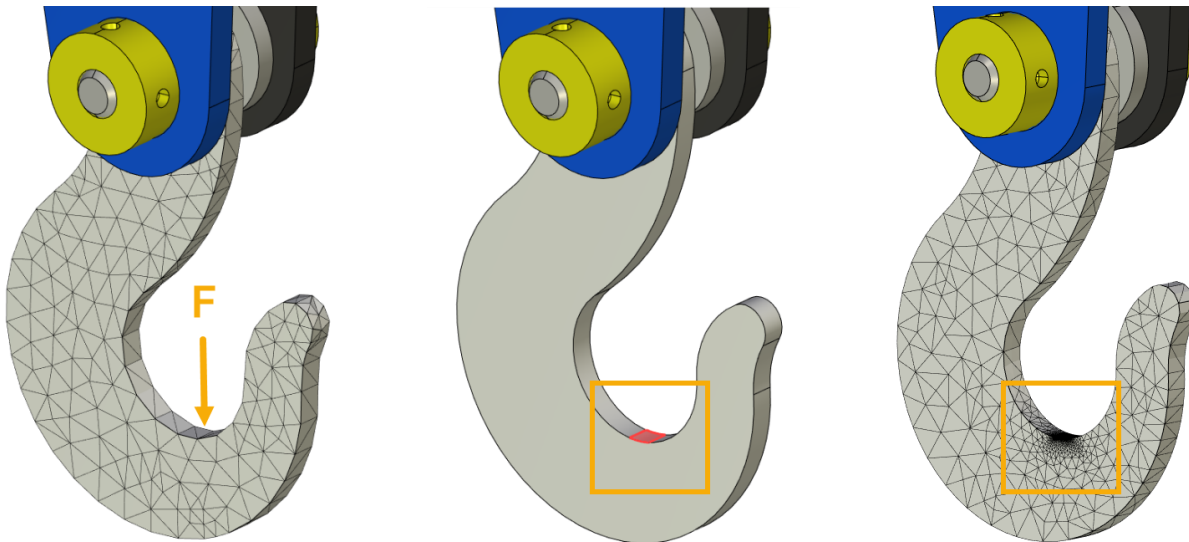


 - выбрать тело.

В пределах **радиуса улучшения** (см. ниже) вокруг выбранного элемента модели размер элемента сетки будет равен размеру, указанному в параметрах сетки для выбранного элемента улучшения. Для элементов модели, выбранных для улучшения сетки, можно установить только абсолютный размер см. п. [Параметры сетки](#);



Пример сгущения сетки – Элемент для сгущения выбрано ребро

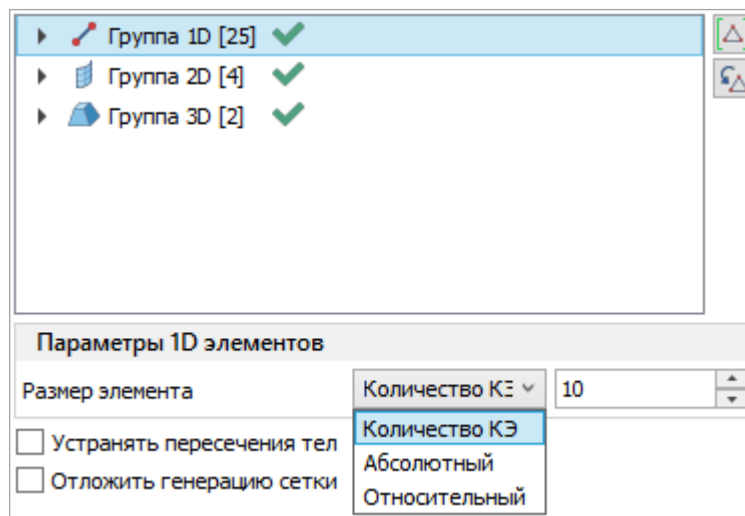


Пример сгущения сетки –Элемент для сгущения выбрана грань приложения сосредоточенной силы

- **Размер элемента;**

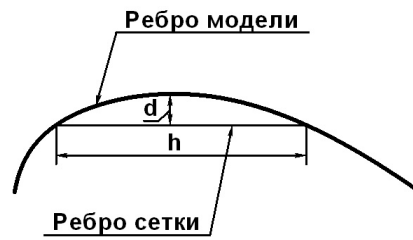
Размер ребра конечного элемента генерируемой сетки может быть определён как **Относительный** или **Абсолютный**. В первом случае размер ребра задаётся как доля от самого большого ребра прямоугольника, охватывающего всю модель. При абсолютном размере ребро конечного элемента определяется в модельных единицах. Заданный размер корректируется системой таким образом, чтобы в итоге получить все элементы сетки с ребром примерно одного размера, близким к значению, указанному в параметрах.

Для балок **Размер элемента** может быть определен как: **Относительный**, **Абсолютный** или **Количество КЭ**.

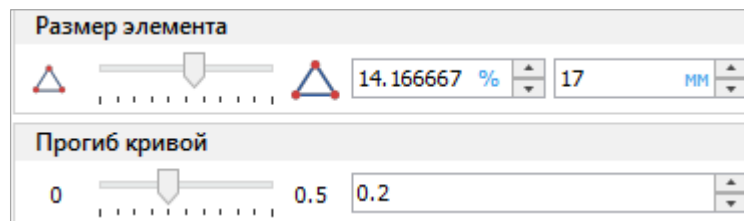
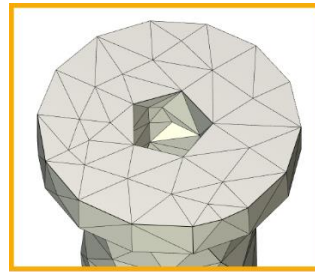
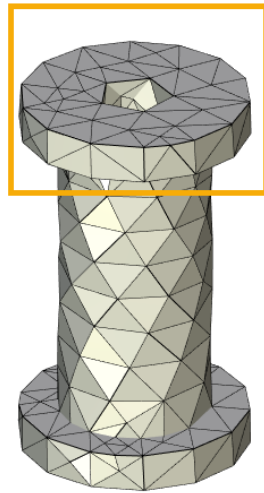


- **Прогиб кривой;**

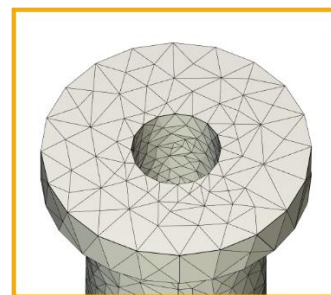
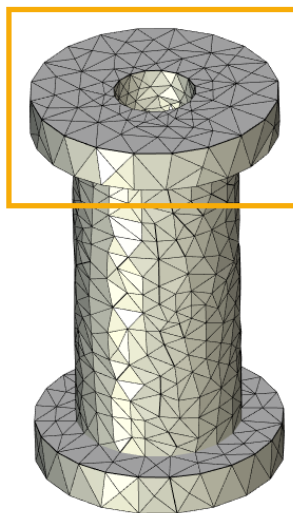
Параметр включает автоматическую обработку кривых поверхностей и устанавливает ограничение на минимальный размер элемента сетки при такой обработке. Ограничение задаётся в виде величины прогиба, значение которого вычисляется как отношение величины d к длине хорды h .

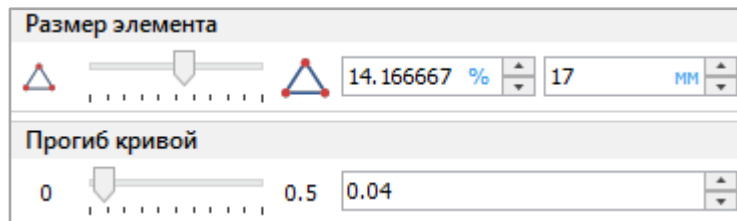


Ограничение может быть задано в диапазоне $0 \div 0.5$.



a)





б)

Учет параметра «Прогиб кривой» на одной и тоже расчётной геометрии с одинаковым размером конечного элемента

- **Уточнение тонких объемов;**

Параметр задаёт желаемое число элементов, укладываемых в пределах тонких стенок. Реально полученное число элементов может отличаться от заданного, т.к. задаётся только среднее значение. Управляется числом в диапазоне $0 \div 4$.



Обработка тонких объемов отключена



Обработка тонких объемов включена

- **Устранить пересечения тел;**

При активации данного параметра, происходит проверка сетки на самопересечения после генерации. При обнаружении система пытается исправить их автоматически. Самопересечения сетки возникают при задании слишком грубых размеров для сильно искривлённой геометрии модели.

- **Отложить генерацию сетки.**

При активации данного параметра система позволяет сохранить в задаче заданные пользователем параметры для генерации сетки, не создавая сетку непосредственно в данный момент.

3.3.1.2. СЦЕНАРИИ ПОСТРОЕНИЯ СЕТКИ

Функциональность создания сетки по группам позволила задействовать новые сценарии при работе с сеткой:

- задавать индивидуальные параметры для групп одного и того же типа;
- возможность поэтапного создания сетки;
- частичная регенерация сетки для выбранных групп.

Это позволяет избежать распространённых ошибок, сэкономить временные и вычислительные ресурсы, а также получить сетку, которая достоверно описывает процессы в объекте исследования.

В списке групп диалогового окна **Сетка** можно настроить параметры для одной или нескольких выбранных групп, а затем построить КЭ сетку с помощью специальной вложенной команды **Создать сетку для выбранных групп**. Сетка между элементами внутри группы всегда строиться согласованная (контакт по умолчанию). Сетка между группами - не согласованная (требуется задания контактов см. п. [Контакты](#)).

После построения сетки можно провести анализ качества КЭ сетки для построенной группы см. п. [Анализ сетки](#), и при необходимости переопределить параметры (настройки) разбиения и повторить генерацию КЭ сетки для группы, через команду из контекстного меню **Изменить** в задаче или повторного вызова команды **Сетка**.

Для выбранных групп (одной или нескольких) или всех групп можно сбросить настройки (размер сетки, сгущения и т.д.) к параметрам по умолчанию нажатием специальной вложенной командой **Сбросить настройки сетки для выбранных групп**.

С помощью вложенных команд можно:



- создать сетку для выбранных групп;



- сбросить настройки сетки для выбранных групп.

В диалоговом окне у каждой группы элементов будут появляться специальные пиктограммы:



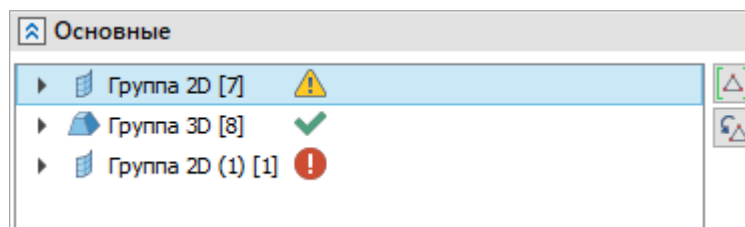
- если КЭ сетка для группы построена без ошибок;



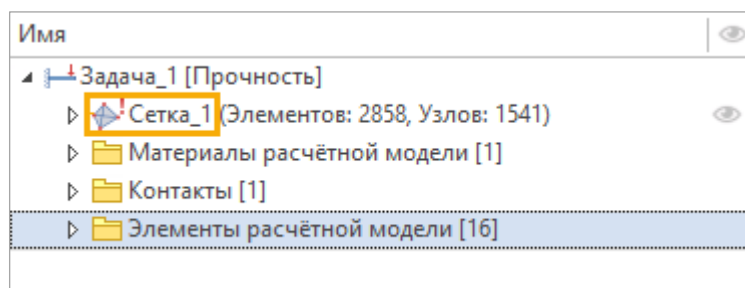
- если для какой-то из групп, КЭ сетка не была построена вообще;



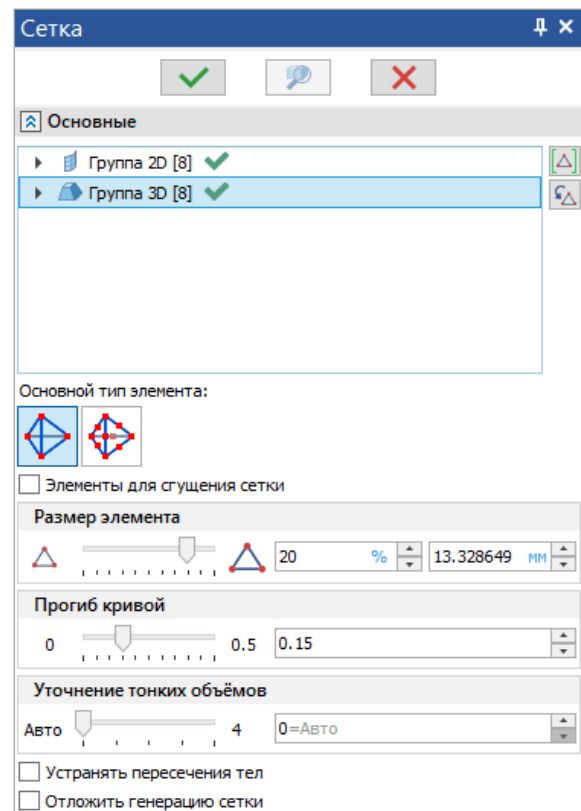
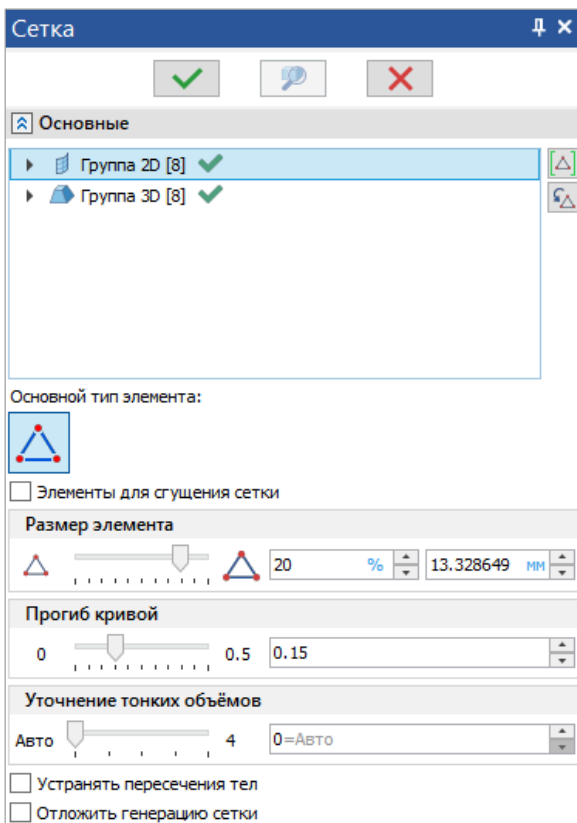
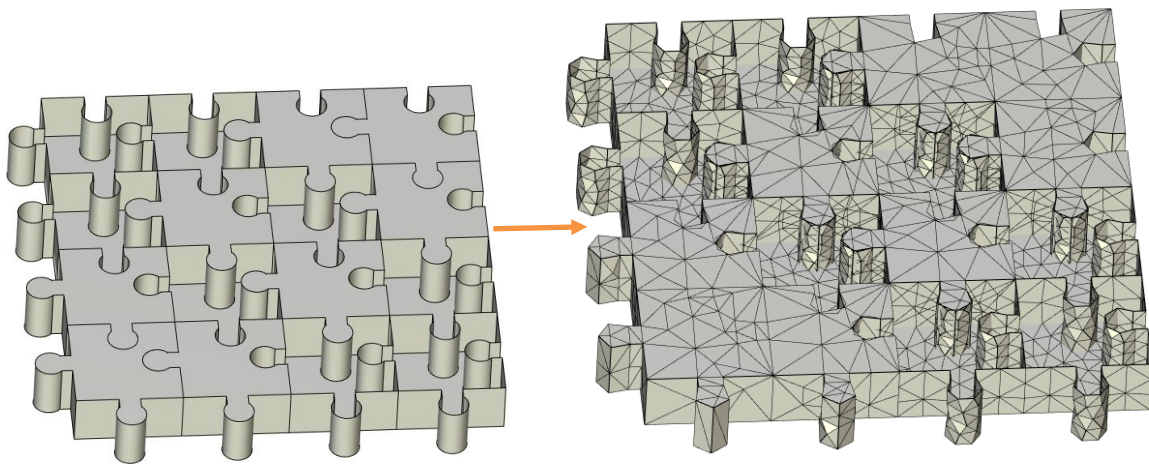
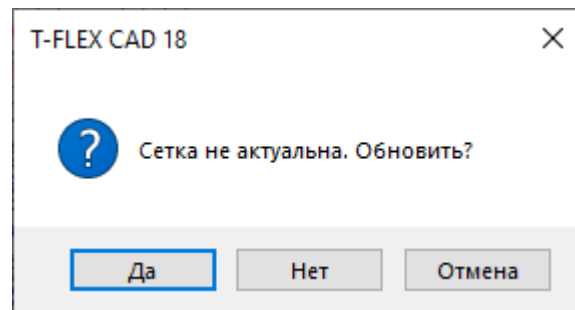
- если для какой-то из групп, параметры КЭ сетки были изменены.



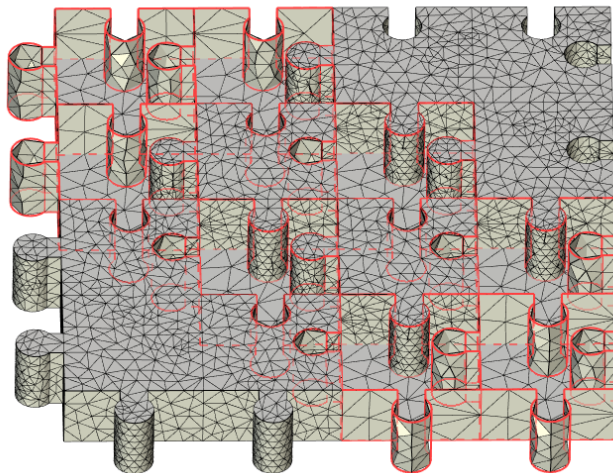
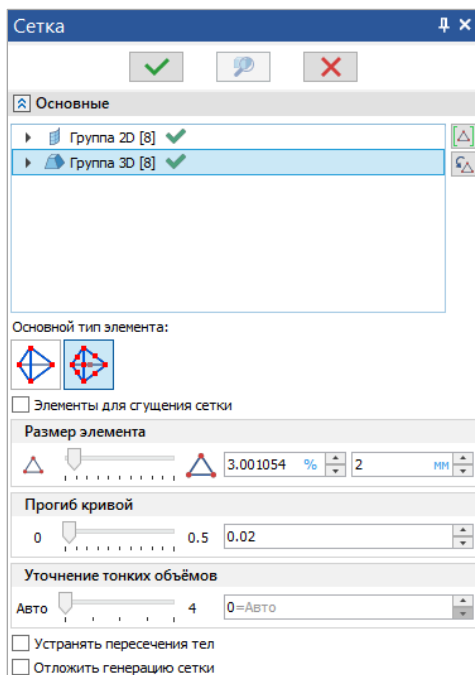
Кроме того, если КЭ сетка неактуальна, то в дереве задачи такая сетка помечаться специальной пиктограммой



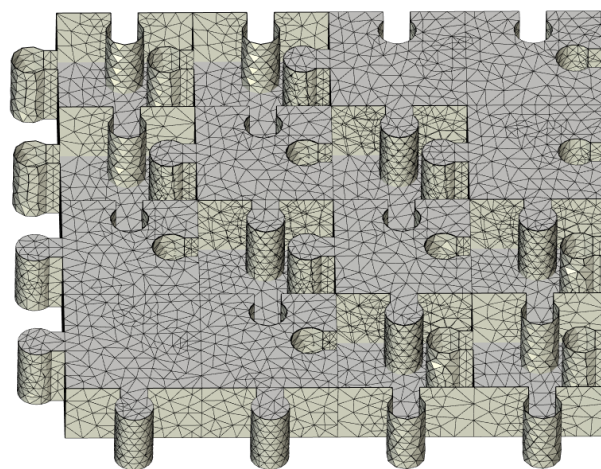
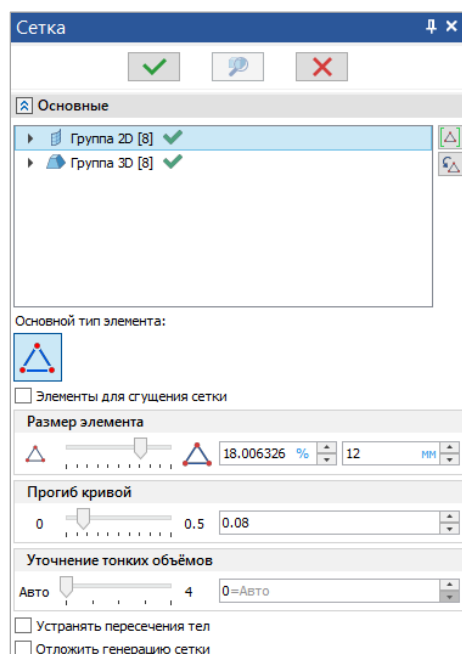
А при запуске на расчёт появится предупреждение с предложением обновить сетку. По нажатию **Да**, - система автоматически обновляет сетку



Автоматическое разбиение сетки – параметры сетки по умолчанию



Позапное построение сетки – Настройка параметров для группы 3D



Позапное построение сетки – Настройка параметров для группы 2D

Типичный порядок действий при поэтапном построении сетки:

- в списке групп диалогового окна **Сетка**, настроить параметры для одной или нескольких групп;
- выполнить команду **Создать сетку для выбранных групп**;
- нажать  сетка построится целиком для оставшейся части модели и команда закроется или  для закрытия команды без построения оставшейся сетки;

- провести анализ качества КЭ сетки для построенной группы с помощью команды [Анализ сетки](#), и при необходимости переопределить параметры разбиения и повторить генерацию КЭ сетки для группы;
- перейти к построению других групп.

3.3.2. АНАЛИЗ СЕТКИ

Анализ сетки осуществляется в группе «Подготовка модели» ленты Анализ, в ней доступны следующие команды [Анализ сетки](#) и [Выбор областей сетки](#).

3.3.2.1. АНАЛИЗ КАЧЕСТВА СЕТКИ

Вызов команды:

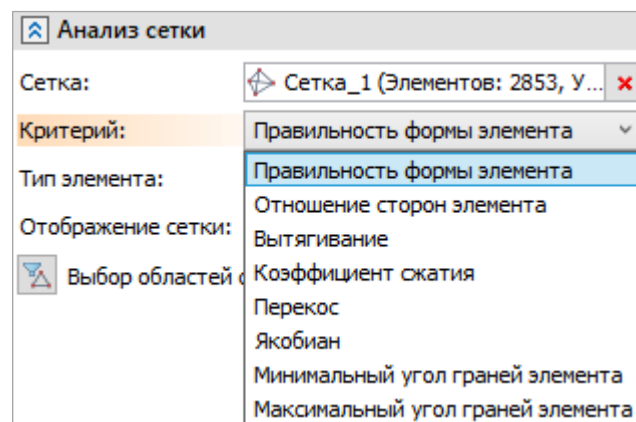
Пиктограмма	Лента
	Анализ > Подготовка модели > Анализ сетки > Анализ сетки
Клавиатура	Текстовое меню
	Анализ > Подготовка модели > Анализ сетки

Команду **Анализ сетки** можно вызвать из ленты T-FLEX Анализ или из контекстного меню при выборе элемента **Сетка**  в окне **Задачи** или в окне **3D Модель**.

Группа «Анализ сетки»

Пользователь может оценить состояние полученной сетки конечно-элементной модели по заданным критериям. Для этого необходимо выбрать:

- **Сетку** – необходимые элементы в сцене;
- **Тип элемента** - в зависимости от постановки задачи (треугольник или тетраэдр);
- **Критерий** – критерий качества сетки. Система предлагает на выбор различные критерии;



- **Диапазон значений** – диапазон значений поиска.

Система подсвечивает конечные элементы на модели, удовлетворяющие данным условиям.

Анализ сетки

✓ 🔍 ✗

Анализ сетки

Сетка: Сетка_2 (Элементов/Узлов: 218098/103454) ✗

Критерий: Правильность формы элемента ▾

Тип элемента: Треугольник ▾

Отображение сетки: Стандартное ▾

Выбор областей сетки

Диапазон значений

Минимум: 0.600067 Максимум: 0.900016

Элементов в диапазоне: 74147

Наилучшие значения: 1 (0 элементов)

0.000 - 0.100	7898
0.100 - 0.200	1134
0.200 - 0.300	403
0.300 - 0.400	1090
0.400 - 0.500	24933
0.500 - 0.600	3963
0.600 - 0.700	9837
0.700 - 0.800	24194
0.800 - 0.900	40116
0.900 - 1.000	104530

☒ Информация о сетке

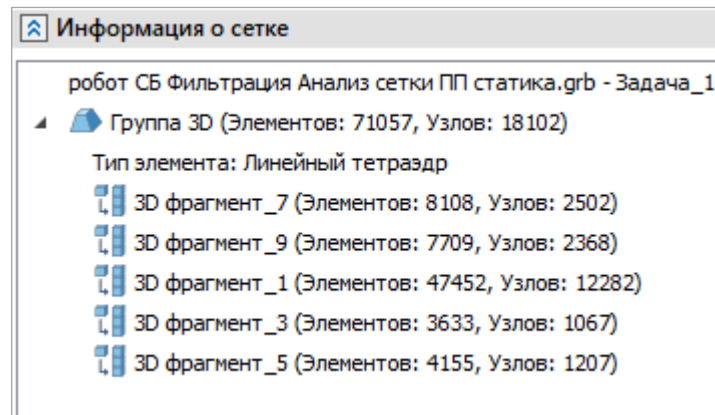
☒ Информация об элементах



Рис. 1 - Диалог команды "Анализ сетки" и выделение КЭ, удовлетворяющие заданным критериям качества сетки

Группа «Информация о сетке»

Позволяет получить информацию о сетке в группах, а именно тип и количество КЭ и узлов в модели.



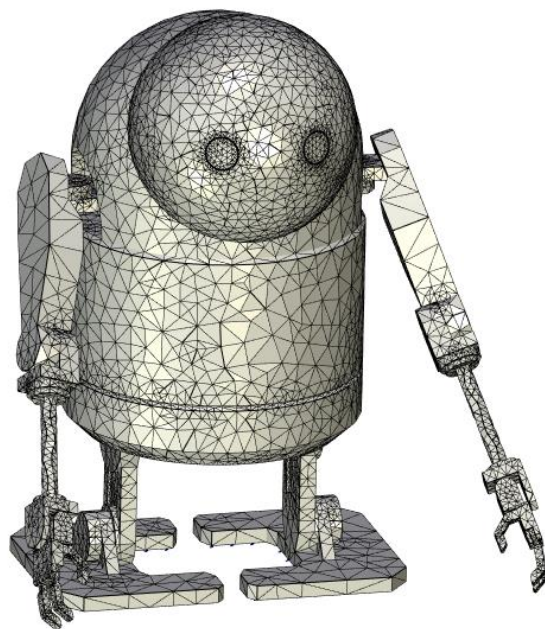
Группа «Информация об элементах»

Позволяет получить информацию об элементах и координатах их узлов.

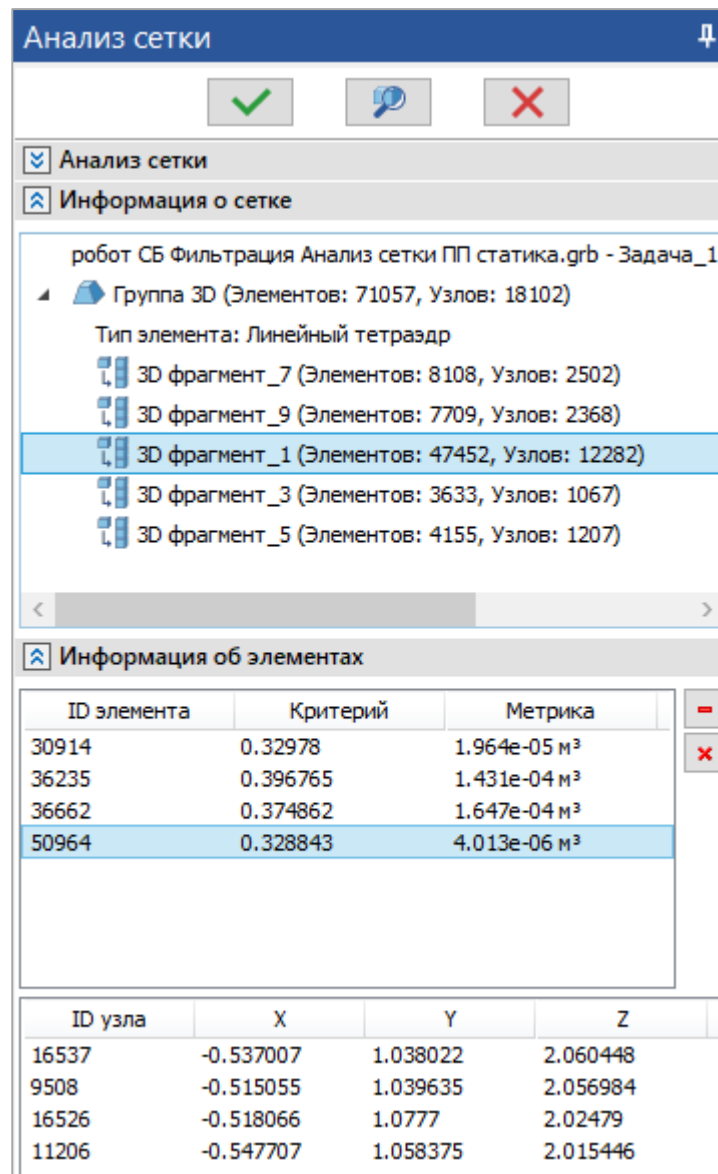
Для просмотра информации об элементах пользователю необходимо выбрать интересующий диапазон. В 3D сцене отобразятся доступные КЭ для анализа. При наведении на элемент, он подсвечивается другим цветом и появляется метка с номером ID (порядковый номер). При нажатии на элемент, он автоматически заносится в таблицу «**Информация об элементах**». Там для выбранного элемента можно узнать следующую информацию: номер **ID элемента**, **Критерий** - значения параметра качества и **Метрика**. В качестве метрики для тетраэдра – объем, для треугольника – площадь, для балки – длина.

Для просмотра информации об узлах, нужно выбрать интересующий КЭ в таблице «**Информация об элементах**». После чего в таблице ниже будет представлена информация о координатах относительно глобальной СК и ID для узлов.

Информация об элементах			
ID элемента	Критерий	Метрика	
36226	0.896526	6.545e-04 м³	
36320	0.851934	6.640e-04 м³	
36431	0.80617	7.330e-04 м³	
36516	0.893828	8.910e-04 м³	
ID узла	X	Y	Z
15388	-1.21831	0.105987	1.542791
8321	-1.243452	0.038155	1.743751
8357	-1.159304	-0.049989	1.572176
2182	-1.331798	-0.040805	1.521882



Пример исследования анализа качества сетки



3.3.2.2. ВЫБОР ОБЛАСТЕЙ СЕТКИ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Подготовка модели > Анализ сетки > Выбор областей сетки
Клавиатура	Текстовое меню
	Анализ > Подготовка модели > Анализ сетки

Команда **Выбор областей сетки** позволяет отобразить нужные участки конечно-элементной модели для более детального анализа.

Предусмотрено два режима использования данной функциональности: **Обычный режим**



и **Расширенный режим**



В **Обычный режим** производится фильтрация сетки для быстрой оценки её состояния. Данные настройки сохраняются в текущем сеансе работы до тех пор, пока пользователь не сбросит настройки с помощью вложенной команды



с помощью вложенной команды

Есть два режима отображения:



- скрыть выбранные КЭ из сцены;



- показать выбранные КЭ.

Есть несколько режимов выбора элементов:



- прямоугольник;



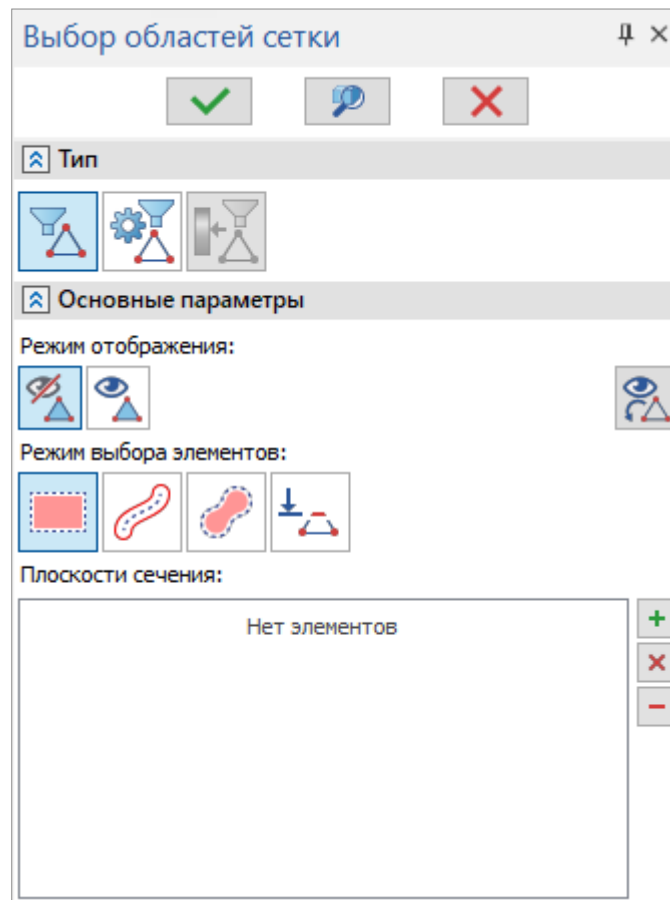
- кривая;

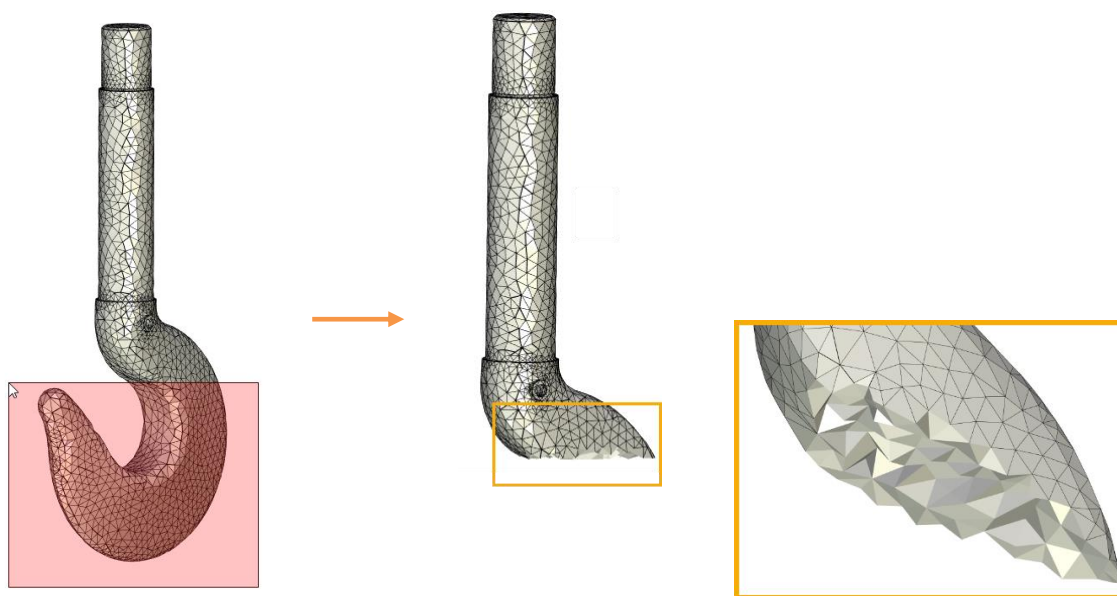


- лассо;

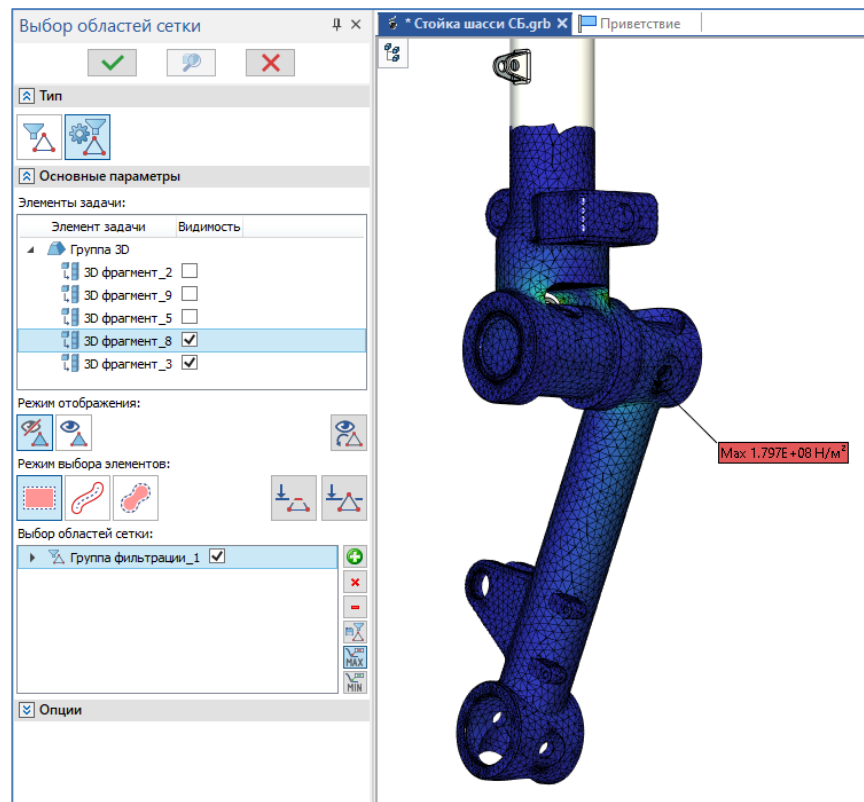


- плоскость.





Расширенный режим команды позволяет создать области фильтрации сетки произвольно, либо по группам областей сетки. Может быть создано несколько групп фильтрации сетки. Созданные группы запоминаются при следующих сеансах работы и удаляются пользователем только вручную. Для каждой группы фильтрации могут быть созданы отдельные метки экстремумов. Такой подход позволяет разделить конструкцию на отдельные составляющие («фюзеляж», «крыло», «хвост») и в каждой группе определить локальные значения, например, максимальных напряжений.



3.4. УСЛОВИЯ И НАГРУЖЕНИЯ

Для того что бы смоделировать конструкцию с реальными условиями эксплуатации нужно определить и задать граничные условия и нагрузки для расчётной модели. Результат решения задачи будет полностью определяться набором и параметрами условий, определёнными пользователем. Для этого в T-FLEX Анализ граничные условия и нагрузки задаются в группе «Условия и нагрузки». Под «Условием» T-FLEX Анализ понимается: закрепления (граничные условия), т.е. ограничение перемещений и вращений либо определение температуры при решении задач теплообмена. А под «Нагрузением» – приложение к модели сосредоточенных или распределенных сил, или тепловых потоков.

Основные темы в этом разделе:

- [Граничные условия](#)
- [Нагрузки](#)
- [Связи](#)
- [Контакты](#)
- [Событие](#)

3.4.1. ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Результат анализа напрямую зависит от заданных граничных условий, которые определены пользователем для конкретной задачи. Граничные условия могут быть приложены к грани, ребру или вершине используемого тела.

В системе можно задать несколько типов условий: **Полное закрепление**, **Частичное закрепление**, **Симметрия**, **Упругое основание**, **Дистанционное перемещение**. Условия добавляются в активную задачу и может быть соотнесено только с элементами того тела, которое используется в активной задаче.

При создании новых граничных условий система добавляет их в набор для активной в настоящий момент задачи. Они размещаются в папку "**Закрепления**" дерева окна задач. Работа с ними осуществляется с помощью соответствующих команд системы, а также команд контекстного меню вызываемого при нажатии правой кнопки мыши в дереве задач.

Основные темы в этом разделе:

- [Полное закрепление](#)
- [Частичное закрепление](#)
- [Симметрия](#)
- [Упругое основание](#)
- [Дистанционное перемещение](#)

3.4.1.1. ПОЛНОЕ ЗАКРЕПЛЕНИЕ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия и нагрузки > Полное Закрепление > Полное закрепление
Клавиатура	Текстовое меню
<ЗМС>	Анализ > Граничные условия > Полное закрепление

Данный вид условий блокирует все степени свободы для выбранного объекта. Полностью закрепить можно грань, ребро или вершину модели.

Для задания условия нужно выбрать элемент модели. Для выбора доступны грани, рёбра или вершины.

Для выбора элементов модели используйте опцию автоменю:



<E>

Выбрать элемент для закрепления

При зажатии  на опции  **Выбрать элемент для закрепления** становятся доступными фильтры выбора:



<Alt+Num+> Выбирать все



<Ctrl+Alt+V> Выбрать вершину

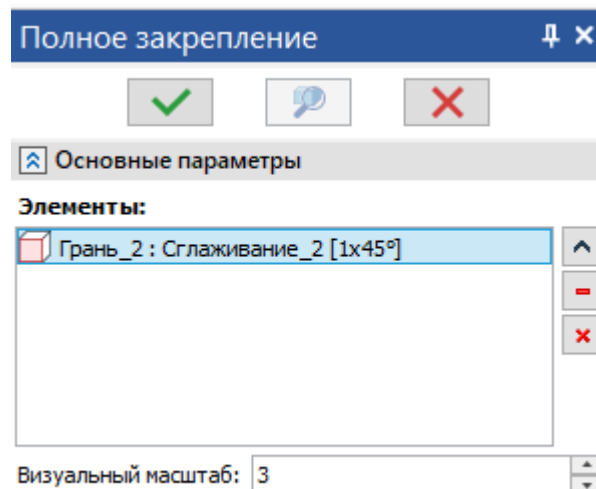
 <Ctrl+Alt+E> Выбрать ребро

 <Ctrl+Alt+Q> Выбрать грань

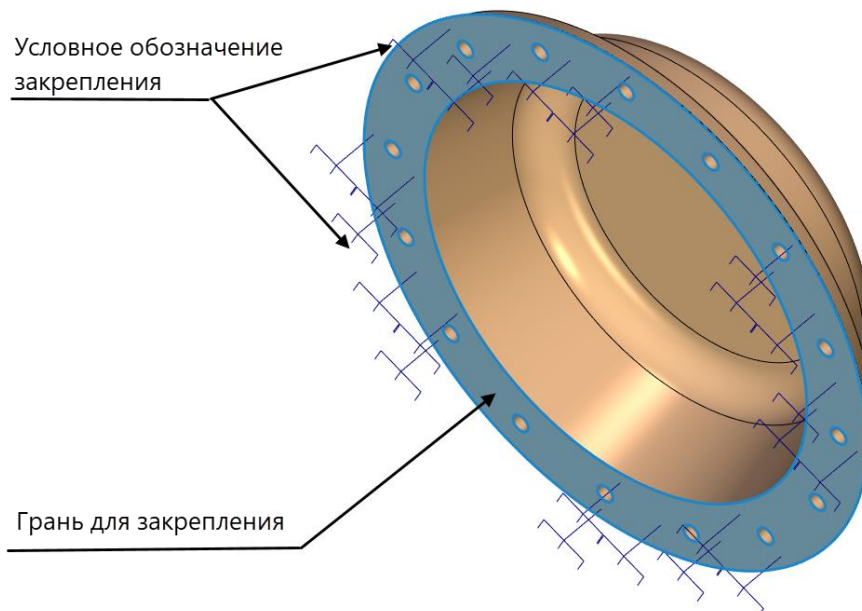
Эти же фильтры доступны на панели фильтров.



Так же на панели фильтров можно выбрать гладкоопределённые элементы модели . Выбранные элементы отображаются в списке окна **Основные параметры**.



После выбора элемента в 3D окне появляется условное обозначение полного закрепления.



Типичный порядок действий при задании полного закрепления

- 1) Инициировать команду «Полное закрепление» .

- 2) Выбрать элемент для закрепления.
- 3) Завершить команду.

3.4.1.2. ЧАСТИЧНОЕ ЗАКРЕПЛЕНИЕ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия и нагрузки > Полное Закрепление > Частичное закрепление
Клавиатура	Текстовое меню
<ЗМУ>	Анализ > Граничные условия > Частичное закрепление

При задании частичного закрепления пользователю предоставляется возможность самостоятельно установить условия на различные степени свободы. При использовании только частичных закреплений в большинстве случаев для осуществления моделирования нужно обеспечить достаточное количество ограничений для предотвращения движения тела как жесткого целого.

Для задания данного условия нужно выбрать ребро, грань или вершину.

Для выбора элементов модели используйте опцию автоменю:



<E>

Выбрать элемент для закрепления

При зажатии  на опции  **Выбрать элемент для закрепления** становятся доступными фильтры выбора:



<Alt+Num+> Выбирать все



<Ctrl+Alt+V> Выбрать вершину



<Ctrl+Alt+E> Выбрать ребро



<Ctrl+Alt+Q> Выбрать грань

Эти же фильтры доступны на панели фильтров.

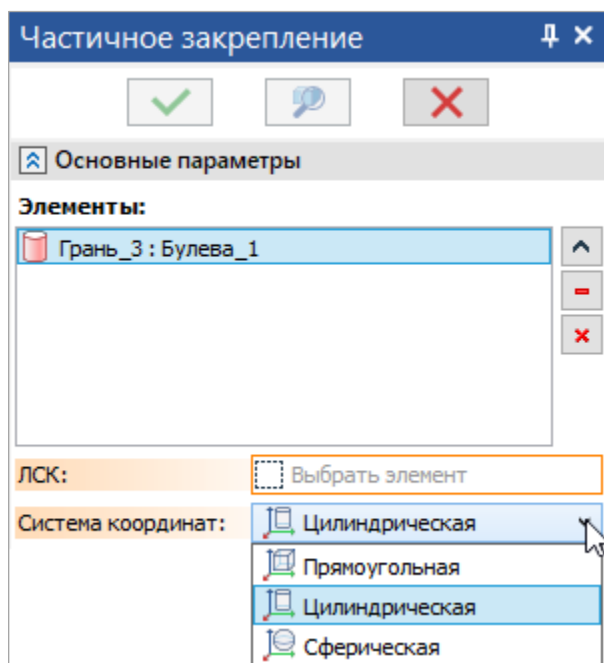


Так же на панели фильтров можно выбрать гладкоспряжённые элементы модели .

Выбранные элементы отображаются в списке окна **Основные параметры**.

Далее требуется задать ограничения для степеней свободы. Пользователь может работать в одной из трёх систем координат – прямоугольной, цилиндрической или сферической. Для привязки системы координат к модели используется локальная система координат.

Необходимо заметить, что в том случае если пользователем не определена локальная система координат, частичные закрепления будут заданы относительно глобальной системы координат.



Для выбора системы координат используйте опции автоменю:



<C> Выбрать систему координат



<K> Отменить выбор системы координат

В каждой системе координат можно ограничить перемещения по трем степеням свободы для объёмных тетраэдральных элементов. Активный элемент управления относительно соответствующей степени свободы выбранной системы координат, означает, что по данному направлению задаётся полное ограничение перемещения (если значение равно 0) или указано известное перемещение (если значение в соответствующем текстовом поле отлично от нуля). Отсутствие флага означает, что по данной степени свободы ограничение не предусмотрено. По умолчанию ограничены любые перемещения по всем трем направлениям. При необходимости можно снять существующие блокировки или добавить новые.

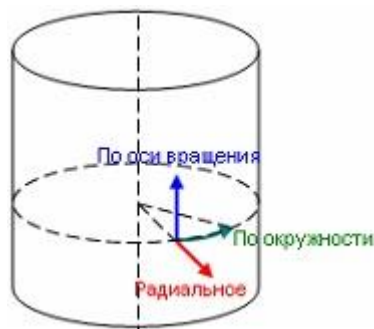
Ограничение перемещения по осям		
☐ X:	0	мм
☐ Y:	0	мм
☐ Z:	0	мм
☐ Поворот по X:	0	рад
☐ Поворот по Y:	0	рад
☐ Поворот по Z:	0	рад

Параметры «Поворот по X», «Поворот по Y», «Поворот по Z» необходимы для того, чтобы задать повороты относительно осей системы координат (локальной или глобальной) при решении задач о нагружении пластины (или оболочки), балок. При этом для дискретизации расчётной области должны быть использованы треугольные (поверхностные) конечные элементы, которые имеют шесть степеней свободы.

Если значение поворота равно 0, это означает, что по данному направлению задаётся полное ограничение поворота. Если значение поворота не равно 0, то указан известный угол поворота. Отсутствие флага (опция выключена) означает, что относительно данной оси ограничение поворота не предусмотрено. По умолчанию ограничения поворотов относительно осей выбранной системы координат отсутствуют.

В цилиндрической системе координат существует возможность ограничивать перемещения по:

- радиусу;
- окружности;
- оси вращения.

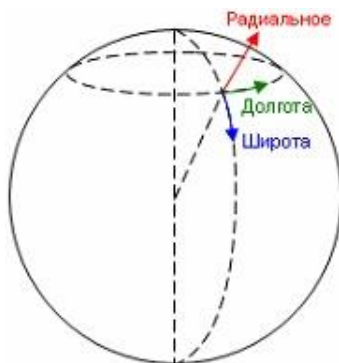


ЛСК:	ЛСК_1	✕
Система координат:	Цилиндрическая	
Ограничение перемещения по осям		
☒ Радиальное:	0	мм
☒ По окружности:	0	мм
☒ По оси вращения:	0	мм

В цилиндрической системе координат ось вращения совпадает с осью Z глобальной системы координат, или, если указана ЛСК, совпадает с осью Z ЛСК.

В сферической системе координат существует возможность ограничивать перемещения по:

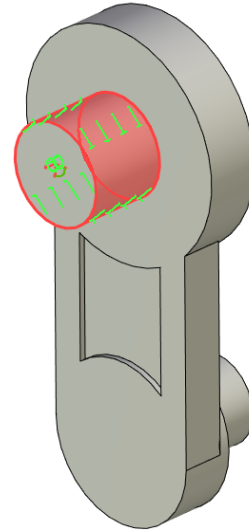
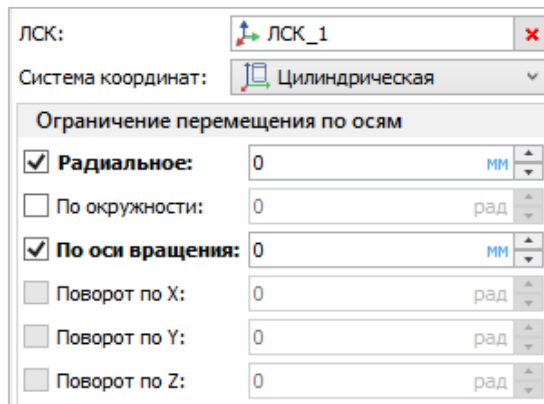
- радиусу;
- долготе;
- широте.



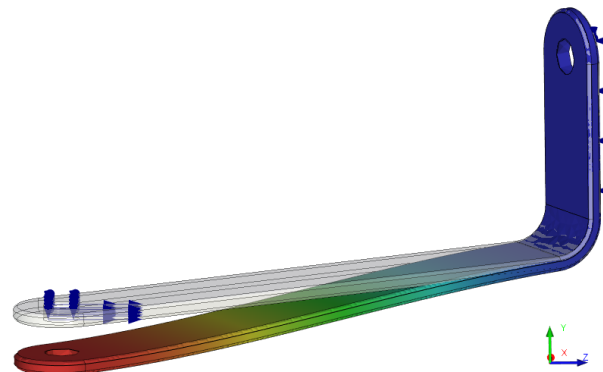
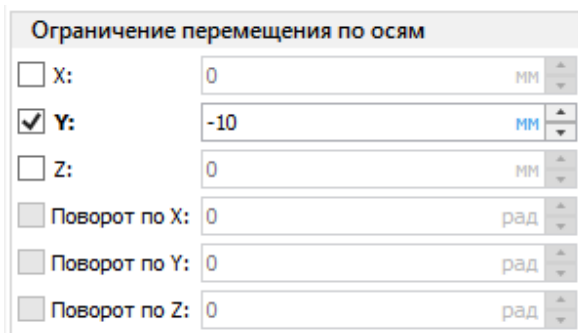
ЛСК:	ЛСК_1	✕
Система координат:	Сферическая	
Ограничение перемещения по осям		
☒ Радиальное:	0	мм
☒ Долгота:	0	рад
☒ Широта:	0	рад

На рисунке представлен пример частичного закрепления поверхности в цилиндрической системе координат. В данном случае частичные закрепления определены в направлении «по

оси вращения» и в «радиальном», а в направлении «по окружности» не наложено никаких ограничений. Условное изображение данных закреплений отображается с помощью специальных значков, ориентированных в соответствующих направлениях.



Команда **Частичное закрепление** обладает ещё одним полезным функционалом. Пользователь может задать для конструкции известное значение перемещения, например, известную предварительную деформацию конструкции. Для этого в окне параметров команды необходимо указать значение фиксированного перемещения элемента модели по какой-либо из координатных осей. Статический анализ будет выполнен с учётом этого условия (для динамических задач известные перемещения не применяются).



В этом случае, возможно осуществление статического расчёта без наложения дополнительных (силовых) нагрузений. Таким образом можно оценить напряжения, возникающие в деформированной конструкции, если известны количественные значения этих деформаций (перемещений).

Типичный порядок действий при задании частичных закреплений

- инициировать команду «Частичные закрепления» .
- выбрать элемент для закрепления.

- выбрать систему координат.
- отметить необходимые ограничения перемещений/углов поворота, в зависимости от постановки задачи.
- завершить команду.

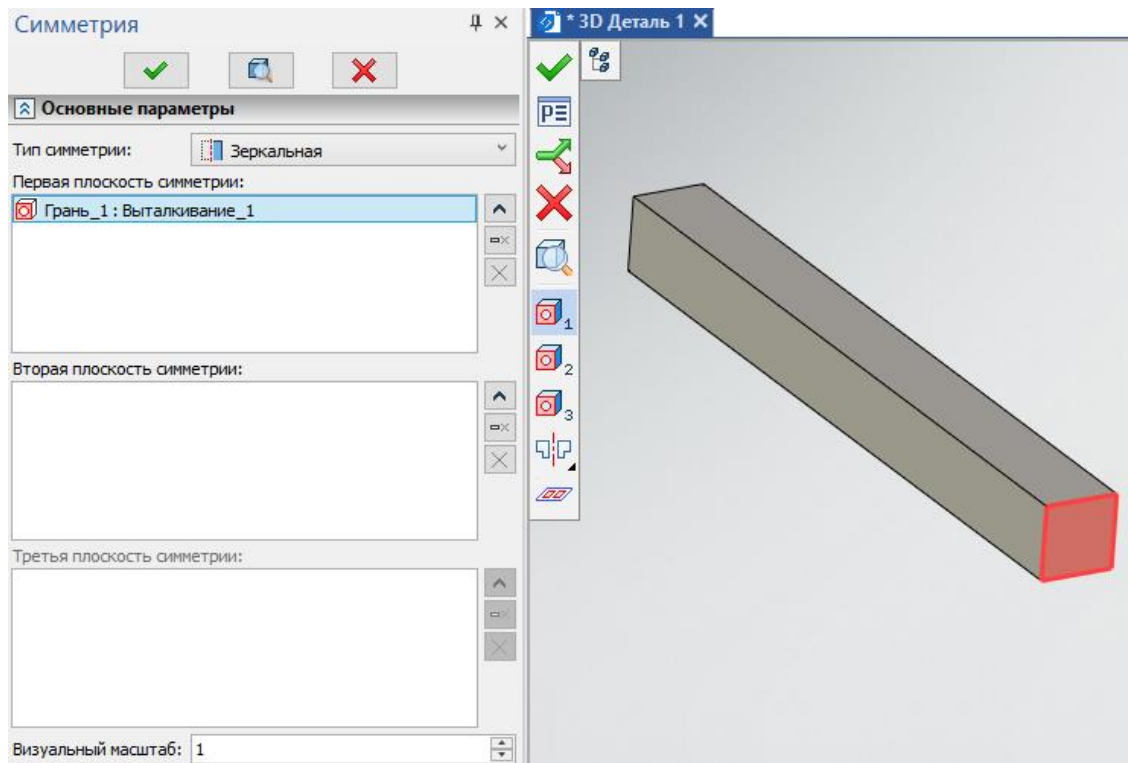
3.4.1.3. СИММЕТРИЯ

Для задания симметрии используется команда:

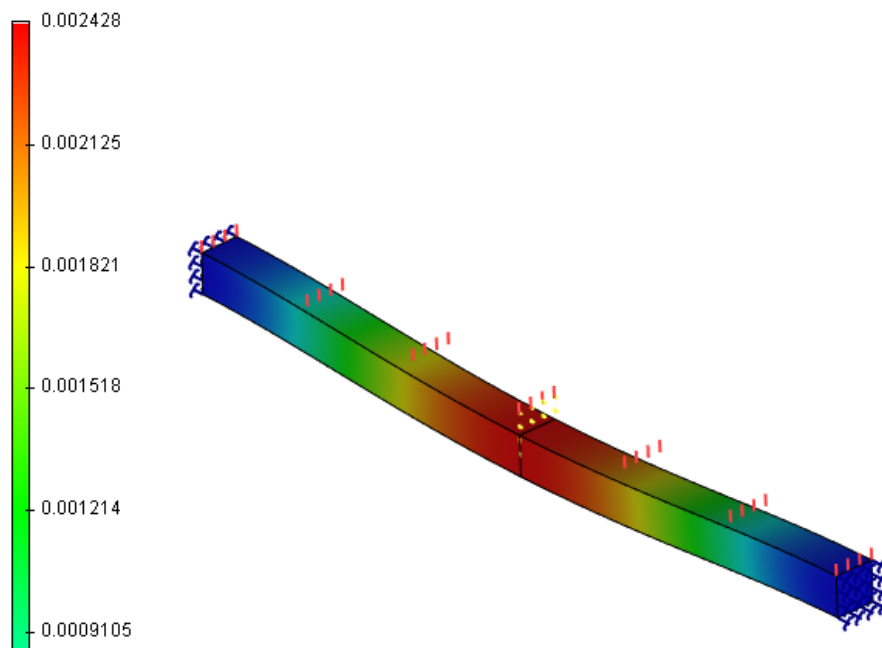
Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия > Полное Закрепление > Симметрия
Клавиатура	Текстовое меню
<3M3D>	Анализ > Граничные условия > Симметрия

В многих практических случаях механические конструкции имеют симметричную геометрическую форму и могут подвергаться симметричному нагружению. В этих случаях результат моделирования также будет симметричным и появляется возможность значительно сократить размерность решаемой задачи за счёт расчёта лишь одной части симметричной конструкции. Для этого нужно правильно задать граничные условия (закрепления). В общем случае в механических задачах условие симметрии задается запретом перемещения в направлении перпендикулярном плоскости симметрии при отсутствии ограничений в плоскости симметрии. В тепловых задачах для задания симметрии достаточно не прикладывать никаких тепловых граничных условий в плоскости симметрии.

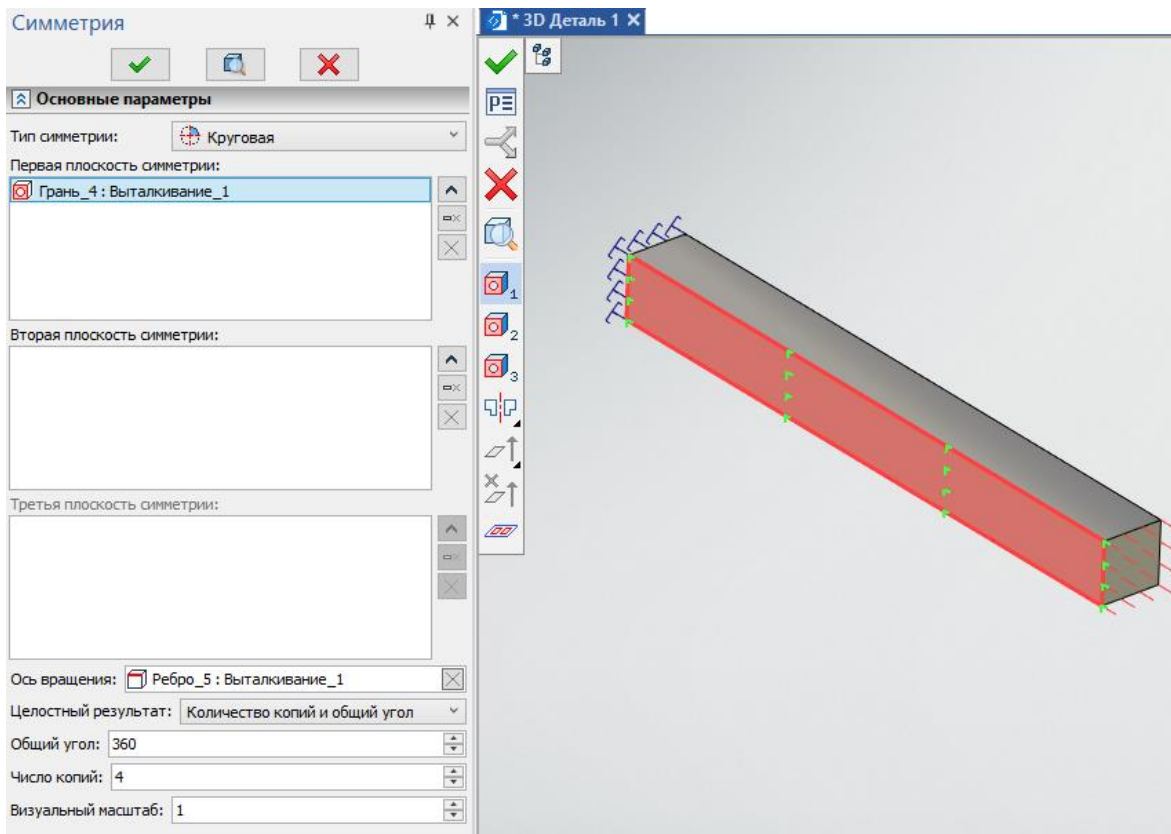
Для задания плоскостей симметрии нужно выбрать плоские грани 3D модели.



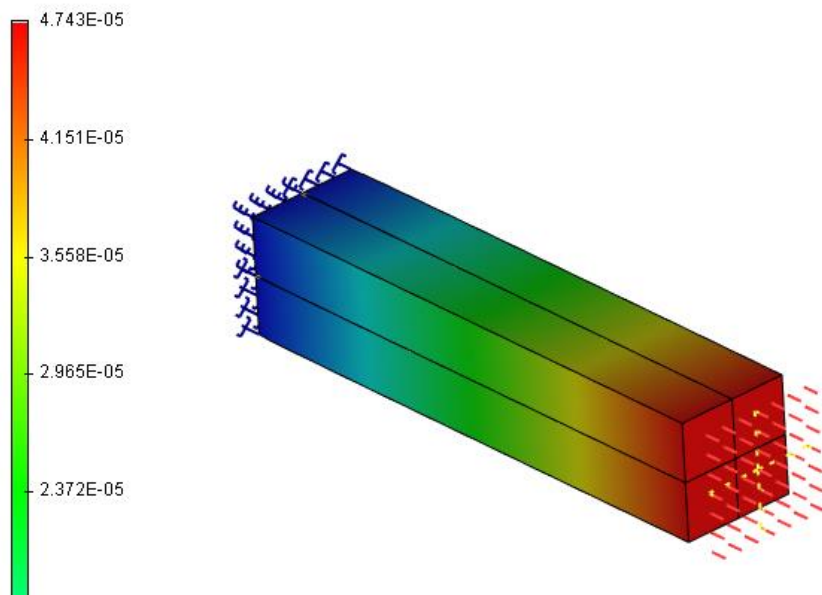
Задача_1 [Прочность]
Перемещения, модуль, мм
Масштаб перемещений: 20592.21



Зеркальная симметрия



Задача_1 [Прочность]
Перемещения, модуль, мм
Масштаб перемещений: 1054922.50



Круговая симметрия

Типичный порядок действий при задании граничного условия "Симметрия"

- Инициировать команду «Симметрия».
- Выбрать грани тела, определяющие плоскости симметрии.
- Завершить команду.

3.4.1.4. УПРУГОЕ ОСНОВАНИЕ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия и нагрузки > Полное Закрепление > Упругое основание
Клавиатура	Текстовое меню
<3M3S>	Анализ > Граничные условия > Упругое основание

Данный вид ограничения позволяет определить упругое взаимодействие на границе тела. Упругое основание используется для моделирования соприкосновения тела с внешней упругой средой, которая деформируется вместе с телом. Например, станина станка деформируются вместе с основанием, базирующим на упругих демпфирующих элементах (виброизоляторах). Также примером тела, связанного с упругой средой, может служить плотина, опирающаяся на грунт, рельсовый путь и т.д.

Математически упругое основание рассматривается как множество невесомых пружин одинаковой жесткости приложенных на границе тела.

После вызова команды необходимо выбрать элементы модели для приложения нагрузки. С помощью автоменю.



<E> Выбрать элемент для закрепления

Для выбора доступны грани. После выбора элемента в 3D окне появляется его условное обозначение.

Упругое основание

✓ ? ✗

Основные параметры

Элементы:

Грань_1: Параллелепипед_1

ЛСК: ☐ Выбрать элемент

Система координат:  Прямоугольная

Тип жёсткости:  Суммарная

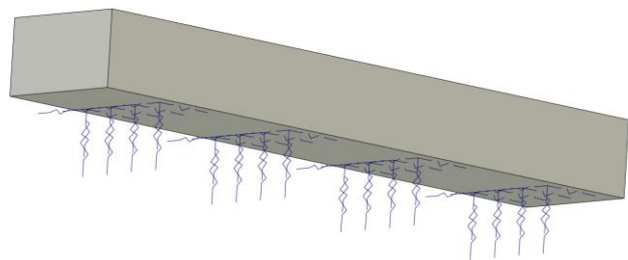
Значение по осям

X: 1 Н/м

Y: 1 Н/м

Z: 1 Н/м

Визуальный масштаб: 1



Для выбора локальной системы координат, в которой будут определены коэффициенты жесткости, используйте опции автоменю:



<C> Выбрать систему координат

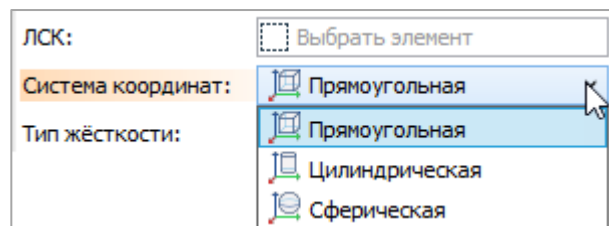


<K> Отменить выбор системы координат

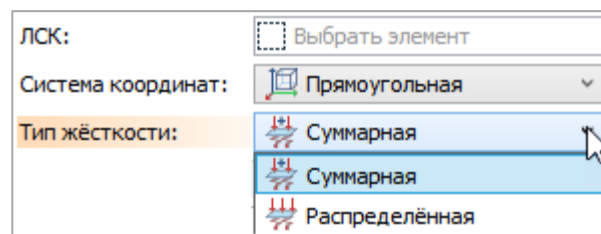
Если пользователем локальная система координат не задана, то по умолчанию используется глобальная система.

В диалоговом окне **Основные параметры** пользователю предлагается выбрать:

- Тип системы координат: прямоугольная, цилиндрическая, сферическая.



- Тип жесткости: суммарная или распределенная.



Тип жёсткости «суммарная» используется, если известна общая жесткость воздействующей среды и эта величина равномерно распределяется по суммарной площади граней/ суммарной длине ребер/ суммарному количеству вершин (по одному или каждому из направлений).

Тип жесткости «распределенная» используется, если известна удельная жесткость основания на единицу площади (по одному или каждому из направлений).

- Значения по осям (по умолчанию стоит 1 Н/м).

Типичный порядок действий при задании ограничения типа упругое основание

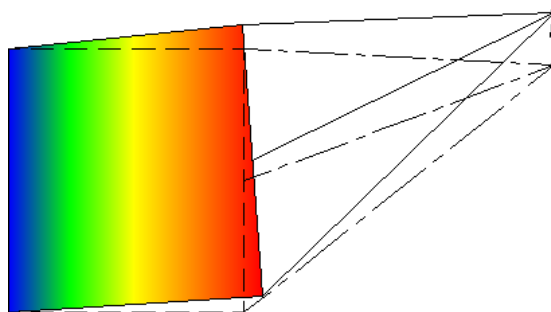
- Инициировать команду «Упругое основание» .
- Выбрать элемент для закрепления.
- Выбрать систему координат и указать ее тип.
- Задать значения коэффициентов жесткости по осям и единицы измерения.
- Завершить команду.

3.4.1.5. ДИСТАНЦИОННОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ

Для задания дистанционного перемещения используется команда:

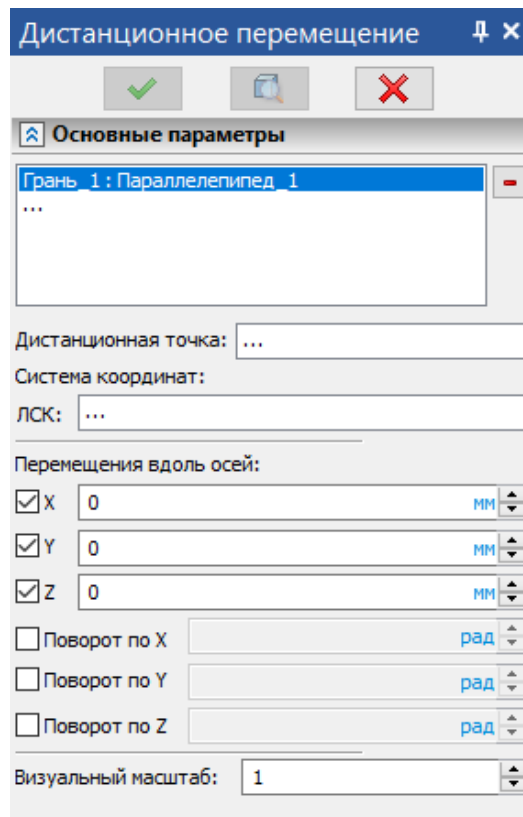
Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия > Полное закрепление > Дистанционное перемещение
Клавиатура	Текстовое меню
<3M3Z>	Анализ > Граничные условия > Дистанционное перемещение

При задании дистанционного перемещения пользователю предоставляется возможность задать перемещение/поворот некоторой точки с известными координатами, жестко связанной с гранями/ребрами КЭ модели, по направлениям/вокруг осей выбранной ЛСК.



Дистанционная точка связывается невидимыми жесткими (неупругими) стержнями с выбранной гранью/ребром КЭ модели и перемещается/поворачивается в своей ЛСК, при этом перемещения точки передаются на грань/ребро жесткими стержнями. Следует учесть, что и выбранная грань/ребро КЭ модели становятся жесткими.

Для задания места приложения дистанционного перемещения нужно выбрать ребро или грань. Следует учесть, что если выбрана грань, то ребра уже не могут быть выбраны и наоборот.



Далее необходимо выбрать дистанционную точку. Выбраны могут быть 3D узлы, вершины, середины ребер и т.д. в соответствии с установками фильтра.

После чего необходимо выбрать ЛСК, в которой будут определяться перемещения/повороты. Если ЛСК не выбрана, используется глобальная система координат.

Далее нужно задать перемещения удаленной точки по трём степеням свободы. Активный элемент управления относительно соответствующей степени свободы выбранной системы координат означает, что по данному направлению задаётся полное ограничение перемещения (если значение равно 0) или указано известное перемещение (если значение в соответствующем текстовом поле отлично от нуля). Отсутствие флага означает, что по данной степени свободы ограничение не предусмотрено. По умолчанию ограничены любые перемещения по всем трём направлениям. При необходимости можно снять существующие блокировки или добавить новые.

Параметры «Поворот по X», «Поворот по Y», «Поворот по Z» необходимы для того, чтобы задать повороты относительно осей системы координат (локальной или глобальной). Если значение поворота равно 0, это означает, что по данному направлению задаётся полное ограничение поворота. Если значение поворота не равно 0, то указан известный поворот. Отсутствие флага (опция выключена) означает, что относительно данной оси ограничение поворота не предусмотрено. По умолчанию ограничения поворотов относительно осей выбранной системы координат отсутствуют.

Типичный порядок действий при задании дистанционных перемещений

- 1) Инициировать команду «Дистанционное перемещение» .
- 2) Выбрать грани/ребра для приложения нагрузки.
- 3) Выбрать удаленную точку (3D узел или вершину).

- 4) Выбрать систему координат.
- 5) Отметить необходимые перемещения/повороты по осям и задать их значения.
- 6) Завершить команду.

3.4.2. НАГРУЖЕНИЯ

Результат анализа напрямую зависит от заданных нагрузок, которые определены пользователем для конкретной задачи. В системе можно задать нагрузки, которые подразделяются на [механические и инерционные](#), [тепловые](#). Виды нагружений и закреплений зависят от типа задачи. В зависимости от вида, нагрузки прикладываются как к самим геометрически объектам, так и к граням, ребрам, вершинам используемого тела или к удалённой точке, жёстко связанной с объектом. Нагрузки полностью ассоциативны, то есть, способны автоматически перестраиваться при топологических изменениях модели.

При создании новых нагружений система добавляет их в набор для активной в настоящий момент задачи. Они размещаются в папку "**Нагружения**" дерева окна задач. Работа с ними осуществляется с помощью соответствующих команд системы, а также команд контекстного меню вызываемого при нажатии правой кнопки мыши в дереве задач.

Механические нагрузки

Механические начальные условия применяются в задачах динамического анализа (Линейная динамическая задача, расчёт динамических нестационарных процессов).

Тепловые нагрузки

Этот тип начальных условий применяется при моделировании задач теплового анализа

Теплообмен представляет собой процесс передачи тепла из области с более высокой температурой в область с более низкой температурой.

3.4.2.1. МЕХАНИЧЕСКИЕ И ИНЕРЦИОННЫЕ НАГРУЗКИ

Этот тип нагрузок применяется при моделировании задач линейного и нелинейного статического анализа прочности конструкции (*Статическая прочность*), при расчёте величин критических нагрузок потери устойчивости и соответствующих им форм конструкции (*Анализ Устойчивости*), а также – при моделировании расчёта с учётом усталости при циклическом нагружении.

Основные темы в этом разделе:

- [Сила](#)
- [Давление](#)
- [Вращение](#)
- [Ускорение](#)
- [Сила тяжести](#)
- [Цилиндрическая нагрузка](#)
- [Крутящий момент](#)
- [Осцилятор](#)
- [Дистанционная масса](#)
- [Дистанционная сила](#)
- [Дистанционный момент](#)

- [Начальная скорость](#)
- [Начальное ускорение](#)

3.4.2.1.1. СИЛА

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия > Сила > Сила
Клавиатура	Текстовое меню
<3MF>	Анализ > Нагружение > Сила

Сила представляет собой вид нагружения, применяющийся для задания сосредоточенной нагрузки, а также для задания суммарной величины распределённой нагрузки.

После вызова команды необходимо выбрать элементы модели для приложения нагрузки.

При помощи опции автоменю:



<E> Выбрать элемент для нагружения

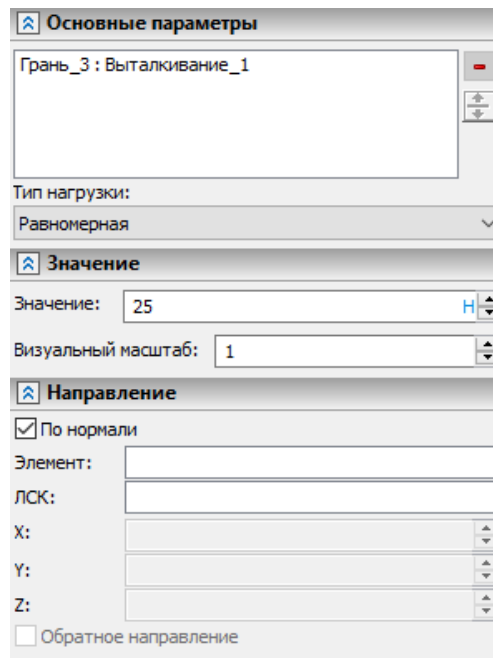
Выберите грани, ребра или вершины рассчитываемой модели. Выбранные элементы будут добавлены в список.

Так как при помощи Силы можно задать суммарную величину погонной (поверхностной) нагрузки, то необходимо определить, каким образом эта величина будет распределена по длине ребра (по площади грани). В окне **Параметры** необходимо задать тип нагрузки:

- **равномерная;**
- **неравномерная.**

Сила как суммарная величина равномерно распределённой нагрузки

При определении **Силы** как суммарной величины равномерно распределённой нагрузки необходимо задать числовое значение, единицы измерения и направление её действия.



Числовое значение. Под числовым значением будем понимать суммарную величину равномерно распределённой по длине ребра (по площади грани) нагрузки.

При равномерном распределении Силы на единицу длины ребра (на единицу площади грани) приходится величина, равная отношению заданной величины нагрузки к длине ребра (к площади грани).

Следует также заметить, что если величина нагружения задаётся одновременно для нескольких элементов (допускается выбор элементов только одного типа: вершин, рёбер или граней), то её значение будет распределено между ними следующим образом:

- На единицу площади каждой грани будет приходиться величина нагружения, равная отношению заданной величины нагрузки к суммарной площади граней;
- На единицу длины каждого ребра - величина, равная отношению заданной величины нагрузки к суммарной длине рёбер;
- В каждую вершину будет прикладываться часть силы, равная $1/n$, где n - число вершин.

Задание зависимости значения силы от времени возможно только в нестационарных задачах.

Подробнее в разделе "[Использование графиков для задания параметров, меняющихся в зависимости от времени или температуры](#)".

Единицы измерения. Для нагрузки Сила могут быть установлены следующие единицы измерения: Н, ФС, КГС.

Направление действия нагрузки. В качестве направления действия Силы, можно выбрать нормаль к нагружаемой грани, элемент 3D модели или некоторый радиус-вектор, заданный в выбранной пользователем локальной системе координат (если локальная система координат не задана, то, по умолчанию, будет использоваться глобальная система координат).

Для работы с локальной системой координат используйте опции:



<C> Выбрать систему координат



<K> Отменить выбор системы координат

Для задания направления действия силы при помощи объекта 3D модели используйте опцию автоменю:



<D> Выбрать направление

Для отмены выбора направления используйте опцию:



<U> Отменить выбор направления

Для быстрой смены направления действия **Силы** на противоположное можно установить флажок «Обратное направление».

Сила как суммарная величина неравномерно распределённой нагрузки

При определении **Силы** как суммарной величины неравномерно распределённой нагрузки кроме числового значения, единиц измерения и направления её действия необходимо задать качественный закон распределения, в соответствии с которым заданная величина нагружения будет распределена по площади грани.

Основные параметры

Грань_1 : Выталкивание_0

Тип нагрузки:
Неравномерная

Значения

Суммарная сила: 10

Значение: 10 Н

Интерполяция: Линейная

Распределение

Колонки: 2 Строк: 2

10	10	
10	10	

Экспорт... Импорт...

Визуальный масштаб: 0.1

Направление

☒ По нормали

Элемент:

ЛСК:

X:

Y:

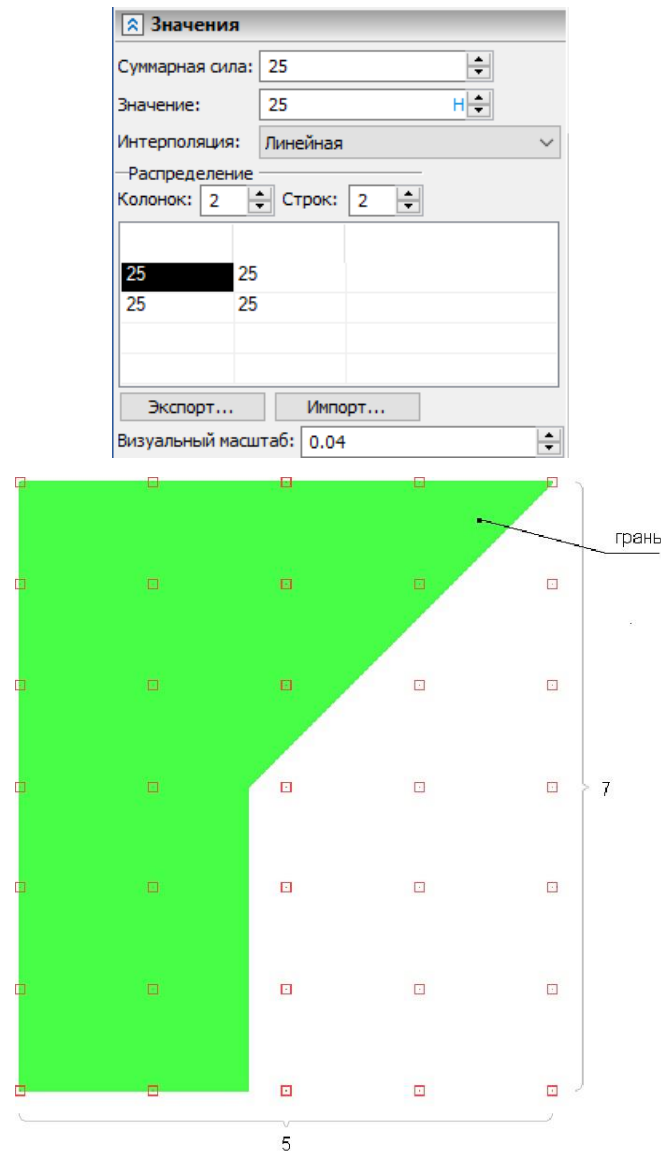
Z:

☐ Обратное направление

Числовое значение. Под числовым значением будем понимать суммарную величину неравномерно распределённой по площади грани нагрузки.

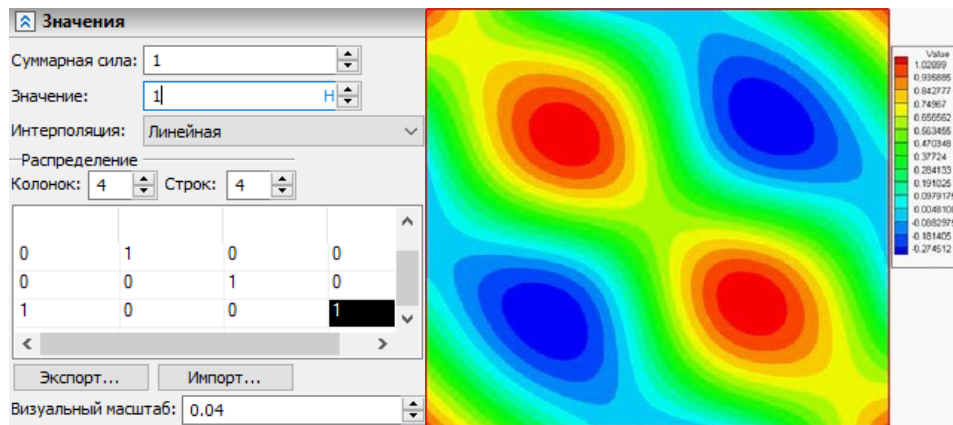
Единицы измерения. Для нагрузки Сила могут быть установлены следующие единицы измерения: Н, ФС, КГС.

Закон распределения. На прямоугольнике, описывающем грань, выбранную в качестве места приложения неравномерной нагрузки, строится равномерная сетка узлов. Густота сетки определяется числом строк и столбцов таблицы распределения. В ячейках таблицы указывается значение функции в соответствующем узле сетки.

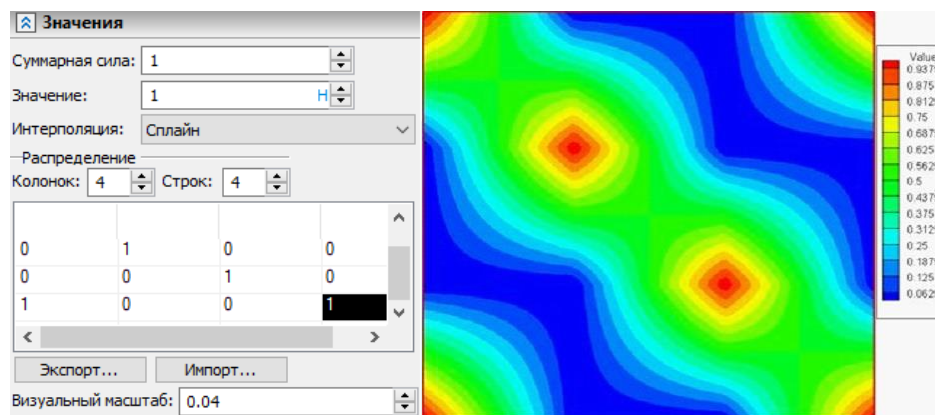


Интерполяция. Поскольку значения функции распределения известны только в узлах сетки (т.е. заданы таблицей), необходимо восстановить данную функцию для любой точки грани. В T-FLEX Анализ применяется два способа восстановления функции по известным значениям: линейная интерполяция (строится линейная зависимость между значениями в узлах сетки) и построение сплайна.

На рисунках приведены примеры функции распределения неравномерной нагрузки, полученной при помощи линейной интерполяции и построения сплайна.



Пример функции распределения неравномерной нагрузки, полученной построением сплайна



Пример функции распределения неравномерной нагрузки, полученной при помощи линейной интерполяции

Направление действия нагрузки. В качестве направления действия Силы, можно выбрать нормаль к нагружаемой грани, элемент 3D модели или некоторый радиус-вектор, заданный в выбранной пользователем локальной системе координат (если локальная система координат не задана, то, по умолчанию, будет использоваться глобальная система координат). Для работы с локальной системой координат используйте опции:



<C> Выбрать систему координат



<K> Отменить выбор системы координат

Для задания направления действия силы при помощи объекта 3D модели используйте опцию автоменю:



<D> Выбрать направление



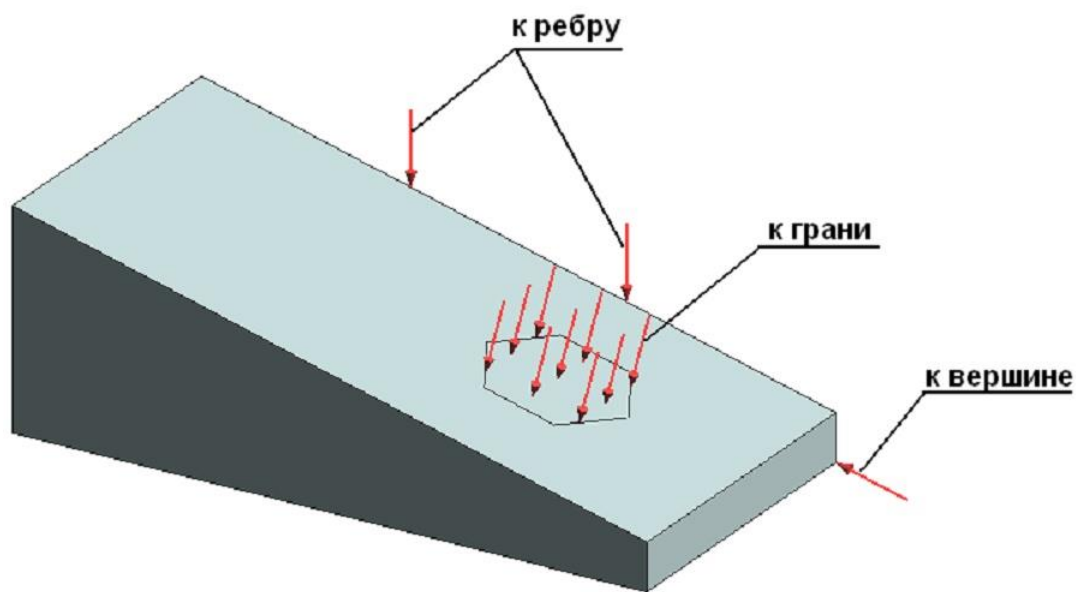
<U> Отменить выбор направления

Для быстрой смены направления действия **Силы** на противоположное можно установить флажок «**Обратное направление**».

В 3D сцене нагрузка «**Сила**» изображается в виде стрелок. Стрелки показывают направление действия нагрузки.

Во многих случаях распределённая нагрузка должна быть приложена не на всю грань или ребро модели, а на какую-то определенную часть этой грани или ребра, соответствующую области передачи внешнего воздействия.

Для того чтобы приложить воздействие на часть грани, необходимо сначала создать на грани геометрию нужной формы, а затем воспользоваться операцией **Разделение граней** во вкладке ленты **Поверхности**.



Задание нагрузки «Сила»

Типичный порядок действий при задании нагрузки «Сила»

- 1) Инициировать команду «Сила».
- 2) Выбрать грань, ребро, вершину, узел или последовательность элементов.
- 3) Задать величину нагрузки.
- 4) Задать единицы измерения.
- 5) Выбрать тип нагрузки: равномерная или неравномерная.
- 6) Для неравномерной нагрузки задать качественный закон распределения.
- 7) Задать направление действия нагрузки.
- 8) Завершить команду.

3.4.2.1.2. ДАВЛЕНИЕ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия > Сила > Давление
Клавиатура	Текстовое меню
<3MS>	Анализ > Нагружение > Давление

Давление представляет собой вид нагружения, применяющийся для задания распределённой нагрузки.

После вызова команды необходимо выбрать элементы модели для приложения нагрузки.

При помощи опции автоменю:



<E> Выбрать элемент для нагружения

Выберите грань или ребро рассчитываемой модели. Выбранные элементы будут добавлены в список.

Так как при помощи **Давления** можно задать распределённую нагрузку, то необходимо определить характер этого распределения по длине ребра или по площади грани. В окне Параметры задайте тип нагрузки:

- равномерная;
- неравномерная;
- гидростатическая.

Давление как равномерно распределённая нагрузка

При определении **Давления** как равномерно распределённой нагрузки необходимо задать числовое значение, единицы измерения и направление её действия.

Основные параметры

Грань_3 : Выталкивание_1

Тип нагрузки:
Равномерная

Значение

Значение: 20 Па

Визуальный масштаб: 0.04

Направление

☒ По нормали

Элемент:

ЛСК:

X:

Y:

Z:

☐ Обратное направление

Числовое значение. Под числовым значением будем понимать величину нагружения, приходящуюся на единицу площади грани или на единицу длины ребра. Задание зависимости значения давления от времени возможно только в нестационарных задачах.

Подробнее в разделе "[Использование графиков для задания параметров, меняющихся в зависимости от времени или температуры](#)".

Единицы измерения. Для нагрузки Давление, приложенной к грани, могут быть установлены следующие единицы измерения: Н/м², ФС/Дюйм², КГС/см².

Для нагрузки Давление, заданной на ребро, могут быть установлены следующие единицы измерения: Н/м, ФС/Дюйм, КГС/см.

Направление действия нагрузки. В качестве направления действия Давления, можно выбрать нормаль к нагружаемой грани, элемент 3D модели или некоторый радиус-вектор, заданный в выбранной пользователем локальной системе координат (если локальная система координат не задана, то, по умолчанию, будет использоваться глобальная система координат). По умолчанию, в локальной системе координат направление действия нагрузки задано вдоль оси X.

Для работы с локальной системой координат используйте опции:



<C> Выбрать систему координат



<K> Отменить выбор системы координат

Для задания направления действия нагрузки Давление при помощи объекта 3D модели используйте опцию автоменю:



<D> Выбрать направление

Для отмены выбора направления используйте опцию:



<U> Отменить выбор направления

Для быстрой смены направления действия нагрузки на противоположное можно установить флажок «Обратное направление».

Давление как неравномерно распределённая нагрузка

При определении **Давления** как неравномерной нагрузки необходимо задать единицы измерения, направление её действия и закон распределения, в соответствии с которым данная нагрузка будет определена в каждой точке грани.

Основные параметры

Грань_1 : Выталкивание_0

Тип нагрузки:
Неравномерная

Значения

Суммарная сила:

Значение: Па

Интерполяция: Линейная

Распределение

Колонки: Строк:

0	0
0	0

Экспорт... Импорт...

Визуальный масштаб:

Направление

☒ По нормали

Элемент:

ЛСК:

X:

Y:

Z:

☐ Обратное направление

Закон распределения. На прямоугольнике, описывающем грань, выбранную в качестве места приложения неравномерной нагрузки, строится равномерная сетка узлов. Густота сетки определяется числом строк и столбцов таблицы распределения. В ячейках таблицы указывается значение функции в соответствующем узле сетки.

Интерполяция. Поскольку значения функции распределения известны только в узлах сетки (т.е. заданы таблицей), необходимо восстановить данную функцию для любой точки грани.

В T-FLEX Анализ применяется два способа восстановления функции по известным значениям: билинейная интерполяция (строится линейная зависимость между значениями в узлах сетки) и построение сплайна.

Единицы измерения. Для нагрузки Давление, приложенной к грани, могут быть установлены следующие единицы измерения: Н/м², ФС/Дюйм², КГС/см².

Направление действия нагрузки. В качестве направления действия Давления, можно выбрать нормаль к нагружаемой грани, элемент 3D модели или некоторый радиус-вектор, заданный в выбранной пользователем локальной системе координат (если локальная система координат не задана, то, по умолчанию, будет использоваться глобальная система координат). По умолчанию, в локальной системе координат направление действия нагрузки задано вдоль оси X.

Для работы с локальной системой координат используйте опции:



<C> Выбрать систему координат



<K> Отменить выбор системы координат

Для задания направления действия нагрузки Давление при помощи объекта 3D модели используйте опцию автоменю:



<D> Выбрать направление

Для отмены выбора направления используйте опцию:

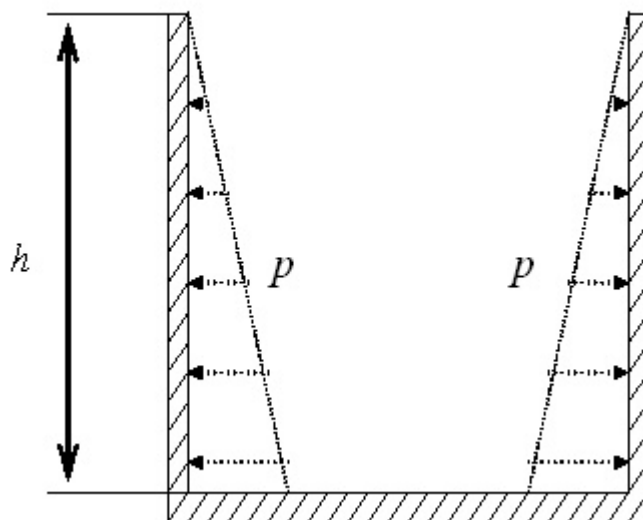


<U> Отменить выбор направления

Для быстрой смены направления действия нагрузки на противоположное можно установить флажок «**Обратное направление**».

Гидростатическое давление

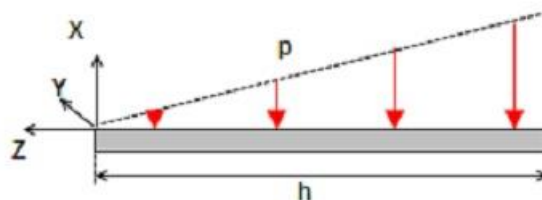
Гидростатическое давление (или давление жидкости) является частным случаем неравномерно распределённой нагрузки Давление. Примером такой нагрузки может служить давление жидкости на стенки сосуда, изменяющееся с высотой по закону $p = \rho h$, где h - высота столба жидкости плотностью ρ .



При определении **Давления** как гидростатической нагрузки необходимо задать плотность жидкости, единицы измерения и определить направление изменения нагрузки.

Направление изменения нагрузки. Нагрузка **Гидростатическое давление** действует по нормали к нагружаемой грани. Необходимо задать направление изменения нагрузки, то есть направление, в котором действие нагрузки увеличивается.

Для того чтобы задать направление изменения нагрузки, необходимо выбрать локальную систему координат. Направление изменения (увеличения) нагрузки будет определяться направлением, противоположным направлению оси Z выбранной системы координат:



Нулевое значение нагрузки, соответствующее верхнему уровню жидкости, совпадает в пространстве с координатой $Z=0$ локальной системы координат, определяющей направление изменения нагрузки.

Для работы с локальной системой координат используйте опции:

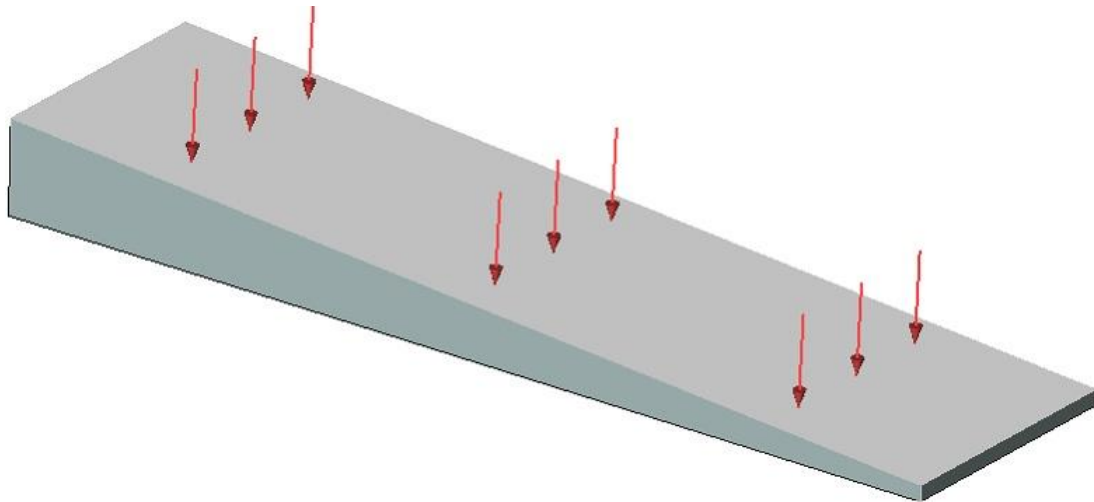


<C> Выбрать систему координат



<K> Отменить выбор системы координат

В 3D сцене нагрузка Давление отображается следующим образом:



Задание нагрузки «Давление»

Типичный порядок действий при задании нагрузки Давление

- 1) Инициировать команду «Давление».
- 2) Выбрать грань, ребро или последовательность элементов.
- 3) Выбрать тип нагрузки: равномерная, неравномерная или гидростатическая.
- 4) Для равномерно распределённой нагрузки задать числовое значение.
- 5) Для неравномерной нагрузки задать закон распределения.
- 6) Для гидростатического давления задать плотность жидкости и выбрать ЛСК верхнего уровня жидкости.
- 7) Задать единицы измерения.
- 8) Задать направление.
- 9) Завершить команду.

3.4.2.1.3. ВРАЩЕНИЕ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия > Сила > Вращение
Клавиатура	Текстовое меню
<3RB>	Анализ > Нагружение > Вращение

Вращение представляет собой вид нагружения, применяющийся для имитации центробежной силы, которая возникает при равномерном или равноускоренном вращении объекта. После вызова команды нужно выбрать одно или несколько тел для приложения нагрузки. Выберите тела рассчитываемой модели. Они будут добавлены в список.

Можно сразу выбрать все тела в задаче при помощи опции автоменю:



<M> Выбрать все тела

Вращение всегда происходит относительно некоторой оси, поэтому её необходимо задать. В качестве оси вращения может выступать либо элемент 3D модели (ребро, ось цилиндрической грани и т.д.), либо специально построенная линия (например, 3D путь, построенный по двум 3D узлам), либо одна из осей локальной системы координат. Направление оси вращения определяет направление действия нагрузки (по правилу правого буравчика).

Для выбора оси вращения используйте опцию автоменю:



<D> Выбрать ось вращения

В качестве оси вращения может выступать либо элемент 3D модели (ребро, ось цилиндрической грани и т.д.), либо специально построенная линия (например, 3D-путь, построенный по двум 3D-узлам), либо одна из осей локальной системы координат.

Отменить выбор оси вращения позволяет опция:

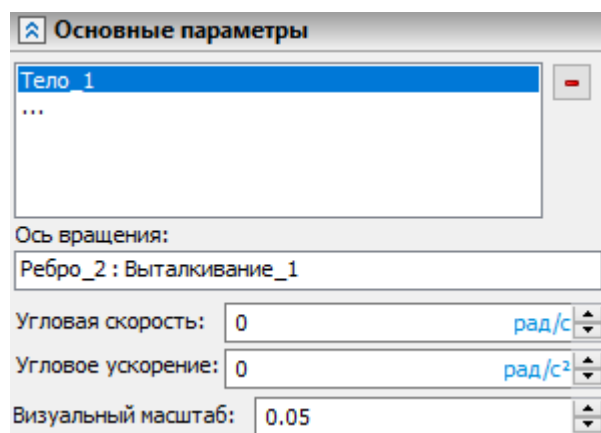


<C> Отменить выбор оси

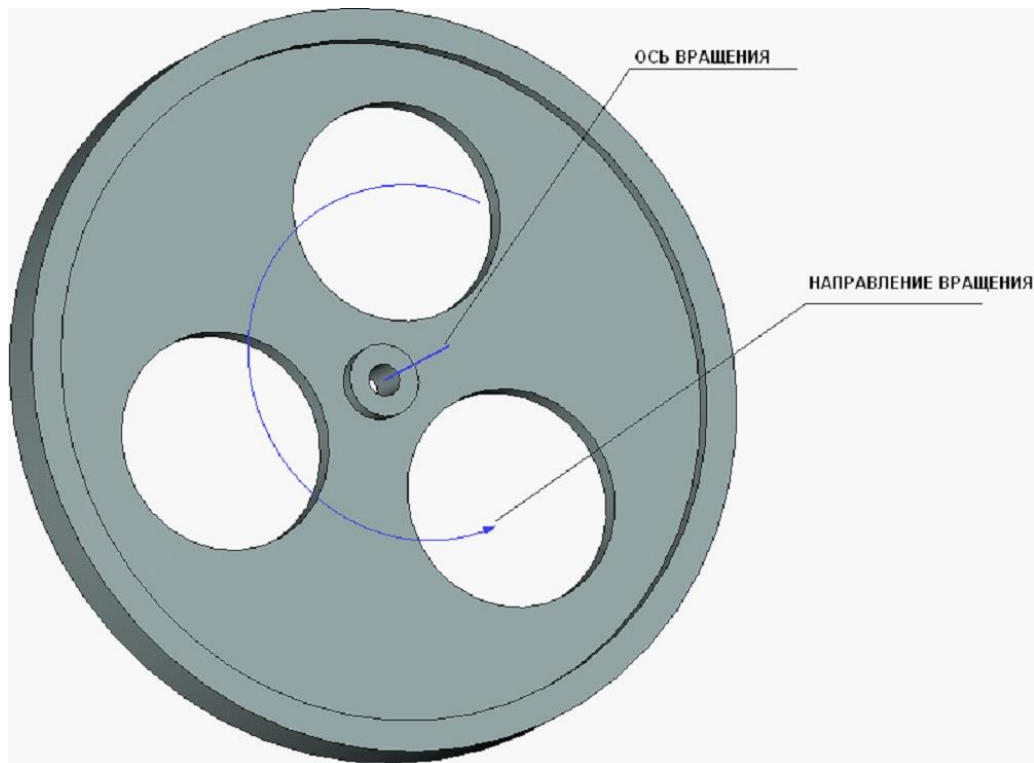
В окне параметров нагрузки необходимо задать значения угловой скорости и углового ускорения.

Для угловой скорости могут быть установлены следующие единицы измерения: радиан в секунду [рад/с], градус в секунду [град/с], оборотов в секунду [Гц], оборотов в минуту [Об/мин].

Для углового ускорения задаются следующие единицы измерения: радиан в секунду в квадрате [рад/с²], градус в секунду в квадрате [град/с²], оборотов в секунду в квадрате [Гц/с²], оборотов в минуту в квадрате [Об/мин²].



В 3D сцене нагрузка **Вращение** отображается следующим образом:



Задание вращательного движения

Типичный порядок действий при задании нагрузки «Вращение»

- 1) Инициировать команду «Вращение».
- 2) Задать ось вращения.
- 3) Задать значения и единицы измерения угловой скорости и углового ускорения в окне параметров команды.
- 4) Завершить команду.

3.4.2.1.4. УСКОРЕНИЕ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия > Сила > Ускорение
Клавиатура	Текстовое меню
<ЗМА>	Анализ > Нагружение > Ускорение

Ускорение создаёт равномерное воздействие на всякое тело, обладающее массой. Данное воздействие равномерно распределено по всему объёму выбранного тела. Ускорение будет действовать на все тела, входящие в задачу.

В окне параметров задайте:

- Величину нагрузки. В нестационарных задачах возможно задание зависимости значения ускорения от времени, см. раздел "Использование графиков для задания параметров, меняющихся в зависимости от времени или температуры".
- Единицы измерения: м/с², см/с², дюйм/с².
- Направление действия нагрузки.

Направление действия нагрузки. В качестве направления действия ускорения, можно выбрать элемент 3D модели или некоторый радиус-вектор, заданный в выбранной пользователем локальной системе координат (если локальная система координат не задана, то, по умолчанию, будет использоваться глобальная система координат). По умолчанию, в локальной системе координат направление действия нагрузки задано вдоль оси X.

Для работы с локальной системой координат используйте опции:



<C> Выбрать систему координат



<K> Отменить выбор системы координат

Для задания направления действия нагрузки Ускорение при помощи объекта 3D модели используйте опцию автоменю:



<D> Выбрать направление

Для отмены выбора направления используйте опцию:



<U> Отменить выбор направления

Для смены направления действия нагрузки на противоположное можно установить флажок «Обратное направление».

Типичный порядок действий при задании нагрузки Ускорение

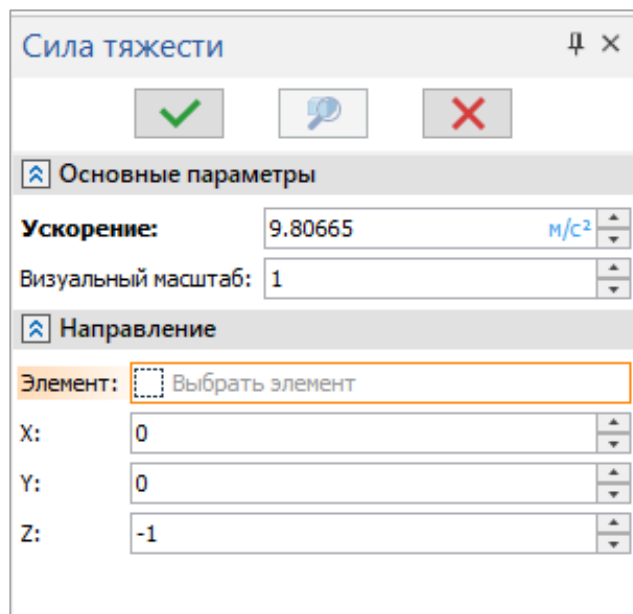
- 1) Инициировать команду «Ускорение».
- 2) Задать величину нагрузки.
- 3) Задать направление действия нагрузки.
- 4) Завершить команду.

3.4.2.1.5. СИЛА ТЯЖЕСТИ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия > Сила > Сила тяжести
Клавиатура	Текстовое меню
<3MG>	Анализ > Нагружение > Сила тяжести

Для быстрого задания силы тяжести имеется команда **Сила тяжести**, которая устанавливает значение ускорения $\sim 9.81 \text{ м/с}^2$ и задаёт направление действия нагрузки вдоль оси Z глобальной системы координат, равное -1 для всех тел в задаче.



Сила тяжести

✓ 🔍 ✗

Основные параметры

Ускорение: 9.80665 м/с^2

Визуальный масштаб: 1

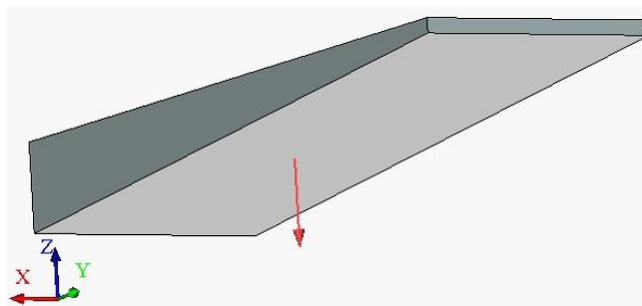
Направление

Элемент:

X: 0

Y: 0

Z: -1



В окне параметров задайте:

- Величину нагрузки. По умолчанию устанавливает значение ускорения $\sim 9.81 \text{ м/с}^2$ (ускорение свободного падения).
- Единицы измерения: м/с^2 , см/с^2 , дюйм/с^2 .
- Направление действия нагрузки. По умолчанию задаётся направление действия нагрузки вдоль оси Z глобальной системы координат, равное -1 для всех тел в задаче.

Направление действия нагрузки. В качестве направления действия нагрузки, можно выбрать элемент 3D модели или некоторый радиус-вектор, заданный в выбранной пользователем локальной системе координат (если локальная система координат не задана, то, по умолчанию, будет использоваться глобальная система координат).

Для работы с локальной системой координат используйте опции:



<C> Выбрать систему координат



<K> Отменить выбор системы координат

Для задания направления действия нагрузки Ускорение при помощи объекта 3D модели используйте опцию автоменю:



<D> Выбрать направление

Для отмены выбора направления используйте опцию:



<U> Отменить выбор направления

Для смены направления действия нагрузки на противоположное можно установить флажок «Обратное направление».

Типичный порядок действий при задании нагрузки Сила тяжести

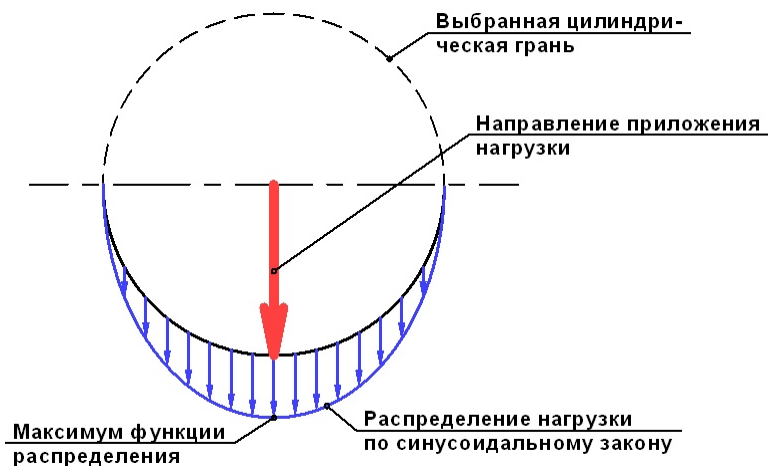
- 1) Инициировать команду «Сила тяжести».
- 2) Задать направление действия нагрузки.
- 3) Завершить команду.

3.4.2.1.6. ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ НАГРУЗКА

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия > Сила > Цилиндрическая нагрузка
Клавиатура	Текстовое меню
<ЗМВ>	Анализ > Нагружение > Цилиндрическая нагрузка

Цилиндрическая нагрузка имитирует нагрузку, возникающую от направленного воздействия таких деталей, как ось, подшипник или вал. В качестве места приложения нагрузки используется цилиндрическая грань. Заданная сила распределяется по синусоидальному закону (см. иллюстрацию).



После вызова команды необходимо выбрать элементы (цилиндрические грани) модели для приложения нагрузки. При помощи опции автоменю:



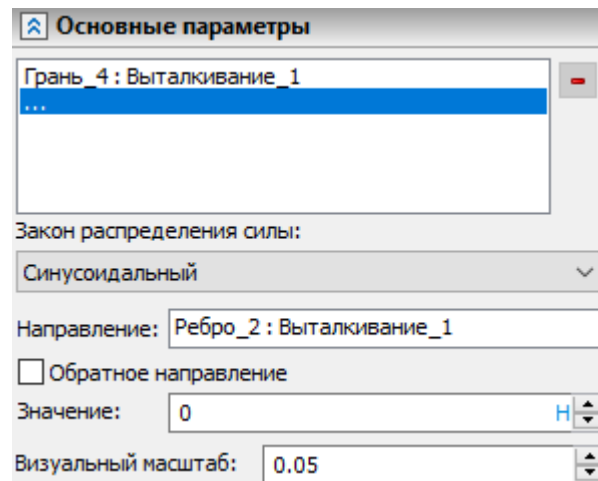
<F> Выбрать цилиндрическую грань

Выберите цилиндрическую грань рассчитываемой модели. Выбранный элемент будет добавлен в список.

В окне Параметры задайте:

- Величину нагрузки.
- Единицы измерения: Н; КГС, ФС.
- Направление действия нагрузки.

Направление действия нагрузки. В качестве направления действия Цилиндрической нагрузки, можно выбрать элемент 3D модели или координатные оси системы координат. В нестационарных задачах возможно задание зависимости значения нагрузки от времени, см. раздел "[Использование графиков для задания параметров, меняющихся в зависимости от времени или температуры](#)".



Для задания направления действия Цилиндрической нагрузки используйте опцию авто-меню:



<D> Выбрать направление

В качестве направления действия нагрузки может выступать либо элемент 3D модели (ребро, ось цилиндрической грани и т.д.), либо специально построенная линия (например, 3D-путь, построенный по двум 3D-узлам), либо одна из осей локальной системы координат.

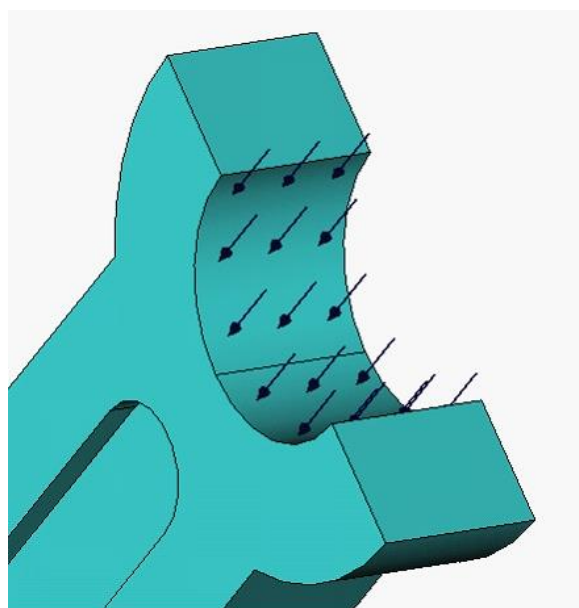
Для отмены выбора направления используйте опцию:



<U> Отменить выбор направления

Для смены направления действия нагрузки на противоположное можно установить флажок «Обратное направление».

В 3D сцене «Цилиндрическая нагрузка» отображается следующим образом:



Задание «Цилиндрической нагрузки»

Типичный порядок действий при задании Цилиндрической нагрузки

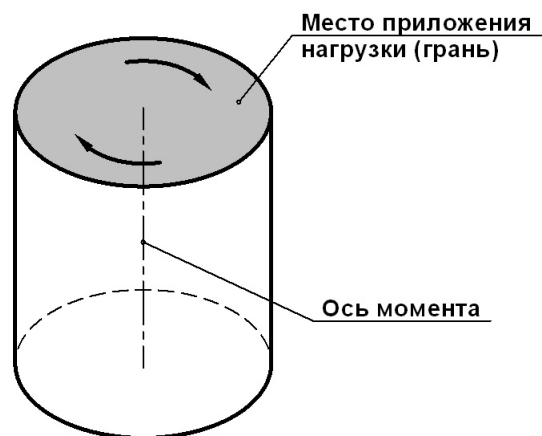
- 1) Инициировать команду «Цилиндрическая нагрузка».
- 2) Выбрать цилиндрическую грань или набор граней.
- 3) Задать величину нагрузки.
- 4) Задать направление действия нагрузки.
- 5) Завершить команду.

3.4.2.1.7. КРУТЯЩИЙ МОМЕНТ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия > Сила > Крутящий момент
Клавиатура	Текстовое меню
<ЗММ>	Анализ > Нагружение > Крутящий момент

Крутящий момент представляет собой воздействие момента указанной величины, распределенное по указанной грани.

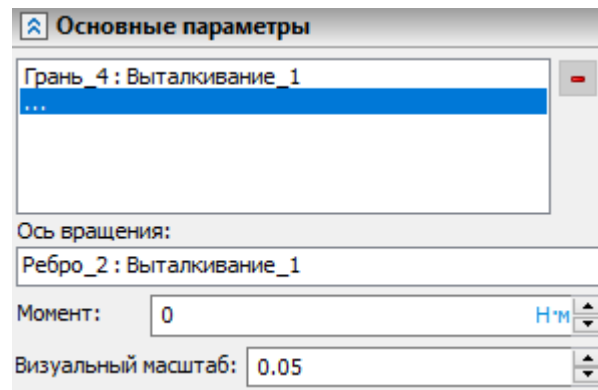


В качестве места приложения нагрузки используются грани. Для выбора граней используйте опцию автоменю:



<F> Выберите грань

Выбранные грани заносятся в список.



В окне Параметры задайте:

- Величину нагрузки.
- Единицы измерения: Н-м, КГС-см, ФС-дюйм.
- Ось момента.

Направление оси момента (или оси вращения) определяет направление действия нагрузки (по правилу правого буравчика). В качестве оси вращения может выступать либо элемент 3D модели (ребро, ось цилиндрической грани и т.д.), либо специально построенная линия (например, 3D-путь, построенный по двум 3D-узлам), либо одна из осей локальной системы координат.

В нестационарных задачах возможно задание зависимости значения нагрузки от времени, см. раздел "[Использование графиков для задания параметров, меняющихся в зависимости от времени или температуры](#)".

Для выбора оси вращения используйте опцию автоменю:



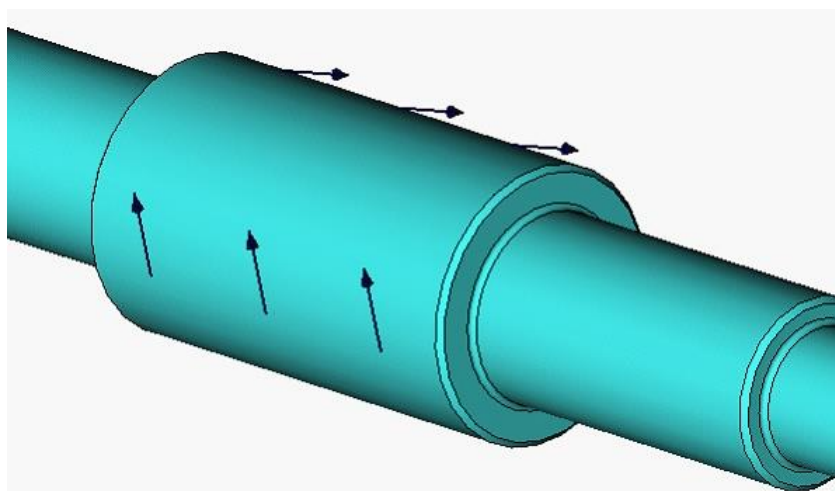
<A> Выбрать ось вращения

Отменить выбор оси вращения позволяет опция:



<C> Отменить выбор оси

В 3D сцене нагрузка «Крутящий момент» отображается следующим образом:



Задание нагрузки «Крутящий момент»

Типичный порядок действий при задании нагрузки «Крутящий момент»

- 1) Инициировать команду «Крутящий момент».
- 2) Выбрать нагружаемые грани тела.
- 3) Задать величину нагрузки.
- 4) Задать ось вращения.
- 5) Завершить команду.

3.4.2.1.8. ОСЦИЛЛЯТОР

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия > Сила > Осциллятор
Клавиатура	Текстовое меню
<ЗМЗО>	Анализ > Нагружение > Осциллятор

Осциллятор (кинематическая нагрузка) представляет собой вид нагружения, применяющегося в задачах динамического анализа: вынужденные колебания, линейная динамическая задача и динамические нестационарные процессы для задания **т.н. кинематического возбуждения колебаний**. В задаче "Вынужденные колебания" осциллятор используется для задания гармонического колебательного движения элемента конструкции, испытывающей вибрацию. В двух других динамических задачах есть возможность задать перемещение конструкции или её элементов по произвольному временному закону (см. раздел "[Использование графиков для задания параметров, меняющихся в зависимости от времени или температуры](#)").

После вызова команды необходимо выбрать элементы модели для приложения нагрузки. При помощи опции автоменю:



<E>

Выбрать элемент для кинематического нагружения

Выберите элементы рассчитываемой модели. Выбранный элемент будет добавлен в список. Можно сразу выбрать все тела в задаче при помощи опции автоменю:



<M>

Выбрать все тела

В окне Параметры задайте:

- Тип значений нагрузки по осям;
- Величину и направление действия нагрузки;
- Единицы измерения для различных типов нагрузки: м, м/с, м/с²;
- Фазовый сдвиг, единицы измерения: град, рад.

Значения по осям, тип. Перед заданием значений кинематической нагрузки необходимо выбрать тип параметра, определяющего амплитуду колебания. Количественно амплитуда

движения элемента конструкции может быть задана несколькими равнозначными способами через амплитуды: перемещений U_m , мм, см, м, дюймы, футы;

скорости $\dot{U}_m = U_m \cdot \omega_f$, мм/с, см/с, м/с, дюйм/с, фут/с;

ускорения $\ddot{U}_m$, мм/с², см/с², м/с², дюйм/с², фут/с²;

перегрузки $\ddot{U}_m / g = U_m \cdot \omega_f^2 / g$, раз;

где ω - частота вынужденных колебаний, рад/с; g - ускорение свободного падения, м/с².

Как видно, все величины, кроме амплитуды перемещения, являются вторичными и однозначно выражаются через амплитуду колебания и частоту вынужденного колебания.

Частота колебания задается в диалоге настроек расчета **"Вынужденные гармонические колебания"** непосредственно перед выполнением расчета.

Величина и направление действия кинематической нагрузки

В качестве направления действия нагрузки, можно выбрать некоторый радиус-вектор, заданный в выбранной пользователем локальной системе координат (если локальная система координат не задана, то, по умолчанию, будет использоваться глобальная система координат). Поставьте галочки напротив тех осей, вдоль которых будет задаваться величина составляющей нагрузки по данной оси.

Для работы с локальной системой координат используйте опции:



<C>

Выбрать систему координат



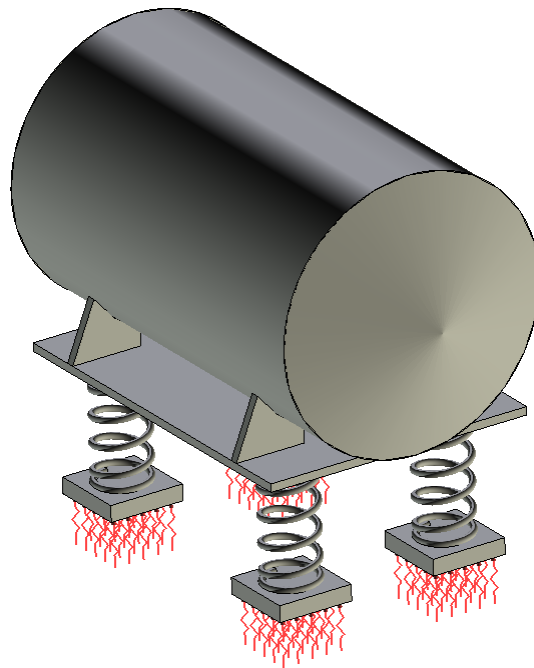
<K>

Отменить выбор системы координат

Величины составляющих нагрузки, разложенной по осям системы координат, вводятся в поля, соответствующие отмеченным галочкой осям. По умолчанию вводятся значения с типом амплитуда перемещений, мм.

Фазовый сдвиг используется при наличии в задаче нескольких гармонических воздействий (силовых или кинематических) для задания запаздывания или опережения по фазе одной нагрузки относительно другой.

В 3D сцене нагрузка «**Осциллятор**» отображается следующим образом:



Отображение нагрузки «Осциллятор»

Типичный порядок действий при задании нагрузки Осциллятор

- 1) Инициировать команду «Осциллятор» .
- 2) Выбрать грани, ребра, вершины и/или тела; выбрать систему координат.
- 3) Задать значения и единицы измерения вибрационных амплитуд для компонентов перемещений, скорости или ускорения в окне параметров команды.
- 4) Задать фазовый сдвиг и единицы его измерения.
- 5) Завершить команду.

3.4.2.1.9. ДИСТАНЦИОННАЯ МАССА

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия > Сила > Дистанционная масса
Клавиатура	Текстовое меню
<3МЗУ>	Анализ > Нагружение > Дистанционная масса

Дистанционная масса представляет собой вид нагружения, применяющегося для задания дополнительной инерционной нагрузки от части конструкции, не включённой явно в задачу. Нагрузка прикладывается к дистанционной точке, представляющей центр масс отброшенной части конструкции. В статических задачах учитывается только масса, в динамических - еще и моменты инерции. Используется во всех типах задач.

После вызова команды необходимо выбрать элементы модели для приложения нагрузки. С помощью опции автоменю:

<E> Выбрать элемент для нагружения

Выберите грани, ребра или вершины рассчитываемой модели. Выбранные элементы будут добавлены в список.

Имеются особенности задания нагрузки в задачах статики и динамики.

В задачах статики нужно задать:

- Дистанционную точку. Эта точка представляет центр масс отброшенной части конструкции, замененной дистанционной массой. В качестве точки можно выбрать 3D узел, начало ЛСК, вершину проволоочной или твердотельной геометрии и т.д. в соответствии с настройками фильтра.
- Величину нагрузки в кг; можно использовать переменные, в которые записан результат измерения массы какого-либо тела или операции. В нестационарных задачах возможно задание зависимости значения массы от времени. Подробную информацию можно посмотреть в [специальном разделе об использовании графиков](#).
- Единицы измерения массы: кг, фунты;
- В группе **Параметры ускорения**, задайте значение ускорения, которое определяет действующий вес;
- Единицы измерения ускорения: м/с², см/с², дюйм/с² фунты/с².
- ЛСК для направления действия ускорения.
- Выполнение последних 3х действий можно заменить нажатием кнопки "**Сила тяжести**"

Дистанционная масса

Дистанционная масса

Значение: 0 кг

Визуальный масштаб: 1

Дистанционная точка: ...

Параметры ускорения

Значение: 0 м/с²

Направление

Элемент: ...

ЛСК: ...

X: 1

Y: 0

Z: 0

☐ Обратное направление

Сила тяжести

Задача статики

В задачах динамики нужно задать:

- Дистанционную точку. Эта точка представляет центр масс отброшенной части конструкции, замененной дистанционной массой. В качестве точки можно выбрать 3D узел, начало ЛСК, вершину проволоочной или твердотельной геометрии и т.д. в соответствии с настройками фильтра.
- Величину нагрузки в кг; можно использовать переменные, в которые записан результат измерения массы какого-либо тела или операции. В нестационарных задачах возможно задание зависимости значения массы от времени. Подробную информацию можно посмотреть в [специальном разделе об использовании графиков](#).
- Единицы измерения массы: кг, фунты;
- Моменты инерции: рассчитанные для системы координат, помещенной в центре тяжести отброшенной конструкции, замененной удаленной массой, оси которой выровнены с осями глобальной системы координат. Для симметричных относительно ЛСК конструкций достаточно моментов инерции L_{xx} , L_{yy} , L_{zz} , которые могут совпадать в зависимости от числа осей симметрии.
- Единицы измерения моментов инерции: кг/м², г/см², фунты/дюйм², фунты/фут².

- ЛСК в которой рассчитывались моменты инерции.

Дистанционная масса

✓ [иконка] ✗

Дистанционная масса

...

Значение: 0 кг

Визуальный масштаб: 1

Дистанционная точка: ...

ЛСК: ...

Момент инерции

☐ Lxx	0	кг*м ²
☐ Lyy	0	кг*м ²
☐ Lzz	0	кг*м ²
☐ Lxy	0	кг*м ²
☐ Lyz	0	кг*м ²
☐ Lxz	0	кг*м ²

Задача динамики

Типичный порядок действий при задании нагрузки «Дистанционная масса»

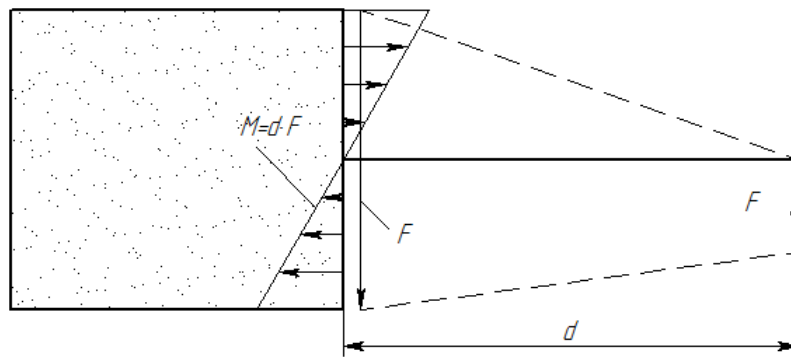
- Инициировать команду «Дистанционная масса».
- Выбрать грани, ребра, вершины.
- Задать значения и единицы измерения.
- Задать величину и направление ускорения.
- Завершить команду.

3.4.2.1.10. ДИСТАНЦИОННАЯ СИЛА

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия > Сила > Дистанционная сила
Клавиатура	Текстовое меню
<3M3F>	Анализ > Нагружение > Дистанционная сила

Дистанционная сила, применяется для задания суммарной величины распределённой нагрузки, которая действует из дистанционной точки посредством неупругих стержней, связывающих дистанционную точку с гранью с учетом возникающих при этом моментов.



После вызова команды необходимо выбрать элементы модели для приложения нагрузки. При помощи опции автоменю:

<F> Выбрать грань для нагружения

Выберите грани рассчитываемой модели. Выбранные элементы будут добавлены в список. В окне Параметры задайте:

- Точку приложения дистанционной силы. В качестве точки приложения Дистанционной силы, можно выбрать 3D узел, начало ЛСК, вершину проволоочной или твердотельной геометрии и т.д. в соответствии с настройками фильтра.
- Числовое значение. Под числовым значением будем понимать суммарную величину равномерно распределённой по площади грани нагрузки. Задается в поле "Значение". Задание зависимости значения нагрузки от времени возможно только в нестационарных задачах. Подробную информацию можно посмотреть в [специальном разделе об использовании графиков](#).
- Единицы измерения. Для нагрузки Дистанционная сила могут быть установлены следующие единицы измерения: Н, ФС, КГС.
- Направление действия нагрузки. В качестве направления действия Дистанционной силы, можно выбрать элемент 3D модели или некоторый радиус-вектор, заданный в выбранной пользователем локальной системе координат (если локальная система координат не задана, то, по умолчанию, будет использоваться глобальная система координат).

Для работы с локальной системой координат используйте опции:

<C> Выбрать систему координат

<K> Отменить выбор системы координат

Для задания направления действия **дистанционной силы** при помощи объекта 3D модели используйте опцию автоменю:

<D> Выбрать направление

Для отмены выбора направления используйте опцию:

<U> Отменить выбор направления

Для быстрой смены направления действия силы на противоположное можно установить флажок «**Обратное направление**».

Типичный порядок действий при задании дистанционных сил

- Инициировать команду «Дистанционная сила».
- Выбрать грани для приложения нагрузки.
- Выбрать удаленную точку (3D узел или вершину).
- Выбрать систему координат.
- Задать величину нагрузки и единицы измерения.
- Завершить команду.

3.4.2.1.11. ДИСТАНЦИОННЫЙ МОМЕНТ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия > Сила > Дистанционный момент
Клавиатура	Текстовое меню
<3M3Q>	Анализ > Нагружение > Дистанционный момент

Дистанционный момент, применяется для задания суммарного момента, приведенного непосредственно к грани. Задание дистанционной точки не требуется, достаточно только величины и направления момента.

После вызова команды необходимо выбрать элементы модели для приложения нагрузки. При помощи опции автоменю:

<F> Выбрать грань для нагружения

Выберите грани рассчитываемой модели. Выбранные элементы будут добавлены в список. В окне Параметры задайте:

- Числовое значение. Под числовым значением будем понимать суммарную величину равномерно распределённой по площади грани нагрузки. Задается в поле "Значение". Задание зависимости значения нагрузки от времени возможно только

в нестационарных задачах. Подробную информацию можно посмотреть в [специальном разделе об использовании графиков](#).

- Единицы измерения. Для нагрузки Дистанционный момент могут быть установлены следующие единицы измерения: Н-м, КГС-см, ФС-дюйм.
- Направление действия нагрузки. В качестве оси вращения дистанционного момента, используется направление. Для задания направления можно выбрать элемент 3D модели или некоторый радиус-вектор, заданный в выбранной пользователем локальной системе координат (если локальная система координат не задана, то, по умолчанию, будет использоваться глобальная система координат).

Для работы с локальной системой координат используйте опции:

<C> Выбрать систему координат

<K> Отменить выбор системы координат

Для задания направления действия **дистанционного момента** при помощи объекта 3D модели используйте опцию автоменю:

<D> Выбрать направление

Для отмены выбора направления используйте опцию:

<U> Отменить выбор направления

Для быстрой смены направления действия нагрузки на противоположное можно установить флажок «**Обратное направление**».

Типичный порядок действий при задании дистанционных моментов

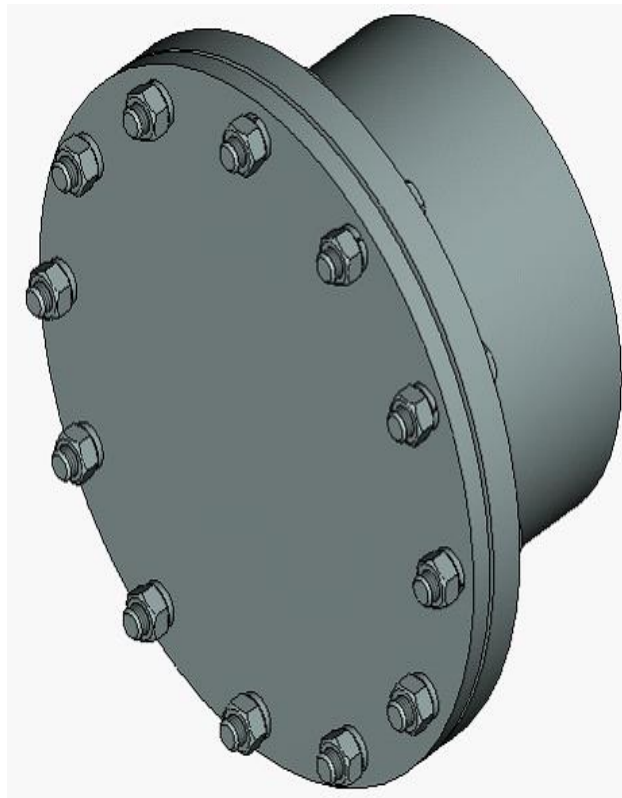
- Инициировать команду «Дистанционный момент».
- Выбрать грани для приложения нагрузки.
- Выбрать систему координат.
- Задать величину нагрузки и единицы измерения.
- Завершить команду.

3.4.2.1.12. НАЧАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия > Сила > Начальная скорость
Клавиатура	Текстовое меню
<3MV>	Анализ > Нагружение > Начальная скорость

После вызова команды необходимо выбрать элементы модели для приложения нагрузки. Выбранные тела заносятся в список сверху вкладки **Основные Параметры** окна **Параметры**.



Можно выбрать сразу все тела для задания их начальной скорости. Для этого используется опция автоменю:



<M> Выбрать все тела

В окне Параметры задайте:

- Величину начальной скорости.
- Единицы измерения. Для условия Начальная скорость могут быть установлены следующие единицы измерения: м/с, см/с, фут/с, дюйм/с.
- Направление действия нагрузки. Для задания направления действия начальной скорости при помощи объекта 3D модели используйте опцию автоменю:



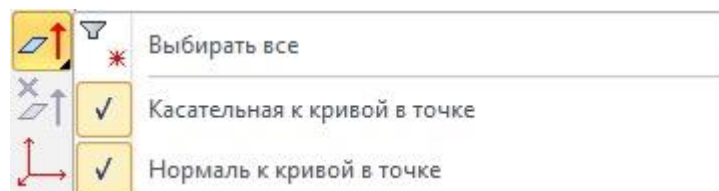
<D> Выбрать направление

Для отмены выбора направления используйте опцию:



<U> Отменить выбор направления

Для быстрой смены направления на противоположное можно установить флаг «**Обратное направление**». Элементы, которые могут быть выбраны для задания направления, можно указать в выпадающем списке фильтров.



Для задания направления действия начальной скорости при помощи ЛСК используйте опцию автоменю:



<C> Выбрать систему координат



<K> Отменить выбор системы координат

В этом случае направление определяется как радиус-вектор, задаваемый вводом величин направляющих косинусов в поля X, Y, Z. Обратное направление задаётся вводом знака "-" перед значением.

Типичный порядок действий при задании начального условия «Начальная скорость»

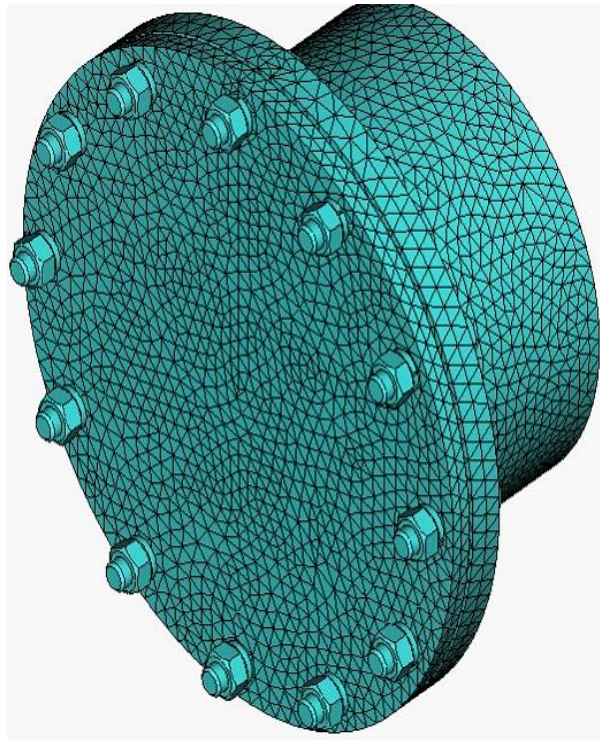
- 1) Инициировать команду «Начальная скорость» .
- 2) Выбрать несколько тел или все тела.
- 3) Задать величину начальной скорости.
- 4) Задать единицы измерения.
- 5) Задать направление действия.
- 6) Завершить команду.

3.4.2.1.13. НАЧАЛЬНОЕ УСКОРЕНИЕ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия > Сила > Начальное ускорение
Клавиатура	Текстовое меню
<3MZ>	Анализ > Нагружение > Начальное ускорение

После вызова команды необходимо выбрать элементы модели для приложения нагрузки. Выбранные тела заносятся в список сверху вкладки **Основные Параметры** окна **Параметры**.



Можно выбрать сразу все тела для задания на них начального ускорения. Для этого используется опция автоменю:



<M> Выбрать все тела

В окне Параметры задайте:

- Величину начального ускорения.
- Единицы измерения. Для условия начальное ускорение могут быть установлены следующие единицы измерения: м/с², см/с², дюйм/с².
- Направление действия нагрузки. Для задания направления действия начального ускорения при помощи объекта 3D модели используйте опцию автоменю:



<D> Выбрать направление

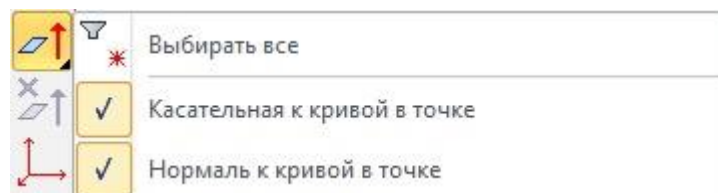
Для отмены выбора направления используйте опцию:



<U> Отменить выбор направления

Для быстрой смены направления на противоположное можно установить флажок «**Обратное направление**».

Элементы, которые могут быть выбраны для задания направления, можно указать в выпадающем списке фильтров.



Для задания направления действия начального ускорения при помощи ЛСК используйте опцию автоменю:



<C> Выбрать систему координат



<K> Отменить выбор системы координат

В этом случае направление определяется как радиус-вектор, задаваемый вводом величин направляющих косинусов в поля X, Y, Z.

В этом случае направление определяется как радиус-вектор, задаваемый вводом величин направляющих косинусов в поля X, Y, Z. Обратное направление задается вводом знака "-" перед значением.

Типичный порядок действий при задании начального условия «Начальное ускорение»

- 1) Инициировать команду «Начальное ускорение».
- 2) Выбрать несколько тел или все тела.
- 3) Задать величину начального ускорения.
- 4) Задать единицы измерения.
- 5) Задать направление действия.
- 6) Завершить команду.

3.4.2.2. ТЕПЛОВЫЕ НАГРУЗКИ

Этот тип нагрузок используется в задачах теплообмена.

Теплообмен представляет собой процесс передачи тепла из области с более высокой температурой в область с более низкой температурой.

Основные темы в этом разделе:

- [Температура](#)
- [Начальная температура](#)
- [Тепловой поток](#)
- [Тепловая мощность](#)
- [Конвекция](#)
- [Излучение](#)

3.4.2.2.1. ТЕМПЕРАТУРА

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия > Температура > Температура
Клавиатура	Текстовое меню
<ЗТТ>	Анализ > Тепловая нагрузка > Температура

Температура характеризует тепловое состояние тела и определяет степень его нагретости. Нагрузка «**Температура**» используется для определения не изменяющейся со временем постоянной температуры элементов модели в стационарном и нестационарном тепловом анализе, а также - для определения разности температур в статическом анализе прочности конструкции при решении задач термоупругости.

Температура может быть приложена к телу, грани, ребру или вершине модели.

Для выбора элементов модели используйте опции автоменю:



<E>

Выбрать элемент для нагружения



<M>

Выбрать все тела

При зажатии  на опции  **Выбрать элемент для нагружения** становятся доступными фильтры выбора:



<Alt+Num+> Выбирать все



<Ctrl+Alt+V> Выбрать вершину



<Ctrl+Alt+E> Выбрать ребро



<Ctrl+Alt+Q> Выбрать грань



<Ctrl+Alt+B> Выбрать тело

Эти же фильтры доступны на панели фильтров.



В режиме выбора граней в автоменю доступны дополнительные фильтры:



<C>

Выбрать все грани тела, включая контактирующие



<N>

Выбрать все грани тела, кроме контактирующих



<S>

Выбрать все грани для всех тел задачи

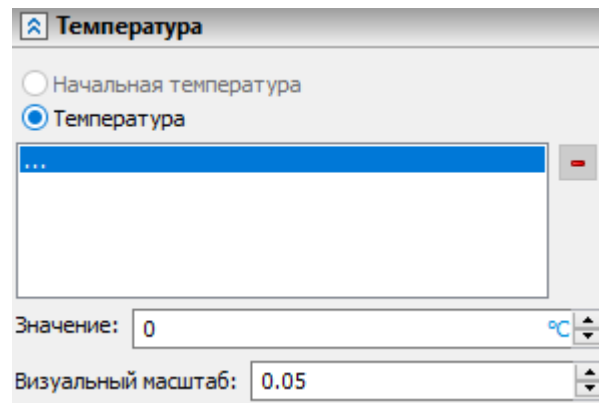
Выбранные элементы отображаются в списке в окне **Параметры**.

В окне Параметры задайте:

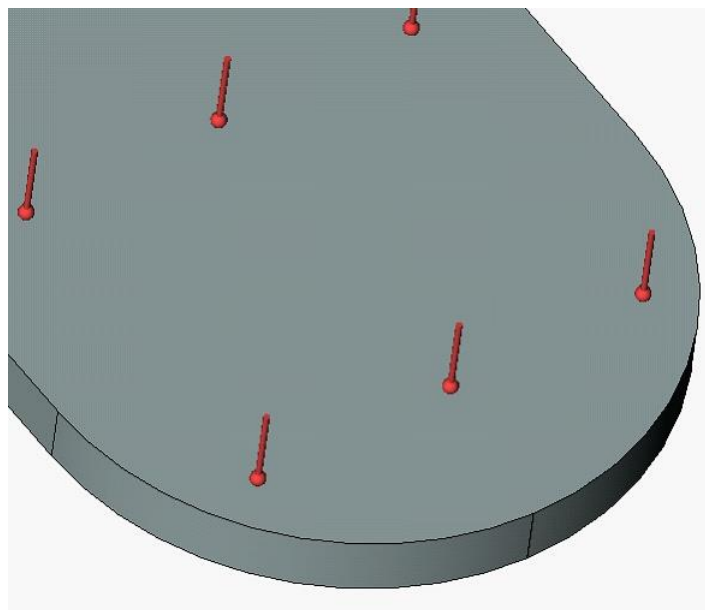
- Величину нагрузки. (Задание зависимости значения температуры от времени возможно в задаче "**Нестационарные тепловые процессы**", см. раздел "[Использование](#)")

[графиков для задания параметров, меняющихся в зависимости от времени или температуры"\).](#)

- Единицы измерения: К, С, F.



В 3D сцене Температура отображается следующим образом:



Задание тепловой нагрузки «Температура»

Типичная последовательность действий при задании тепловой нагрузки «Температура»

- 1) Инициировать команду «Температура» .
- 2) Выбрать тело, грань, ребро, вершину или набор элементов
- 3) Задать значение температуры и единицы измерения.
- 4) Завершить команду.

3.4.2.2.2. НАЧАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия и нагружения > Температура > Начальная Температура
Клавиатура	Текстовое меню
<ЗТТ>	Анализ > Тепловая нагрузка > Начальная температура

Нагрузка «**Начальная температура**» используется для определения исходной температуры в нестационарном тепловом расчёте. Это начальное условие определяет температуре выбранных элементов модели в нулевой момент времени.

В тех узлах конечно-элементной сетки, которые не принадлежат указанным элементам модели, в качестве начальной температуры будет установлено значение «по умолчанию». Оно определяется в диалоговом окне «**Параметры задачи**» на вкладке «**Параметры**».

Начальная температура может быть приложена к телу, грани, ребру или вершине модели. Для выбора элементов модели используйте опции автоменю:



<E>

Выбрать элемент для нагружения



<M>

Выбрать все тела

При зажатии  на опции  **Выбрать элемент для нагружения** становятся доступными фильтры выбора:



<Alt+Num+> Выбирать все



<Ctrl+Alt+V> Выбрать вершину



<Ctrl+Alt+E> Выбрать ребро



<Ctrl+Alt+Q> Выбрать грань



<Ctrl+Alt+B> Выбрать тело

Эти же фильтры доступны на панели фильтров.



В режиме выбора граней в автоменю доступны дополнительные фильтры:



<C>

Выбрать все грани тела, включая контактирующие



<N>

Выбрать все грани тела, кроме контактирующих



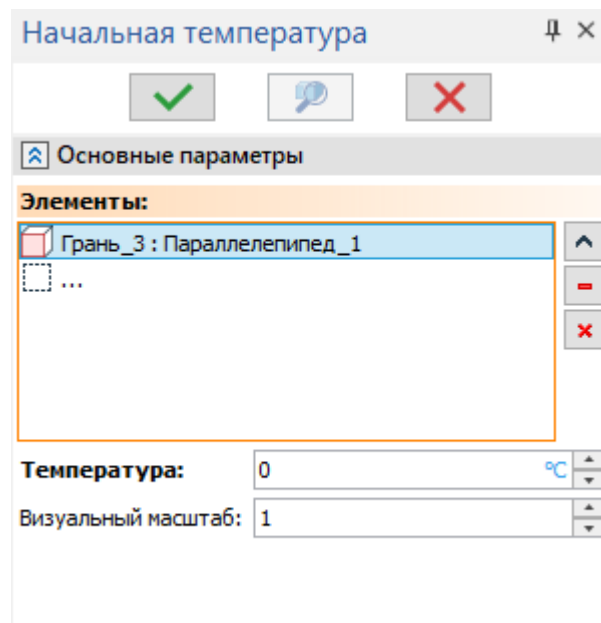
<S>

Выбрать все грани для всех тел задачи

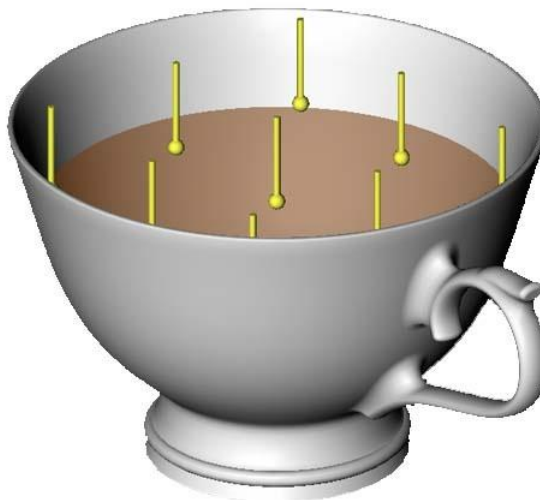
Выбранные элементы отображаются в списке в окне **Параметры**.

В окне Параметры задайте:

- Величину нагрузки. (Задание зависимости значения температуры от времени возможно в задаче "Нестационарные тепловые процессы", см. раздел "[Использование графиков для задания параметров, меняющихся в зависимости от времени или температуры](#)").
- Единицы измерения: К, С, F.



В 3D сцене Температура отображается следующим образом:



Задание начальной температуры в нестационарном тепловом расчёте

Типичная последовательность действий при задании тепловой нагрузки «Начальная температура»

- 1) Инициировать команду «Начальная температура» .

- 2) Выбрать тело, грань, ребро, вершину или набор элементов.
- 3) Задать значение температуры и единицы измерения.
- 4) Завершить команду.

3.4.2.2.3. ТЕПЛОВОЙ ПОТОК

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия > Температура > Тепловой поток
Клавиатура	Текстовое меню
<ЗТФ>	Анализ > Тепловая нагрузка > Тепловой поток

Нагрузка **Тепловой поток** позволяет задать количество теплоты, переносимое в единицу времени через единичную площадь поверхности, то есть задать удельный тепловой поток. Тепловой поток может быть приложен к грани модели. Для выбора граней используйте опции автоменю:



<F> Выберите грань

В режиме выбора граней в автоменю доступны дополнительные фильтры:



<C> Выбрать все грани тела, включая контактирующие

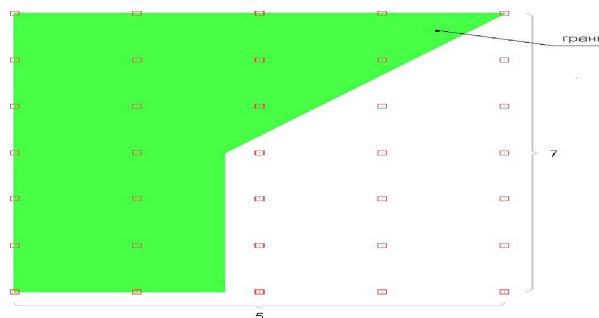


<N> Выбрать все грани тела, кроме контактирующих



<S> Выбрать все грани для всех тел задачи

Выбранные элементы заносятся в список.



В окне Параметры задайте:

- Величину нагрузки. Задание зависимости значения теплового потока от времени или температуры возможно в нестационарной тепловой задаче, см. раздел "[Использование графиков для задания параметров, меняющихся в зависимости от времени или](#)

температуры". Отрицательное значение величины теплового потока означает, что через заданную грань тело теряет энергию.

- Единицы измерения: Вт/м², Вт/см², BTU/с*дюйм².

В 3D сцене **Тепловой поток** отображается следующим образом:



Задание тепловой нагрузки «Тепловой поток»

Типичная последовательность действий при задании нагрузки «Тепловой поток»

- 1) Инициировать команду «Тепловой поток» 
- 2) Выбрать грань.
- 3) Задать величину нагрузки.
- 4) Задать единицы измерения.
- 5) Завершить команду.

3.4.2.2.4. ТЕПЛОВАЯ МОЩНОСТЬ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия > Температура > Тепловая мощность
Клавиатура	Текстовое меню
<ЗТР>	Анализ > Тепловая нагрузка > Тепловая мощность

Нагрузка **Тепловая мощность** позволяет задать:

- объемную мощность источников тепловой энергии;
- количество теплоты, переносимое в единицу времени через произвольную поверхность, называемое мощностью теплового потока (тепловой мощностью).

Тепловая мощность может быть приложена к телу, грани, ребру или вершине модели. Для выбора элементов модели используйте опции автоменю:



<E> Выбрать элемент для нагружения



<M> Выбрать все тела

При зажатии  на опции  **Выбрать элемент для нагружения** становятся доступными фильтры выбора:



<Alt+Num+> Выбирать все



<Ctrl+Alt+V> Выбрать вершину



<Ctrl+Alt+E> Выбрать ребро



<Ctrl+Alt+Q> Выбрать грань



<Ctrl+Alt+B> Выбрать тело

Эти же фильтры доступны на панели фильтров.



В режиме выбора граней в автоменю доступны дополнительные фильтры:



<C> Выбрать все грани тела, включая контактирующие

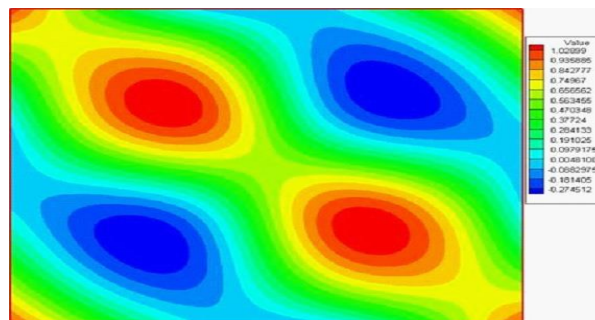


<N> Выбрать все грани тела, кроме контактирующих



<S> Выбрать все грани для всех тел задачи

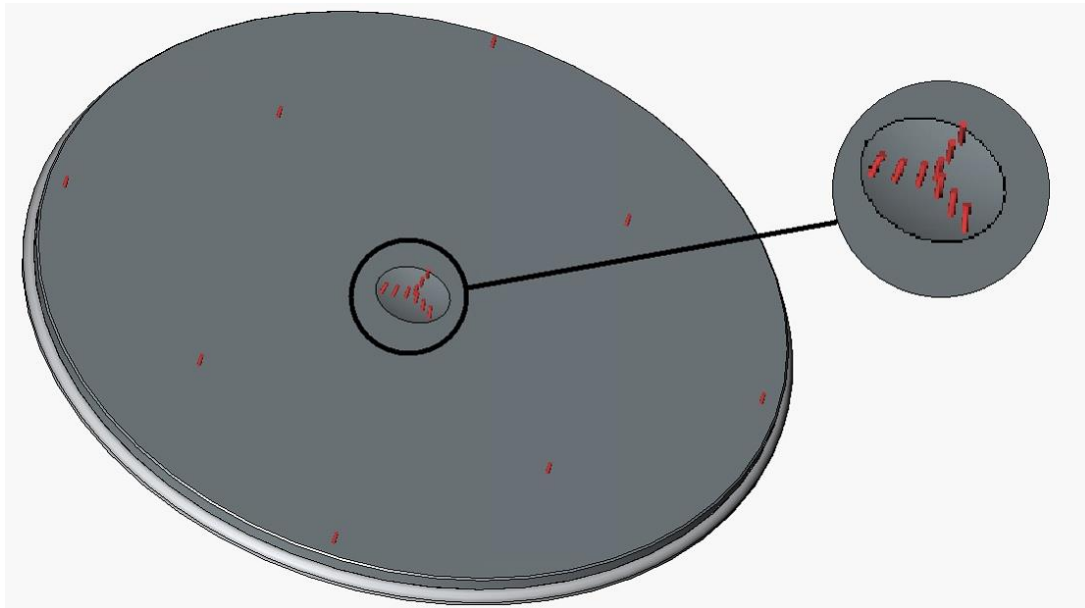
Выбранные элементы отображаются в списке в окне **Параметры**.



В окне **Параметры** задайте:

- Величину нагрузки. Задание зависимости значения тепловой мощности от времени возможно только в нестационарных тепловых задачах, см. раздел "[Использование графиков для задания параметров, меняющихся в зависимости от времени или температуры](#)". Отрицательное значение величины данной тепловой нагрузки означает, что тело теряет энергию.
- Единицы измерения: Вт, BTU/с.

В 3D сцене **Тепловая мощность** отображается следующим образом:



Задание тепловой нагрузки «Тепловая мощность»

Типичная последовательность действий при задании тепловой нагрузки «Тепловая мощность»

- 1) Инициировать команду «Тепловая мощность» .
- 2) Выбрать тело, грань, ребро или вершину.
- 3) Задать величину нагрузки.
- 4) Задать единицы измерения.
- 5) Завершить команду.

3.4.2.2.5. КОНВЕКЦИЯ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия > Температура > Конвекция
Клавиатура	Текстовое меню
<ЗТС>	Анализ > Тепловая нагрузка > Конвекция

Конвективным теплообменом называется процесс переноса теплоты между поверхностью твёрдого тела и внешней средой (газ, жидкость).

Нагрузка **Конвекция** позволяет задать количество теплоты, отдаваемое в единицу времени единицей поверхности при разности температур между поверхностью и внешней средой, равной одному градусу, то есть задать коэффициент теплоотдачи.

Нагрузка **Конвекция** определена для граней модели.

Для выбора граней используйте опции автоменю:



<F> Выберите грань

В режиме выбора граней в автоменю доступны дополнительные фильтры:



<C> Выбрать все грани тела, включая контактирующие

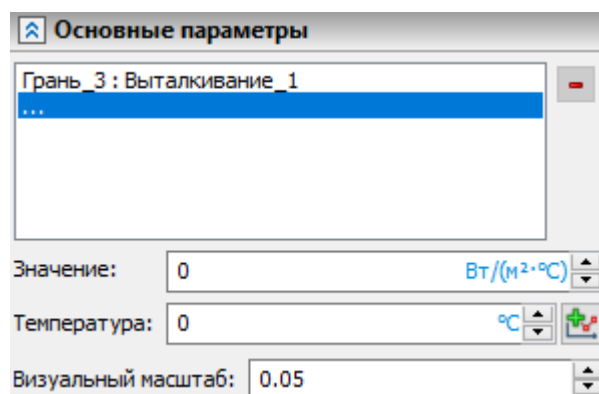


<N> Выбрать все грани тела, кроме контактирующих



<S> Выбрать все грани для всех тел задачи

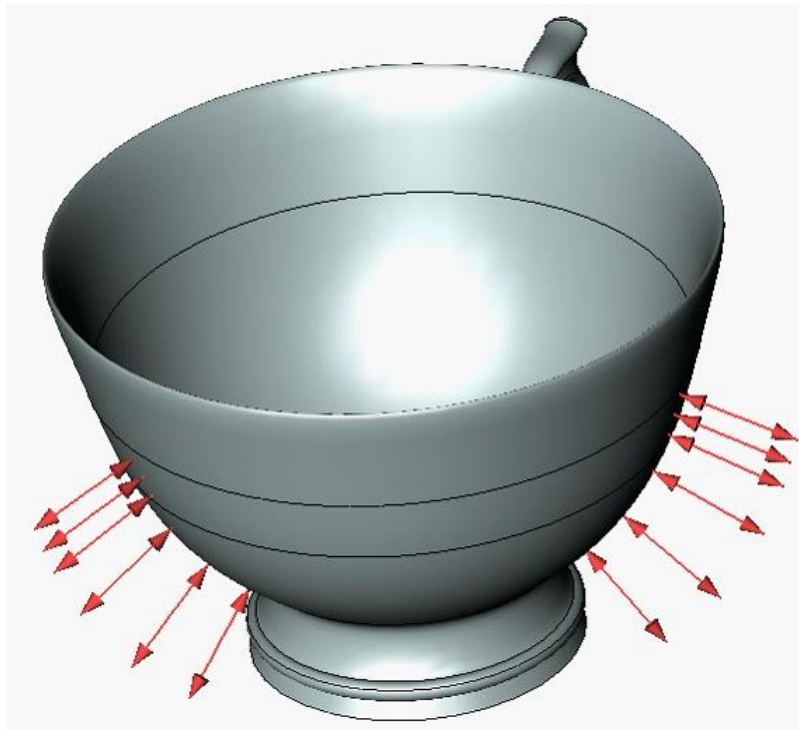
Выбранные элементы заносятся в список.



В окне Параметры задайте:

- Коэффициент теплоотдачи. Задание зависимости значения коэффициента теплоотдачи от времени или температуры, зависимости температуры внешней среды от времени возможно только в нестационарных задачах, см. раздел "[Использование графиков для задания параметров, меняющихся в зависимости от времени или температуры](#)".
- Единицы измерения: Вт/м²·C, Вт/см²·C, BTU/c*дюйм²·F.
- Температуру внешней среды (жидкости или газа).
- Единицы измерения: Кельвин [K], градусы Цельсия [C], градусы Фаренгейта [F].

В 3D сцене нагрузка «**Конвекция**» отображается следующим образом:



Задание тепловой нагрузки «Конвекция»

Типичная последовательность действий при задании тепловой нагрузки «Конвекция»

- 1) Инициировать команду «Конвекция» .
- 2) Выбрать грань.
- 3) Задать значение коэффициента теплоотдачи и температуры окружающей среды.
- 4) Завершить команду.

3.4.2.2.6. ИЗЛУЧЕНИЕ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия > Температура > Излучение
Клавиатура	Текстовое меню
<ЗТР>	Анализ > Тепловая нагрузка > Излучение

Нагретые тела излучают в окружающее пространство тепловую лучистую энергию. Излучение, попадающее на некоторое тело, частично отражается, частично поглощается, а также частично проходит через него. Граничное условие **Излучение** позволяет определить свойства тел в отношении способности испускать и поглощать лучистую энергию - коэффициент излучения.

Коэффициент излучения равный "1" соответствует абсолютно черному телу, т.е. телу, которое испускает максимально возможное количество лучистой энергии по закону Стефана-Больцмана и поглощает всю падающую на него лучистую энергию.

Коэффициент излучения "0" соответствует идеальному зеркалу, которое не излучает, будучи нагрето до любой температуры, и отражает всю падающую на него лучистую энергию, т.е. фактически исключено из расчета.

Промежуточные значения коэффициента излучения равны отношению излучающей способности данного тела к излучающей способности абсолютно черного тела, т.е. показывают насколько данное тело излучает меньше энергии, чем излучало бы при той же температуре абсолютно черное тело.

Кроме коэффициентов излучения/поглощения, для корректной постановки задачи на теплообмен излучением задаются известные или начальные температуры и источники тепловой энергии, приложенные к телам, участвующим в задаче.

Важно! В расчёте теплообмена излучением участвуют только тела, для которых задано граничное условие **Излучение**. Тела с незадавленными коэффициентами излучения игнорируются.

Нагрузка **Излучение** определена для граней модели.

Для выбора граней используйте опцию автоменю:



<E> Выбрать элемент для нагружения

В режиме выбора граней в автоменю доступны дополнительные фильтры:



<C> Выбрать все грани тела, включая контактирующие

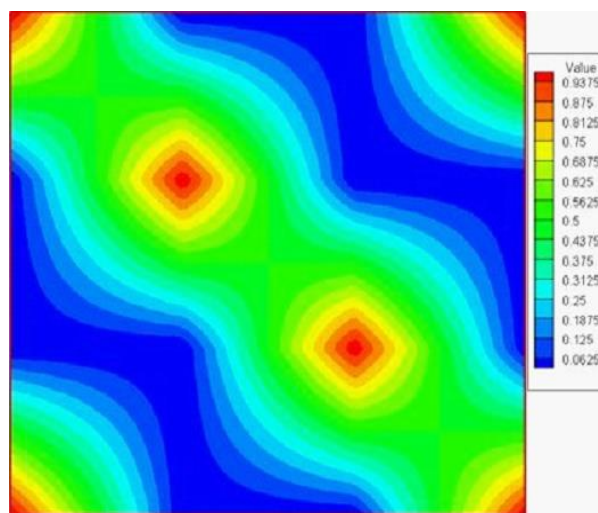


<N> Выбрать все грани тела, кроме контактирующих



<S> Выбрать все грани для всех тел задачи

Выбранные элементы заносятся в список.

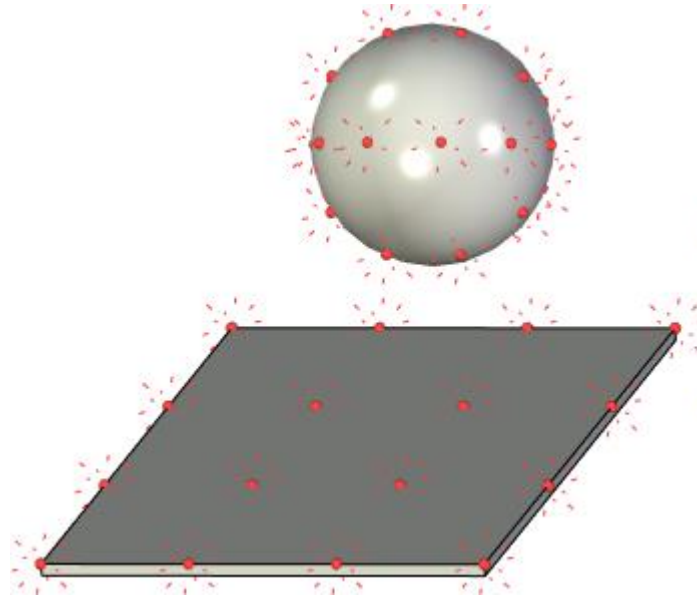


В окне Параметры задайте:

- Тип излучения: излучение в окружающую среду, излучение между телами.

- Коэффициент излучения. Задание зависимости значения коэффициента излучения от времени или температуры, зависимости температуры внешней среды от времени возможно только в нестационарных задачах, см. раздел "[Использование графиков для задания параметров, меняющихся в зависимости от времени или температуры](#)".
- Температуру окружающей среды.
- Единицы измерения: Кельвин [K], градусы Цельсия [C], градусы Фаренгейта [F].

В 3D сцене нагрузка **Излучение** отображается следующим образом:



Задание тепловой нагрузки «Излучение»

Для выполнения расчёта с тепловой нагрузкой **Излучение** с типом **Излучение между поверхностями** рекомендуется использовать нестационарную тепловую задачу с активной опцией «Задача на установление равновесия температур» на вкладке **Задание времени моделирование** в параметрах задачи.

Типичная последовательность действий при задании тепловой нагрузки «Излучение»

- 1) Инициировать команду «Излучение» .
- 2) Задать тип излучения.
- 3) Задать коэффициент излучения.
- 4) Задать температуру внешней среды и единицы измерения.
- 5) Завершить команду.

3.4.3. СВЯЗИ

3.4.3.1. ПРУЖИНА

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия и нагрузки > Связь > Пружина
Клавиатура	Текстовое меню
<3S3S>	Анализ > Условия и нагрузки > Пружина

Команда **Пружина** вводит в задачу в качестве условия связи виртуальную пружину которая работает на растяжение или/и сжатие в соответствии с заданной продольной жёсткостью, а также вносит в систему «локальное» продольное демпфирование.

Связывать можно друг с другом элементы геометрии, а также элементы геометрии с неподвижной точкой (неподвижным основанием). Поведение пружины абсолютно упругое. Предполагается, что на концах пружины располагаются сферические шарниры. Т.о. пружины не воспринимают изгибные и крутильные нагрузки. При этом элементы геометрии, сопряженные с каждым из концов пружины, должны быть одностипными (грани, ребра, вершины).

В текущей реализации для объёмных 3D элементов выбирать в качестве элементов для соединения с пружиной можно только грани или ребра.

Пружинные конечные элементы (виртуальные пружины) используются в расчетах, моделируя жесткость реальных элементов конструкции (стержни, тросы, колонны, упругие основания). Принцип работы виртуальных пружин аналогичен стержневым элементам, но в отличие от них для пружин не задается поперечное сечение, а также не строятся эпюры.

Так же можно смоделировать пружинную связь с учетом преднагружения.

Преднагружение — это функционал для моделирования предварительного напряженного состояния пружины через задания силы преднагружения или длины пружины до деформации. Предполагается, что пружина соединяет указанные элементы геометрии уже в сжатом или растянутом состоянии. Тогда пружина стремится соответственно распереть или сомкнуть соединяемую геометрию вплоть до достижения своей длины до деформации. Если преднагружение задается через силу, то положительное значение силы будет соответствовать растягивающему, а отрицательное – сжимающему преднагружению. Если преднагружение задается через длину до деформации, то пружина будет находится в состоянии сжатия или растяжения в зависимости от того, была ли указанная длина соответственно больше или меньше исходной длины пружины. Исходная длина пружины — это расстояние между центрами тяжести скрепляемой геометрии или между дистанционными точками крепления, если таковые были заданы.

Подробнее:

[Типы пружин. Однонаправленные и двунаправленные пружины. Особенности работы.](#)
[Преднагружение пружин. Внешнее демпфирование](#)

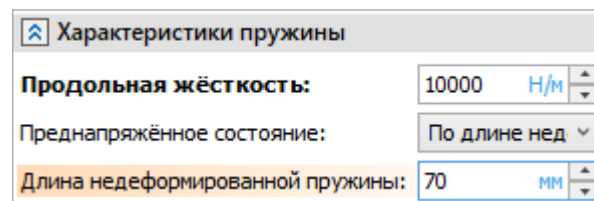
Что бы смоделировать пружинную связь необходимо задать следующие параметры:

- Тип:
 - **Элементы геометрии – Элементы геометрии.** Пружина соединяет два выбранных набора элементов геометрии;

- **Неподвижная точка - Элементы геометрии** Пружина соединяет выбранный набор элементов геометрии с выбранной точкой, которая считается в задаче неподвижной.
- **Режим работы:**
 - Растяжение и сжатие;
 - Только растяжение;
 - Только сжатие.
- **Характеристики пружины:**
 - Продольная жесткость;
 - Продольное демпфирование.

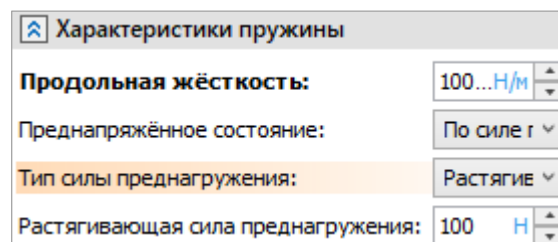
Продольное демпфирование задается только для задач анализа типов: вынужденные колебания, суперпозиция мод и переходный процесс. Т.о. через пружинную связь можно смоделировать работу демпфирующих устройств.

- **Преднапряженное состояние:**
 - Нет: Преднапряженное состояние отсутствует
 - По длине недеформированной пружины: Задается **Длина недеформированной пружины**, которая должна быть ненулевая и положительная, а также не должна быть равна исходной длине пружины.



Характеристики пружины	
Продольная жёсткость:	10000 Н/м
Преднапряжённое состояние:	По длине нед
Длина недеформированной пружины:	70 мм

- **По силе преднагружения:** Задается либо **Растягивающая сила преднагружения**, либо **Сжимающая сила преднагружения**, которые должны быть ненулевые и положительные.



Характеристики пружины	
Продольная жёсткость:	100... Н/м
Преднапряжённое состояние:	По силе г
Тип силы преднагружения:	Растягие
Растягивающая сила преднагружения:	100 Н

Тип задания «Элементы геометрии – Элементы геометрии»

Связь

✓ 🔍 ✗

Основные параметры

Вид связи: 

Тип: **Элементы геометрии - Элементы**

Режим работы: Растяжение и сжатие

Характеристики пружины

Продольная жёсткость: 10000 Н/м

Преднапряжённое состояние: Нет

Первый конец пружины

Первая группа элементов геометрии для соединения:

 Грань_8 : Параллелепипед_4

Точка крепления: ☐ Выбрать элемент

Поведение: Абсолютно жёсткая геометрия

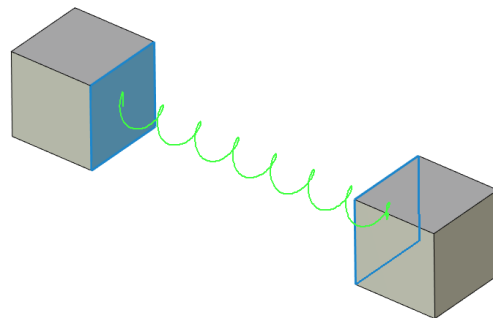
Второй конец пружины

Вторая группа элементов геометрии для соединения:

 Грань_7 : Параллелепипед_2

Точка крепления: ☐ Выбрать элемент

Поведение: Абсолютно жёсткая геометрия



Необходимо указать **Первый конец пружины** и **Второй конец пружины** - это элементы геометрии. Элементами для соединения могут служить вершины, ребра и грани твердых, оболочечных и балочных тел. При этом в каждую группу могут входить только однотипные элементы геометрии (или только грани, или только ребра, или только вершины). В каждую из групп необходимо занести как минимум по одному элементу. Между группами однотипность элементов геометрии может не соблюдаться (например, в первой группе грани, во второй вершины).

С помощью вложенных команд можно:

-  - удалить элемент из списка;
-  - очистить (удалить все элементы задачи);

Так же можно выбрать **Точку крепления** (дистанционную точку) крепления пружины для каждой группы элементов соединения. Такая дистанционная точка может иметь любые координаты. В таком случае пружина будет крепиться соответствующим концом к дистанционной точке, в то время как сама дистанционная точка будет крепиться к выбранному элементу с помощью виртуальных стержней. В качестве **Дистанционной точки** крепления можно выбрать те же самые «точечные» элементы, которые доступны при выборе дистанционных точек при задании условий: Дистанционное закрепление, Дистанционная сила и Дистанционная масса.

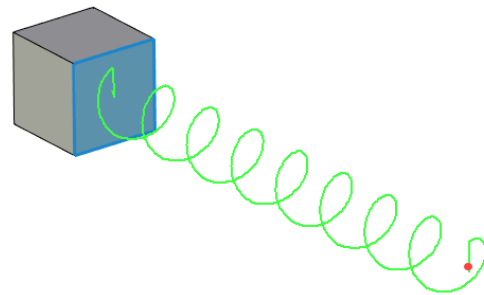
Если дистанционные точки крепления пружины не заданы, предполагается, что дистанционная точка крепления расположена в центре тяжести скрепляемой этим концом геометрии, а узлы скрепляемой геометрии соединены с соответствующим концом пружины посредством виртуальных абсолютно жестких стержней.

Для каждой группы элементов выбрать **Поведение** (Характер деформаций):

- **Абсолютно жёсткая геометрия.** Выбранные в данной группе элементы не деформируются в процессе нагружения;
- **Деформируемая геометрия.** Выбранные в данной группе элементы могут деформироваться в процессе нагружения.

Характер деформаций группы элементов невозможно выбрать, если в качестве элемента выбрана вершина/вершины.

Тип задания «Неподвижная точка – Элементы геометрии»

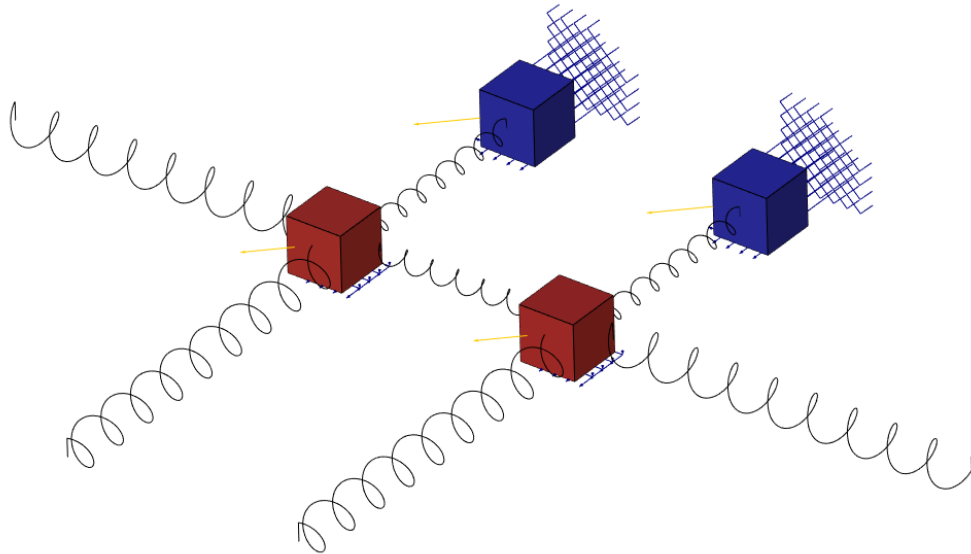


Необходимо указать **Первый конец пружины** - это **Неподвижная точка**. В качестве **Неподвижной точки** можно выбрать те же самые «точечные» элементы, которые доступны при задании условий: Дистанционное закрепление, Дистанционная сила, Дистанционная масса. И указать **Второй конец пружины** - [это элементы геометрии](#), как при моделировании пружинной связи типа задания «Элементы геометрии – Элементы геометрии».

Расстояние между точками крепления пружины в расчётной модели

В случае задания **Преднапряжённого состояния** по длине пружины до деформирования:

- если в качестве режима работы пружины было выбрано **Растяжение и сжатие**, длину недеформированной пружины можно задать любой, как меньше, чем исходная длина пружины, так и больше;
- если в качестве режима работы пружины было выбрано **Только растяжение**, длину недеформированной пружины нельзя задать меньше, чем исходная длина пружины;
- если в качестве режима работы пружины было выбрано **Только сжатие**: Длину недеформированной пружины нельзя задать больше, чем исходная длина пружины.



Пример моделирование пружинной связи

3.4.4. КОНТАКТЫ

Контакты позволяют описать взаимодействие между элементами или их частями.

Для элементов внутри группы и для размещенных в разных группах см. п. [Группировка элементов задачи](#) можно задать контакты вручную с помощью команды [Контакт](#) или воспользоваться автоматическим поиском контактов с помощью команды [Поиск контактов](#).

При моделировании контрукции, состоящей из балок предусмотрена команда [Соединение балок](#), которая создает узловую связь между балочными телами.

Основные темы в этом разделе:

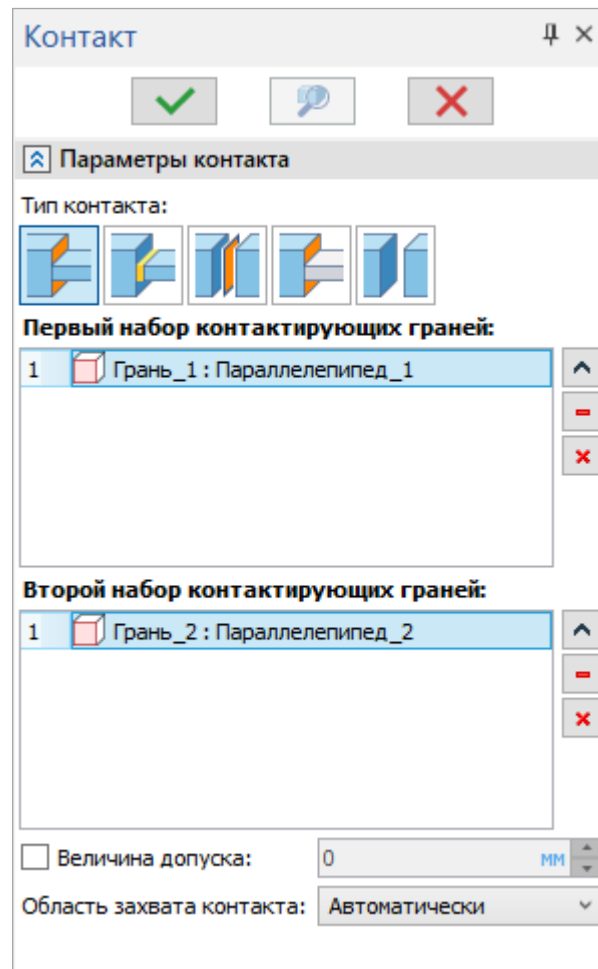
- [Контакт](#)
- [Тепловой контакт](#)
- [Соединение балок](#)
- [Поиск контактов](#)
- [Параметры контакта по умолчанию](#)

3.4.4.1. КОНТАКТ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия и нагрузки > Контакт > Контакт
Клавиатура	Текстовое меню
<3MI>	Анализ > Условия и нагрузки > Контакт

Команда **Контакт** позволяет использовать контактные ограничения между границами элементов, которые изначально соприкасаются или начинают соприкасаться при нагружении.

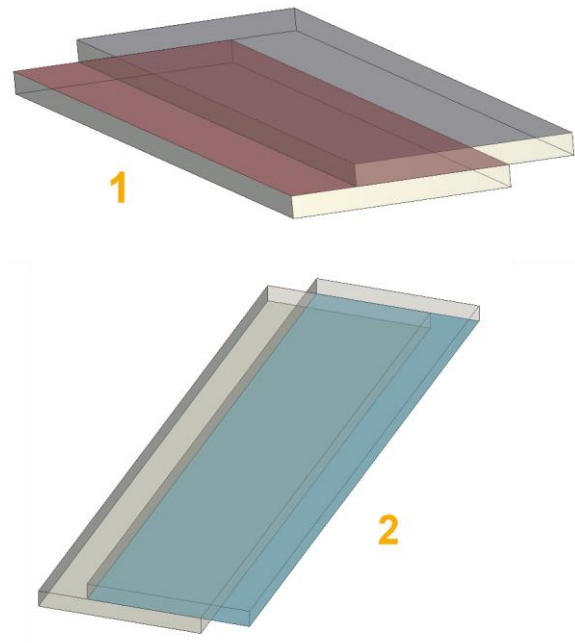
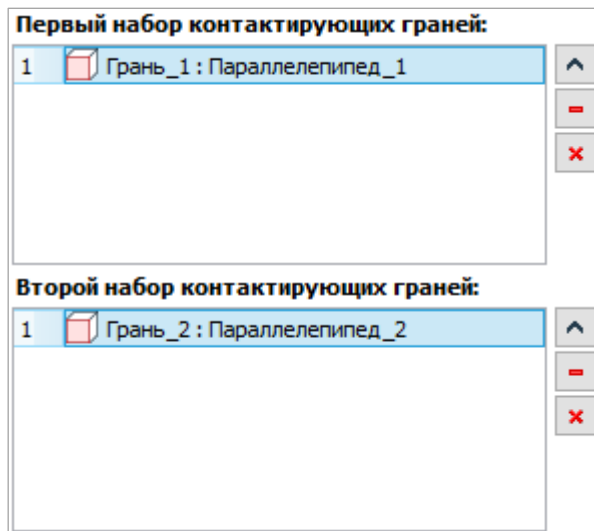


Задание контакта происходит для элементов, размещенных внутри и между группами.

Задание контакта для элементов разных групп возможно только для контакта типа **Жёсткая связь**.

Задание контактов для тепловых задач см. п. [Тепловой контакт](#).

Для задания контактов пользователю необходимо определить контактирующую пару. При выборе контактирующей пары, например, «грань-грань», в основной сцене они подсвечиваются определенным цветом, главная грань подсвечиваться красным, подчиненная – синим. При выборе главной грани системой предусмотрено автоматический поиск ответной грани.



Выбор контактирующих граней: 1 – главная, подсвечивается красным цветом;
2 – подчиненная подсвечивается синим цветом

С помощью вложенных команд можно:

-  - удалить элемент из списка;
-  - очистить (удалить все элементы задачи).

Для задания контакта необходимо выбрать тип контакта:

-  **Жёсткая связь;**

Используется в случае, когда необходимо скрепить контактирующие поверхности тел. Тела в этом случае рассматриваются как связанные, перемещения грани одного тела без каких-либо ограничений передаются граням другого тела. Если тела состоят из материалов с разными физическими характеристиками, конечно-элементная модель учитывает различные свойства материалов, принадлежащих различным граням контактирующих тел.

В качестве контактирующей пары можно выбрать «грань-грань», «грань-ребро», «ребро-ребро».

-  **- Касание;**

Запрещает взаимопenetration соприкасающихся граней. Данный тип контакта позволяет моделировать такие физические явления, как скольжение одного тела по-другому, появление зазоров в местах соединения деталей, вследствие их деформаций, и т.п. Отметим, что использование данного контакта, предполагает наличие физического контакта граней тел в исходном состоянии анализируемой конструкции.

В качестве контактирующей пары можно выбрать «грань-грань».



- **- Зазор;**

Позволяет указать грани, которые в исходном положении тел не контактируют, но для которых необходимо учитывать контакт в процессе решения, когда при деформации модели, тела грани будут соприкасаться.

В качестве контактирующей пары можно выбрать «грань-грань».



- **- Жёсткая стенка;**

Используется для моделирования соприкосновения тела с жесткой поверхностью, деформацией которой в целях моделирования можно пренебречь. Здесь необходимо задание только граней первого тела, которые контактируют с "жёсткой стенкой".



- **- Нет контакта.**

На область контакта не должно накладываться никаких ограничений. В данном случае контактирующие поверхности могут свободно перемещаться друг относительно друга. Поэтому, используя этот контакт, необходимо следить за тем, чтобы в процессе нагружения соприкасающиеся грани не пересекались.

В качестве контактирующей пары можно выбрать «грань-грань».

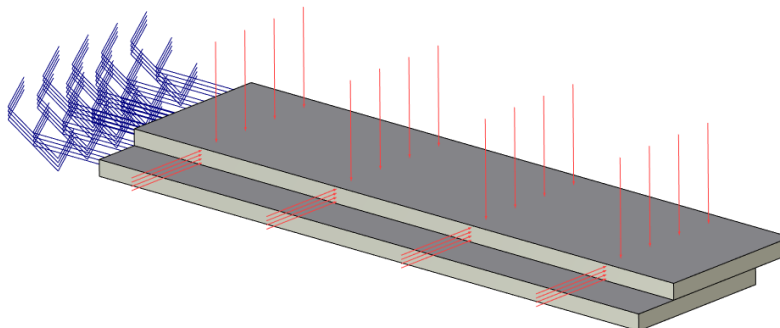
Параметр **Область захвата контакта – Вручную**, т. е. контактирующие элементы пользователь задает сам, необходимо указать **Радиус контактирования**.

Радиус контактирования определяет расстояние, на котором между элементами контакта появляется механическая связь, то есть они начинают контактировать. За пределами этого радиуса система не обращает внимания на то, есть в заданной контактной области есть соприкосновение или нет.

Деформирование модели в зависимости от типов контакта

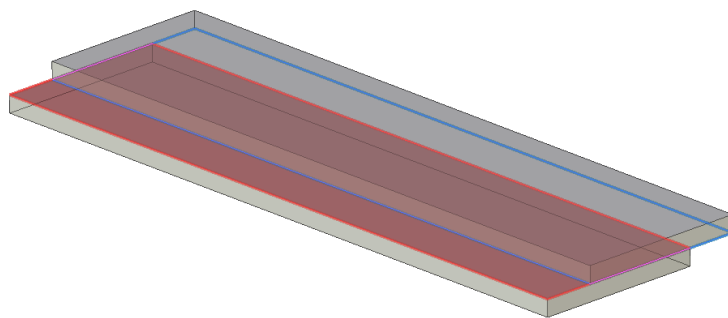
Деформирование модели в зависимости от типов контакта показано на следующем примере.

Две балки соединены контактным ограничением определенного типа без зазора, один торец закреплён, а на боковую и верхнюю поверхности первой балки действует распределённая сила по нормали.



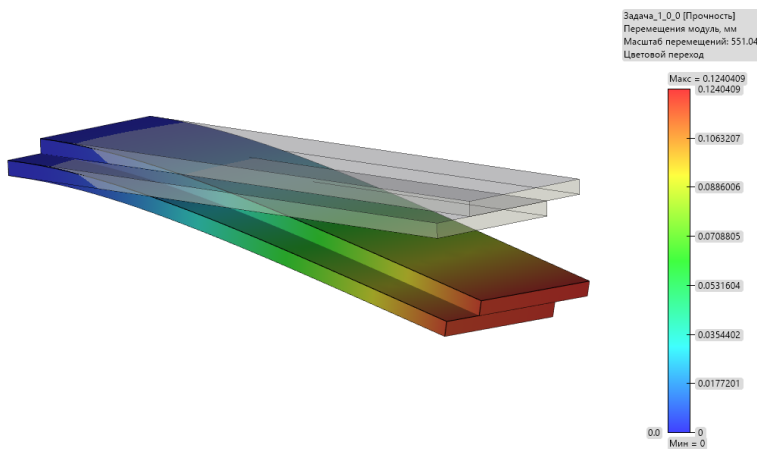
Расчётная модель

В качестве контактирующей пары выбраны соприкасающиеся грани балок.



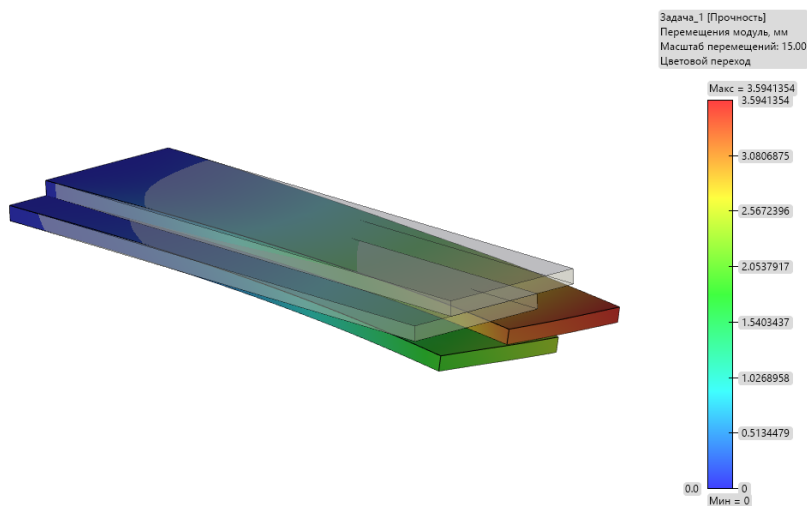
Выбор контактирующей пары

При использовании типа контакта **Жёсткая связь**, балки деформируются как одно «жёсткое целое».



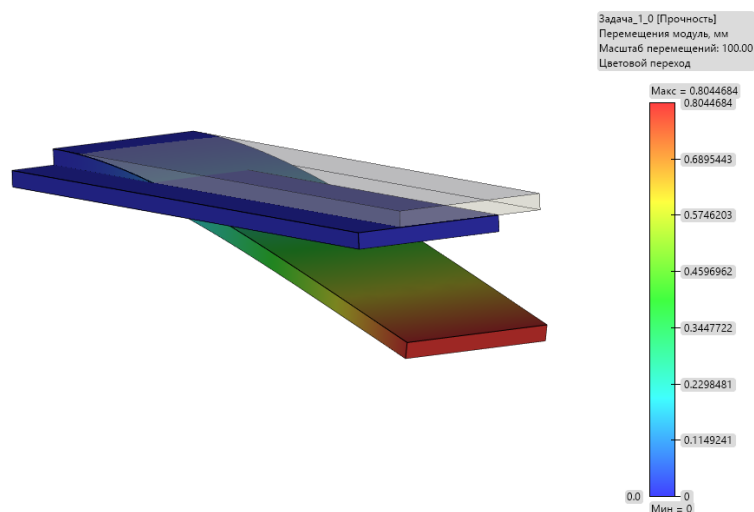
Контакт: тип – «Жёсткая связь»

При использовании типа контакта **Касание**, видно, что верхняя балка деформирует нижнюю и проскальзывает вдоль неё.



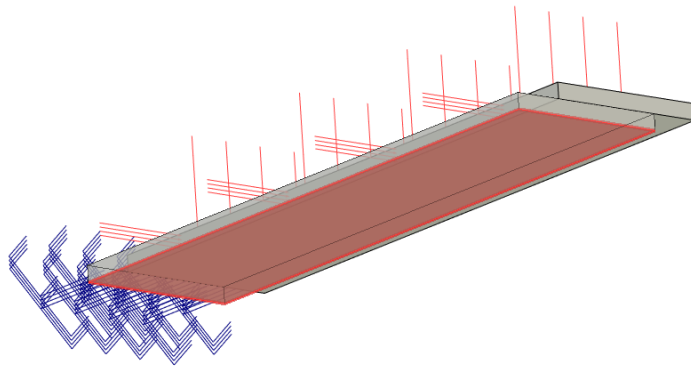
Контакт: тип – «Касание»

При использовании типа контакта **Нет контакта** наблюдается проникание верхней балки в нижнюю.



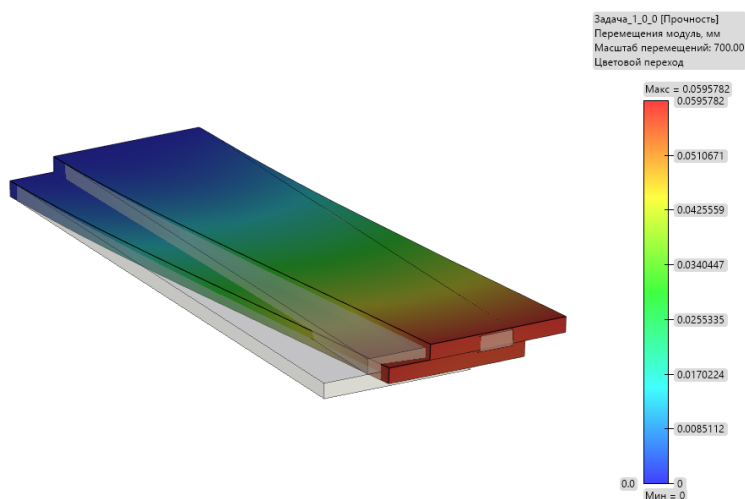
Контакт: тип - «Нет контакта»

При использовании типа контакта **Жёсткая стенка** можно определить грани тела, задающие в пространстве поверхности, за которые тело не может проникать (виртуальная абсолютно жёсткая стенка). В качестве контактирующей грани выбрана грань нижней балки.



Выбор контактирующей грани для типа контакта «Жёсткая стенка»

Наблюдается деформирование балок только от действия боковой силы. От действия вертикальной силы, балки будут испытывать сжимающие усилия.

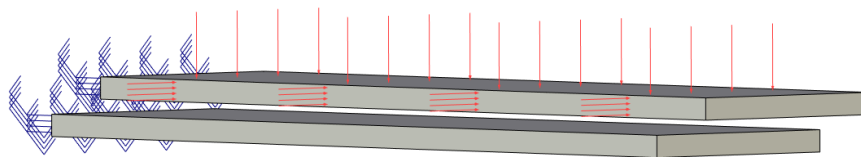


Контакт: тип – «Жёсткая стенка»

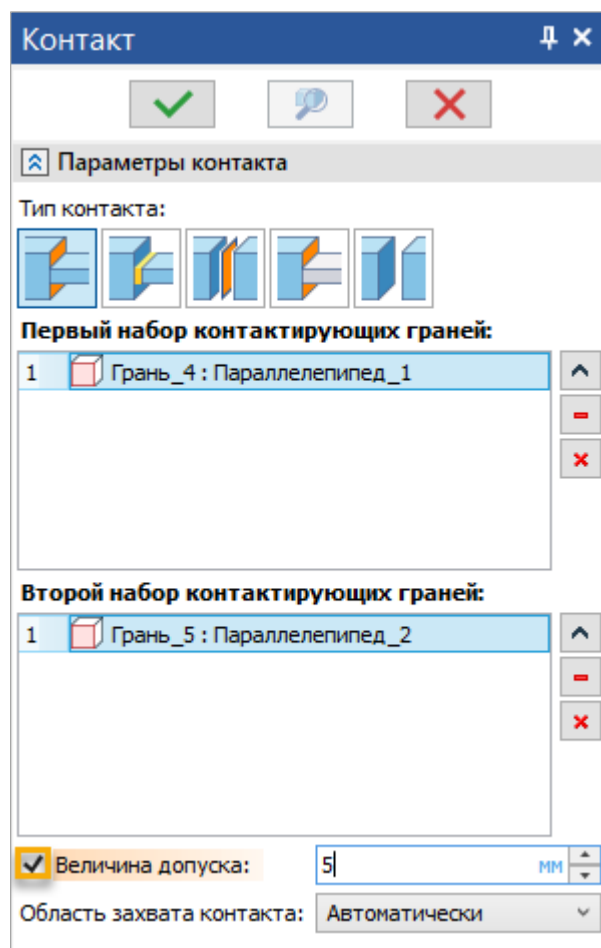
Соединение тел при имеющихся зазорах

Реализована возможность учета радиуса поиска контакта. Для этого необходимо активировать параметр **Величина допуска**, который доступен только для контакта типа **Жёсткая связь**. По умолчанию данный параметр равен нулю (для тел у которых касание). Если между телами зазор, то величина должна быть задана величине этого зазора или больше.

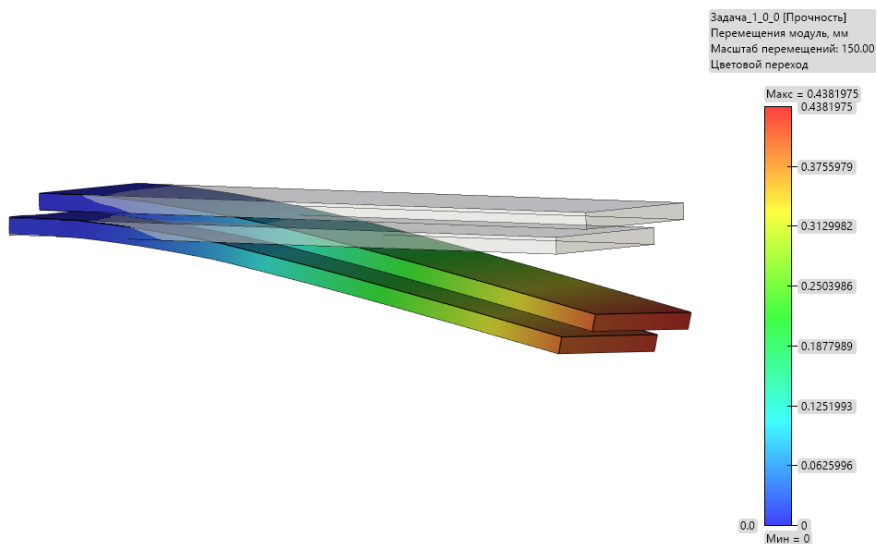
Рассмотрим следующий пример: две балки соединены контактным ограничением типа **Жёсткая связь** с зазором, один торец закреплён, а на боковую и верхнюю поверхности первой балки действует распределённая сила по нормали.



Расчётная модель

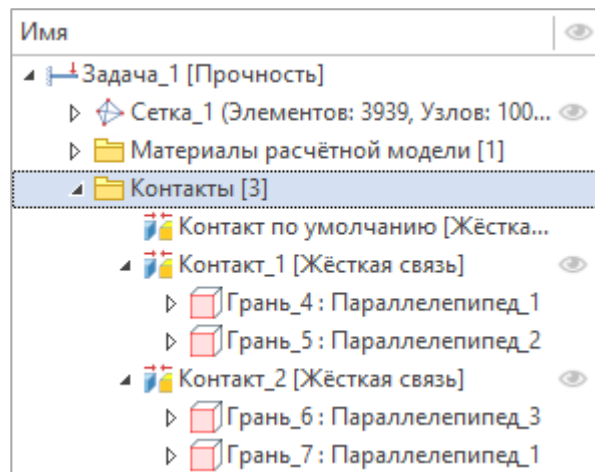


При использовании типа контакта **Жёсткая связь** с зазором между контактирующими поверхностями, балки деформируются как одно «жёсткое целое».



Контакт: тип – «Жёсткая связь»

При завершении работы с командой **Контакт**, в дереве задачи окна **Задачи** или окна **3D Модель** создается папка «**Контакты**» цифра, стоящая в скобках, указывает на количество контактов, заданных в задаче. При раскрытии контакта в дереве показывается контактирующая пара.

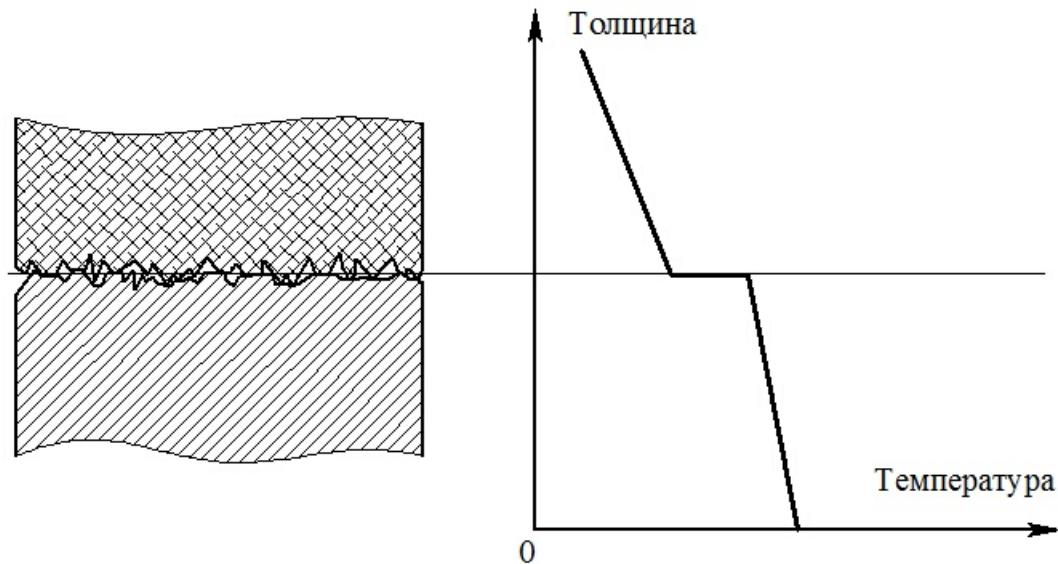


Типичный порядок действий при задании контактных ограничений

- инициировать команду **Контакт**;
- задать тип контакта;
- выбрать контактирующие элементы первого тела;
- выбрать контактирующие элементы второго тела;
- завершить команду.

3.4.4.2. ТЕПЛОВОЙ КОНТАКТ

Контакт между физическими телами практически никогда нельзя считать идеальным. Из-за шероховатости поверхностей контакта на границе двух тел образуются микроскопические зазоры, заполненные воздухом или другой окружающей средой. Эта окружающая среда имеет коэффициенты теплопроводности, отличающиеся от контактирующих твёрдых тел. В результате на границе контактирующих тел происходит скачкообразное изменение непрерывного температурного поля, вызванное, как правило, худшими условиями проводимости тепловой энергии на границе контактирующих тел. Это физическое явление называется тепловым сопротивлением.



Тепловое сопротивление учитывается только для задач: [Установившиеся тепловые процессы; Нестационарные тепловые процессы.](#)

Задание контакта происходит для элементов, размещенных внутри и между группами см. п. [Группировка элементов задачи.](#)

Есть два способа создания контакта:

- ручной – через команду [Контакт](#);
- автоматический – через команду [Поиск контактов](#). В этом случае контакты создадутся с типом **Жёсткая связь**. Для того что бы переопределить тип контакта без потери данных нужно воспользоваться командой **Изменить** через контекстное меню при выборе необходимого контакта  в дереве задачи окна **Задачи** или окна **3D Модель**.

Хочется отметить, что тип контакта **Теплового сопротивления** имеет другие геометрические фильтры на добавление объектов в качестве контактирующей пары. Например, если исходный тип контакта **Жесткая связь** имеет пару «грань – грань», то переход на тип контакта **Тепловое сопротивление** будет переопределён без ошибок. Если наборы не будут поддерживаться типом контакта, то такая топология не участвует в задаче.

Контакт

✓ 🔍 ✗

Параметры контакта

Тип контакта:

Первый набор контактирующих граней:

1	 Грань_1 : Параллелепипед_1	↑ - ✗

Второй набор контактирующих граней:

1	 Грань_2 : Параллелепипед_2	↑ - ✗

☐ Величина допуска: 0 мм

Область захвата контакта: Автоматически

Тип теплового сопротивления: Полное

Тепловое сопротивление: 0 К/Вт

После вызова команды становятся доступны следующие опции автоменю:



<C> Выбрать контактные грани



<1> Выбор граней



<X> Отменить выбор всех граней и поверхностей

Для задания контакта необходимо выбрать **Тип контакта**:



- - Жёсткая связь;



- - Тепловое сопротивление.

В качестве контактирующей пары можно выбрать:

- для 3D тела: только «грань-грань»;
- для оболочки: «грань-грань», «грань-ребро», «ребро-ребро».



- - Нет контакта.

Параметры: **Величина допуска**, **Область захвата контакта**, **Радиус контактирования** задаются аналогично [см. п. Контакт](#).

Тип теплового сопротивления:

- **Полное.** Его величина характеризует суммарную потерю тепловой мощности через всю поверхность контакта (поверхность может быть составной). Единицы измерения град/Вт.
- **Распределённое.** Его величина характеризует потерю теплового потока, приходящуюся на единицу площади поверхности контакта. Единицы измерения град*м²/В.

Тепловое сопротивление. Параметр для задания величины теплового сопротивления. Диапазон ввода значений от 0 до 10⁶. Ввод переменных разрешён.

Типичный порядок действий при задании контактных ограничений в тепловых задачах

- инициировать команду **Контакт**;
- задать тип контакта;
- выбрать контактирующие элементы первого тела;
- выбрать контактирующие элементы второго тела;
- определить и задать параметры для расчёта тепловой задачи;
- завершить команду.

3.4.4.3. СОЕДИНЕНИЕ БАЛОК

Вызов команды:

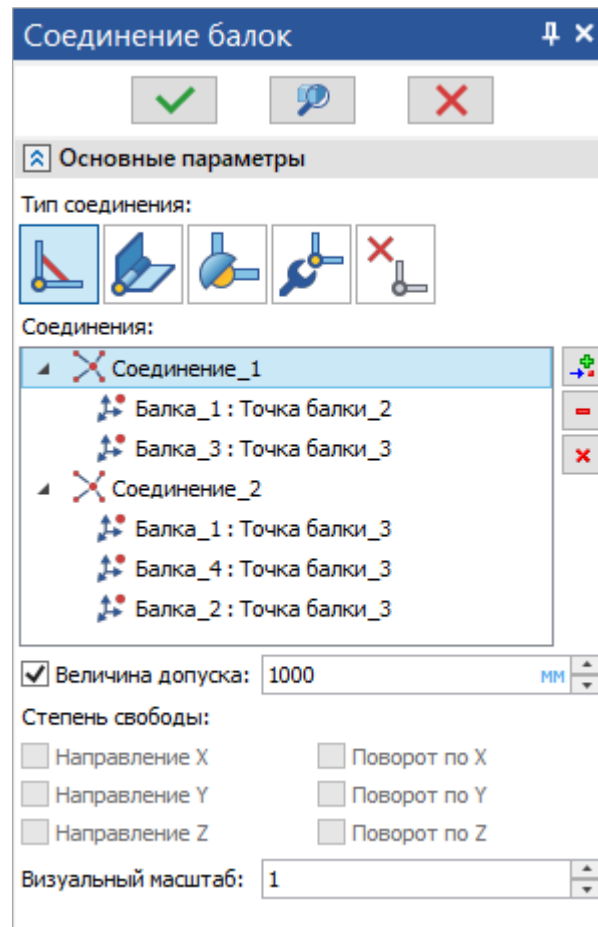
Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия и нагрузки > Контакт > Соединение балок
Клавиатура	Текстовое меню
<3MI>	Анализ > Условия и нагрузки > Соединение балок

Команда **Соединение балок** создает узловую связь между балочными телами. Узловую связь можно накладывать как на балки имеющие совпадающие вершины, так и на удаленные друг от друга. Для этого реализована возможность учёта радиуса поиска соединения. Соединять можно как минимум 2 балочных тела, максимальное количество неограниченно.

Есть два способа создания соединения:

- ручной – через команду **Соединение балок**, где пользователь сам указывает балки для соединения;
- автоматический – при создании [Новой задачи](#) необходимо активировать опцию **Соединять балки в диапазоне** и ввести значение (см. п. [Параметры балок](#)), после чего все балки будут соединены в указанном диапазоне жёстким шарниром (тип соединения – Жёсткое соединение). Для того что бы переопределить тип

соединения нужно воспользоваться командой **Изменить** через контекстное меню при выборе соединения  в дереве задачи окна **Задачи** или окна **3D Модель**.



С помощью вложенных команд можно:

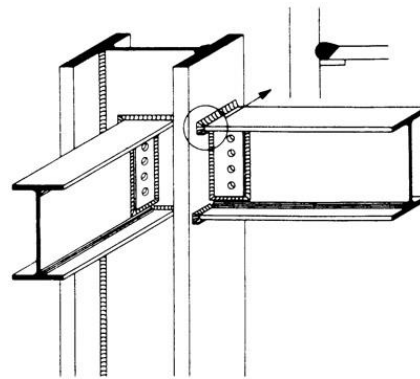
-  - добавить элемент после текущего;
-  - удалить элемент из списка;
-  - очистить (удалить все элементы задачи).

Для создания соединения необходимо выбрать тип соединения:

-  - **Жёсткое соединение;**

Связывает все 6 степеней свободы (3 компоненты перемещения и все 3 компоненты угла поворота) балочных вершин, имитируя сварное или резьбовое сопряжение.

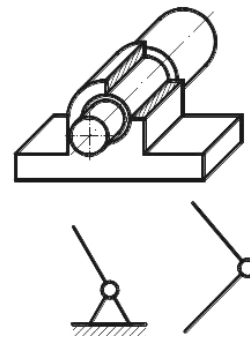
Степень свободы:	
☐ Направление X	☐ Поворот по X
☐ Направление Y	☐ Поворот по Y
☐ Направление Z	☐ Поворот по Z



- 
- Цилиндрический шарнир;

Связывает все 3 поступательные степени свободы и 2 вращательные степени свободы: X и Y. Таким образом связанные балочные тела имеют возможность вращаться вокруг оси Z (вокруг оси, параллельной оси Z).

Степень свободы:	
☐ Направление X	☐ Поворот по X
☐ Направление Y	☐ Поворот по Y
☐ Направление Z	☒ Поворот по Z



- 
- Сферический шарнир;

Связывает все поступательные степени свободы. Таким образом связанные балочные тела имеют возможность свободно вращаться вокруг центра шарнира.

Степень свободы:	
☐ Направление X	☒ Поворот по X
☐ Направление Y	☒ Поворот по Y
☐ Направление Z	☒ Поворот по Z



- 
- Настраиваемое соединение;

Связывает любые степени свободы, указанные пользователем. Таким образом с помощью настраиваемой связи можно задать произвольный тип соединения.

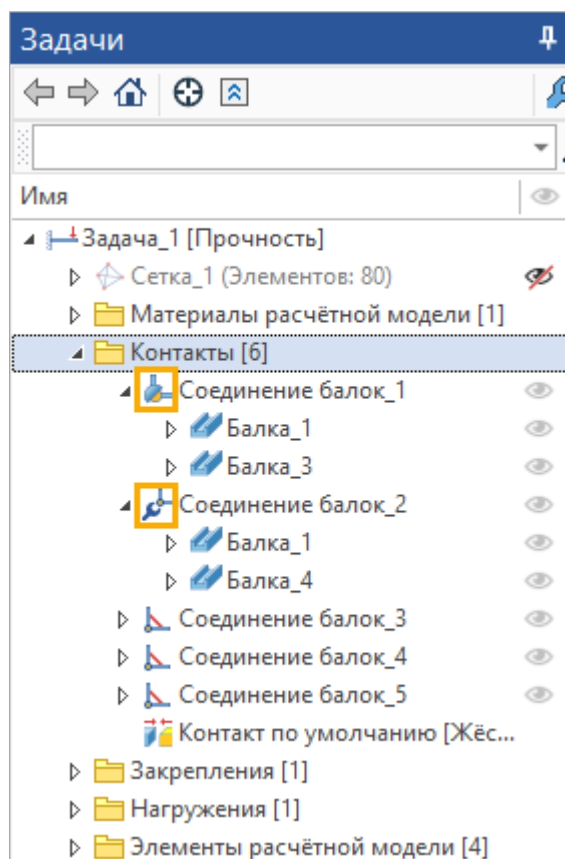
- 
- Нет соединения.

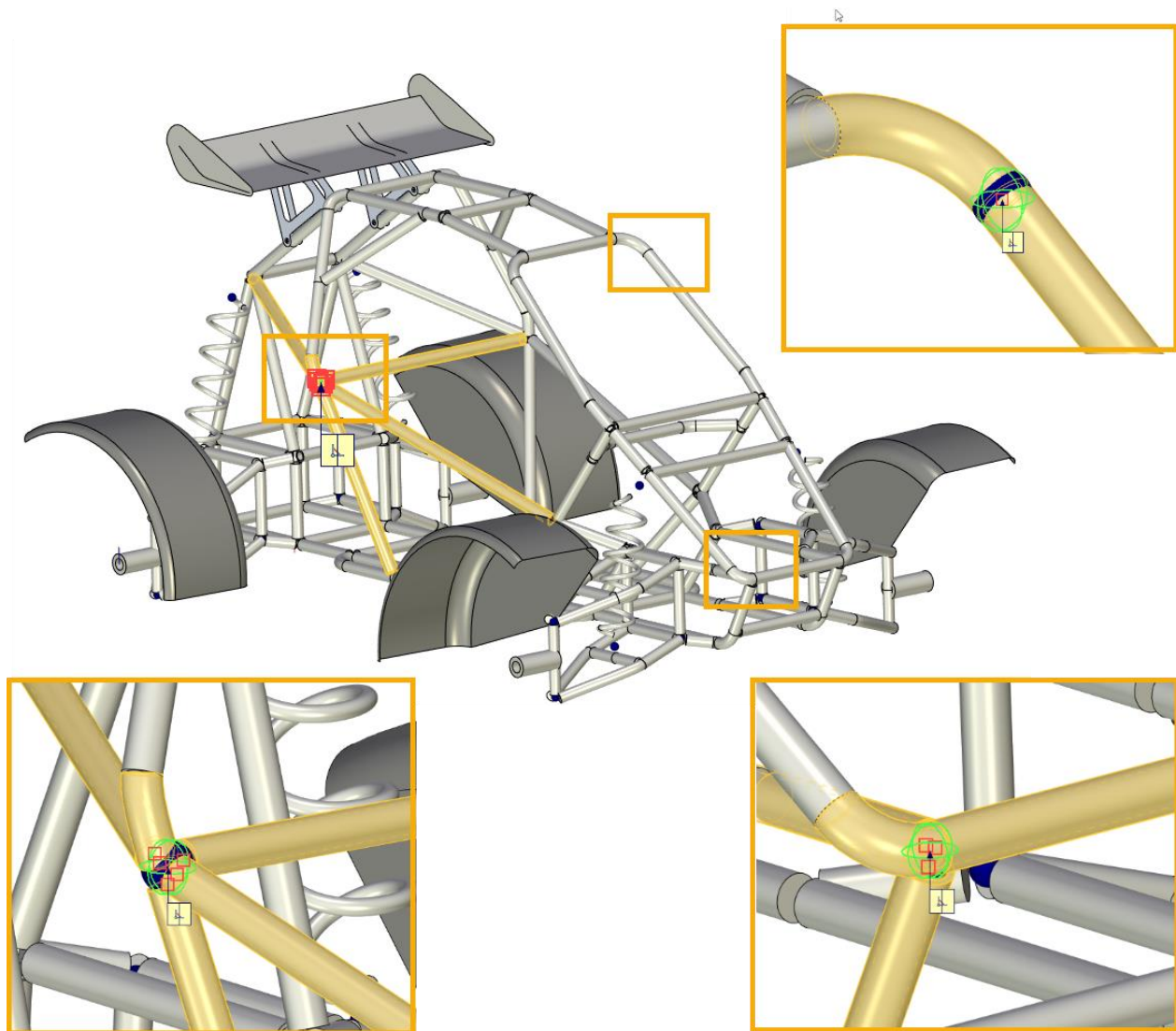
Принудительно отключает все связи между выбранными балочными элементами. Функция будет полезна при использовании автоматического задания балочных связей для последующей корректировки и исключения лишних связей.

Степень свободы:	
☒ Направление X	☒ Поворот по X
☒ Направление Y	☒ Поворот по Y
☒ Направление Z	☒ Поворот по Z

Если балки удалены друг от друга (не имеют совпадающих вершин), системой предусмотрена возможность учёта радиуса поиска соединения. Для этого необходимо активировать параметр **Величина допуска** и ввести значение. По умолчанию данный параметр равен нулю (для балок имеющие совпадающие вершины)

При завершении работы с командой **Соединение балок**, в дереве задачи окна **Задачи** или окна **3D Модель** создаться папка «**Контакты**» цифра, стоящая в скобках, указывает на количество контактов, заданных в задаче. Каждое соединение, отмечается специальной пиктограммой, при раскрытии которой, показывается контактирующая пара.





Пример использования команды «Создание балок»

Типичный порядок действий при соединении балок (ручной способ)

- инициировать команду **Соединение балок**;
- выбрать балки для соединения;
- выбрать тип соединения;
- отредактировать соединение (при необходимости);
- завершить команду.

3.4.4.4. ПОИСК КОНТАКТОВ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия и нагрузки > Контакт > Поиск контактов
Клавиатура	Текстовое меню
<3MI>	Анализ > Условия и нагрузки > Поиск контактов

Команда **Поиск контактов** предназначена для автоматической генерации контактных пар для элементов, размещенных в разных группах см. п. [Группировка элементов задачи](#). После подтверждении команды для контактных пар моделируется контакт типа «Жёсткая связь». Для того что бы переопределить тип контакта нужно воспользоваться командой **Изменить** через контекстное меню при выборе необходимого контакта  в дереве задачи окна **Задачи** или окна **3D Модель**.

Поиск контактов  

Основные параметры 

Радиус поиска: мм  

Угол между нормальями: °  

Тип контакта:

☒ Грань - Грань  

☐ Грань - Ребро  

☐ Ребро - Ребро  

Элементы:

 Булева_2 

 Отсечение_2  

Первый набор контактирующих граней:

1  Грань_18 : Отсечение_2 

2  Грань_18 : Отсечение_2  

Второй набор контактирующих граней:

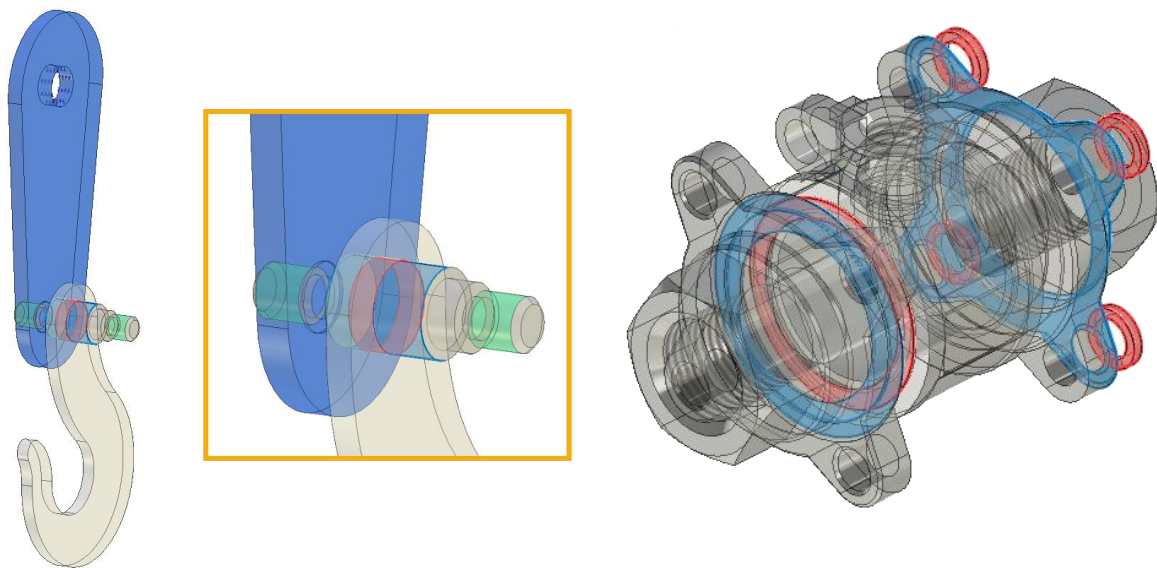
1  Грань_25 : Булева_2 

2  Грань_27 : Булева_2  

Для того что бы автоматически найти контакты необходимо задать:

- **Радиус поиска.** Параметр для установления диапазона поиска контактных пар. Т.е. поиск контактов по умолчанию происходит от нуля до установленного значения, как в область зазора, так и пересечения. Если величина между гранями меньше указанной величины, контактная пара должна добавиться в набор;
- **Угол между нормальными.** Параметр задает минимальный угол между нормальными рассматриваемых элементов. Если угол между нормальными граней меньше указанной величины, то система такое соединение добавляет в набор. Значение по умолчанию принять 75° . Минимальное значение равно 0° , а максимальное 90° ;
- **Тип контакта.** Параметр для настройки поиска типа контактирующих пар. В качестве контактирующей пары можно выбрать элементы геометрии: «грань-грань», «грань-ребро», «ребро-ребро»;
- **Элементы.** Параметр для выбора элементов задачи, в которых необходимо выполнить поиск возможных контактов;
- **Первый/второй набор контактирующих элементов.** Параметр для отображения списка найденных контактирующих пар. Элемент из списка можно удалить, при этом соответствующий элемент из второго набора удалиться тоже. При нажатии на элемент в одном наборе, посветиться соответствующий элемент из второго набора. Таким образом, выбранная пара подсвечивается в сцене определенным цветом, главная грань подсвечиваться красным, подчиненная – синим.

Создавать контакты попарно. Параметр, при активации которого все найденные контактные пары создадутся отдельным элементов в дереве задачи. По умолчанию активирован.



Пример использования команды «Поиск контактов»

Типичный порядок действий при автоматическом поиске контактов

- инициировать команду **Поиск контактов**;
- выбрать элементы;
- указать радиус поиска и/или угол между нормальными;
- выбрать тип контакта (элемент геометрии контактирующей пары);

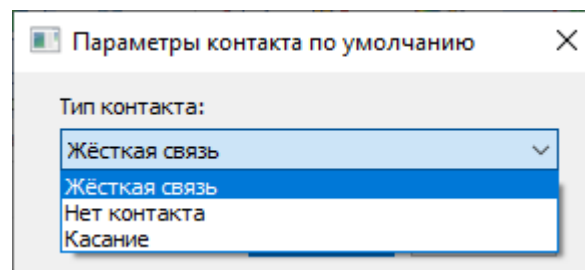
- нажать  для генерации контактных пар для выбранных элементов;
- отредактировать наборы контактов (при необходимости);
- завершить команду.

3.4.4.5. ПАРАМЕТРЫ КОНТАКТА ПО УМОЛЧАНИЮ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия и нагрузки > Контакт > Параметры контакта по умолчанию
Клавиатура	Текстовое меню
<ЗМК>	Анализ > Условия и нагрузки > Параметры контакта по умолчанию

Данная команда определяет тип контакта, используемый по умолчанию. Это позволяет глобально определить параметры контакта для всех соприкасающихся тел, строго находящихся в одной группе см. п. [Группировка элементов задачи](#). Например, если рассчитывается составная конструкция, состоящая из нескольких элементов, соединенных жестко, задание контакта по умолчанию «жесткая связь» избавляет от необходимости определять вручную тип контакта для всех соприкасающихся поверхностей. Параметры контакта по умолчанию можно переопределить.



3.4.5. СОБЫТИЕ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия и нагрузки > Событие
Клавиатура	Текстовое меню
<ЗСЕ>	Анализ > Условия и нагрузки > Событие

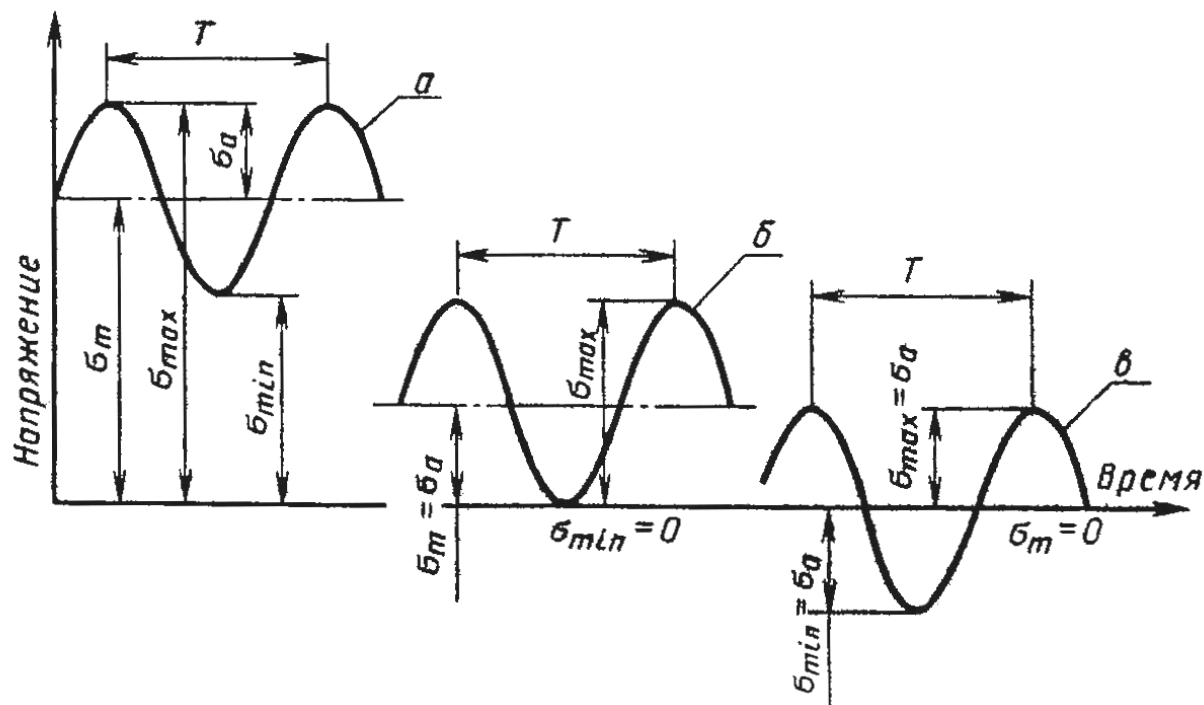
Команда **Событие** предназначена для задания параметров циклического нагружения с целью проведения расчёта конструкции на усталостную прочность.

Расчёт на усталостную прочность выполняется на основе результатов **статического анализа**. Рассчитанные в статическом анализе напряжения (эквивалентные или главные) будут использованы для расчёта усталостной прочности в качестве амплитуды циклических напряжений.

Кроме того, при расчёте усталости необходимым параметром является наличие **кривой усталости** в параметрах материала см. п. [Материал](#).

Кривая усталости представляет собой экспериментальную кривую, построенную по совокупности точек, абсцисса каждой из которых равна числу циклов до разрушения N , а ордината – пределу усталости при заданном числе циклов нагружения.

Кривая усталости отображает закономерность, по которой с увеличением числа циклов уменьшается максимальное напряжение, при котором происходит разрушение материала. Для одного и того же материала могут быть построены кривые усталости для различных циклов напряжений: симметричного ($R=-1$), пульсационного ($R=0$), асимметричного. Самым опасным циклом нагружения с точки зрения усталостной прочности является **симметричный**, а самым щадящим – **пульсационный**.



Графики зависимости напряжения от времени нагружения при одном цикле нагружения:
а) асимметричный цикл нагружения, б) пульсационный цикл в) симметричный цикл

Для задачи можно создать одно или несколько событий.

Для того что бы создать усталостное событие необходимо:

- выбрать задачу из списка для которых задана хотя бы одна кривая усталости и рассчитан тензор напряжений.
- задать параметры циклического нагружения:

- **Количество цикла нагрузки.**

Параметр для задания количества циклов нагружения. Диапазон принят согласно Min/Max значениям из всех заданных в исходной задаче кривых усталости;

- **Тип нагружения.** Параметр для выбора типа циклического нагружения: По умолчанию задан **Симметричный**, т.к. он является наиболее опасным типом нагружения.



- Симметричный;



- Пульсационный;



- Коэффициент асимметрии цикла.

- **Коэффициент асимметрии цикла.** Параметр для задания коэффициента асимметрии цикла. Для типа нагружения **Симметричный** и **Пульсационный** предназначен только для информации.

Поле активно для ввода значения, когда пользователь выбрал **Тип нагружения** – **Коэффициент асимметрии цикла**.

- **Тип коррекции.** Параметр, который необходим, если расчетный тип асимметрии цикла не соответствует типу асимметрии цикла заданной диаграммы. Таким образом для увеличения точности можно использовать одну из корректировок средних напряжений, специально предназначенных для таких случаев.

По теории **Гудмена**: для хрупких материалов;

По теории **Герберта**: для пластичных материалов;

По теории **Содерберга**: универсальная теория (для любых материалов).

Тип коррекции:	Без коррекции
Масштаб:	Без коррекции
	Гудмена
	Герберта
	Содерберга

- **Масштаб.** Параметр, который задаёт коэффициент масштабирования, прямопропорционально увеличивая расчетные амплитудные напряжения.

Типичный порядок действий при создании «События»

- создать задачу статической прочности, провести расчёт;
- создать задачу усталостной прочности;
- инициировать команду **Событие**;
- задать параметры циклического нагружения;
- завершить команду.

3.4.6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАФИКОВ ДЛЯ ЗАДАНИЯ ПАРАМЕТРОВ

В задачах динамического или нестационарного теплового анализа могут применяться граничные условия или свойства материалов, зависящие от времени или температуры, например:

- постепенное нарастание силы со временем.
- зависимость коэффициента конвекции от температуры поверхности тел, с которых происходит конвекция.
- зависимость коэффициента линейного расширения материала от температуры.

Зависимость свойств материала от температуры может быть задана также и в задачах статике, устойчивости и др.

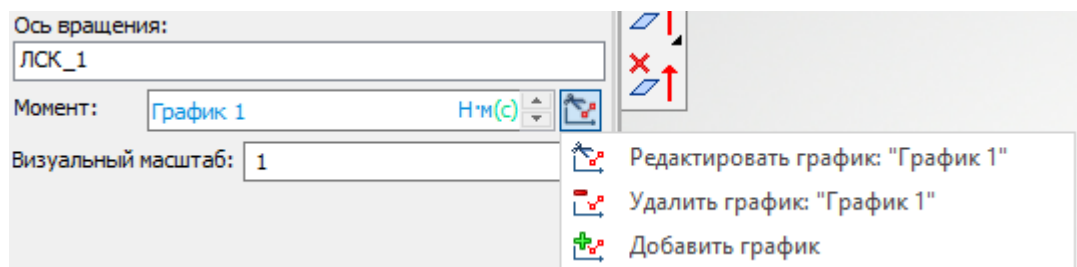
Для задания таких параметров применяются графики в граничных условиях или свойствах материала.

Задание зависимости величины от времени

Задание зависимости величины от времени применяется в задачах динамического анализа (Линейная динамическая задача, динамические нестационарные процессы) и Нестационарных тепловых процессов. Задание этой зависимости допускается для следующих видов нагружений:

- [Сила](#)
- [Давление](#)
- [Ускорение](#)
- [Цилиндрическая нагрузка](#)
- [Крутящий момент](#)
- [Дистанционная масса](#)
- [Осциллятор](#)
- [Температура](#)
- [Конвекция](#)
- [Тепловой поток](#)

После того, как график добавлен, значение параметра меняется на имя графика и появляется список, в котором можно выбрать единицы измерения аргумента (сек, мин, ч). Единицы измерения функции соответствуют единицам измерения, установленным для параметра, с которым связывается график.



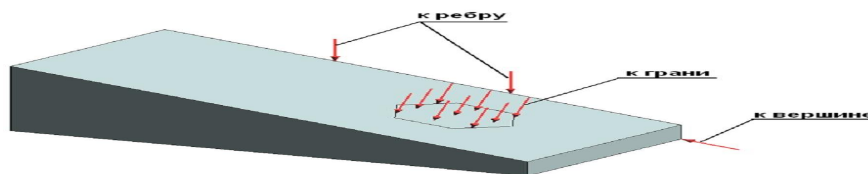
При нажатии на кнопку можно вызвать список для редактирования, удаления текущего или добавления другого графика. При удалении графика он отвязывается от параметра, но сохраняется в документе. Для удаления его из документа нужно воспользоваться командой **Редактировать графики**.

Задание зависимости величины от температуры

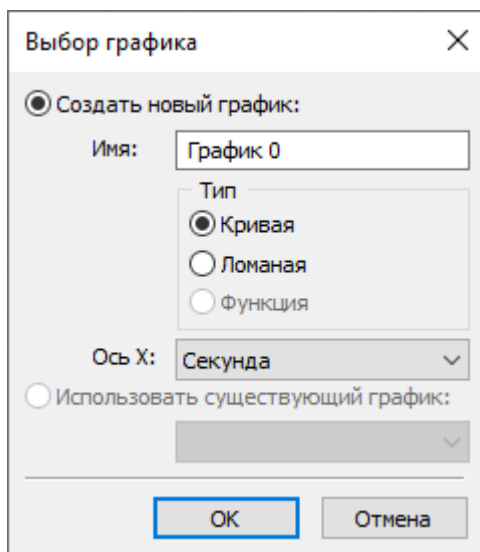
Зависимости величин от температуры могут задаваться как в нестационарных задачах, так и в стационарных. Допускается для следующих тепловых нагрузок:

- [Температура](#)
- [Начальная температура](#)
- [Тепловой поток](#)
- [Тепловая мощность](#)
- [Конвекция](#)
- [Излучение](#)

Также допускается задать температурную зависимость для любого из свойств материалов. Для задания зависимости параметра от температуры нужно добавить график нажатием на кнопку  справа от значения в окне Параметры. В открывающемся списке нужно выбрать **Температура**.

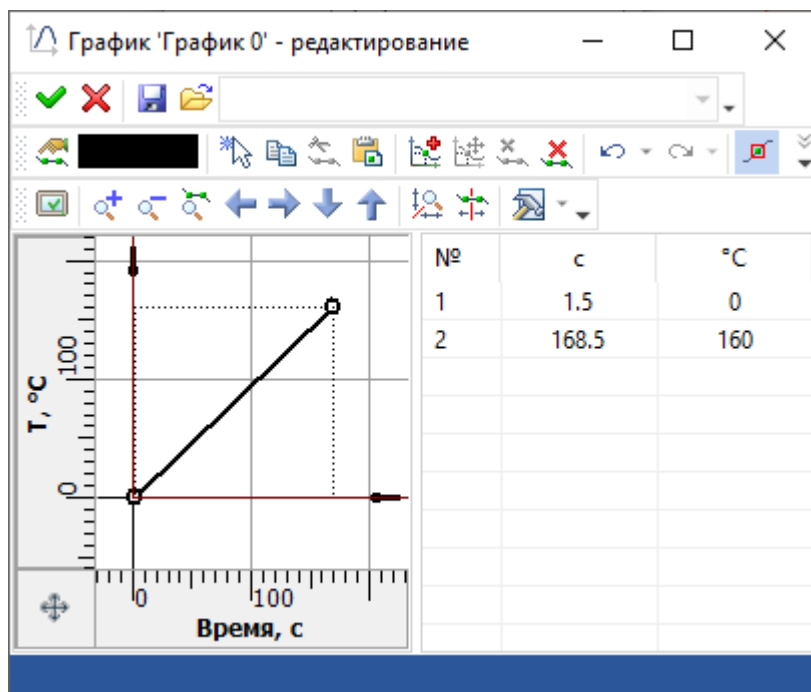


После чего открывается диалог создания графика. В этом диалоге можно задать имя графика, выбрать тип: кривая/ломанная и нажать **ОК**.

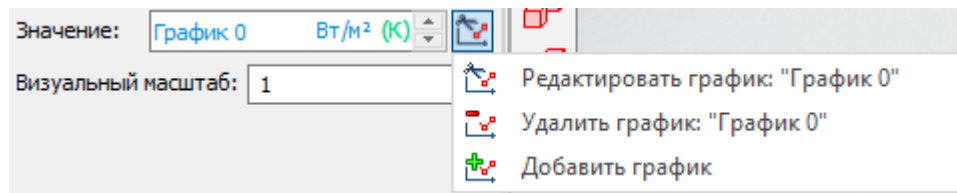


После этого необходимо задать точки. Создание, редактирование, сохранение и загрузка графика ничем не отличается от работы с обычными графиками T-FLEX CAD.

Точки можно вставить из буфера обмена, скопировав из текстового файла (разделитель аргумента/функции Tab) или таблицы Excel. Созданный график хранится в текущем документе и доступен по команде **Редактировать графики**. Также можно загрузить график T-FLEX CAD с расширением .tflaw и подключить его к параметру.



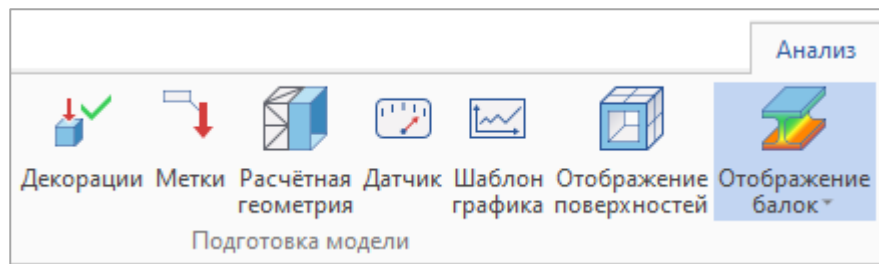
После того как график добавлен, значение параметра меняется на имя графика и появляется список, в котором можно выбрать единицы измерения аргумента: градусы К, С, F. Единицы измерения функции соответствуют единицам измерения, установленным для параметра, с которым связывается график.



После добавления графика кнопка добавления меняется на кнопку редактирования. Нажав на эту кнопку, можно вызвать список для редактирования, удаления текущего или добавления нового.

3.5. СЕРВИСЫ ПРЕПРОЦЕССИНГА

В данном разделе описаны сервисные команды препроцессинга, которые предназначены для обеспечения удобной работы и управления расчётной модели. Команды располагаются в группе «Подготовка модели» ленты Анализ.



Основные темы в этом разделе:

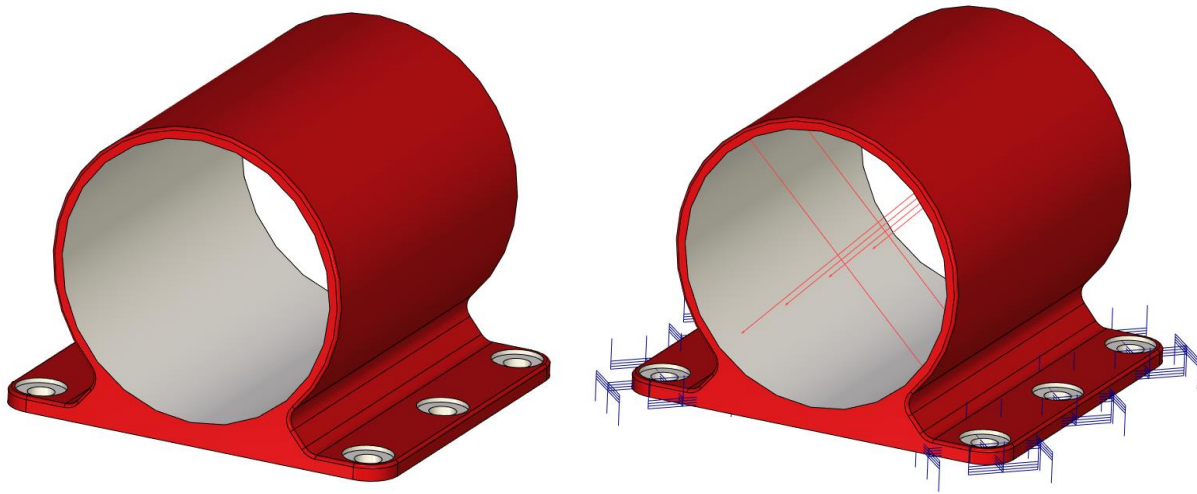
- [Декорации](#)
- [Метки](#)
- [Расчётная геометрия](#)
- [Датчик](#)
- [Шаблон графика](#)
- [Отображение поверхностей](#)
- [Отображение балок](#)
- [Экспорт данных](#)
- [Копировать задачу](#)

3.5.1. ДЕКОРАЦИИ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Подготовка модели > Декорации
Клавиатура	Текстовое меню
<ЗМН>	Анализ > Подготовка модели > Декорации

Команда **Декорации** служит для визуального представления условных изображений граничных условий и нагрузжений заданных для расчётной модели.



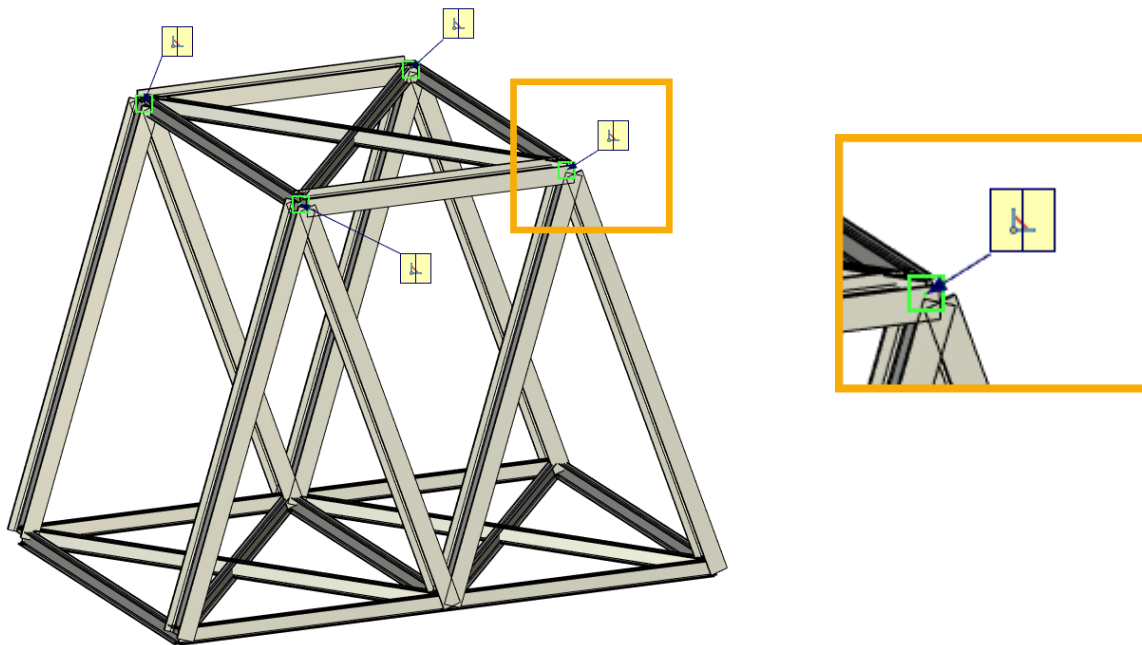
Применение команды «Декорации»

3.5.2. МЕТКИ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Подготовка модели > Метки
Клавиатура	Текстовое меню
	Анализ > Подготовка модели > Декорации

Команда **Метки** служит для визуального представления условных изображений граничных условий (пружин, соединений балок) заданных для расчётной модели.



Применение команды «Метки»

3.5.3. РАСЧЁТНАЯ ГЕОМЕТРИЯ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Подготовка модели > Расчётная геометрия
Клавиатура	Текстовое меню
<3CG>	Анализ > Подготовка модели > Расчётная геометрия

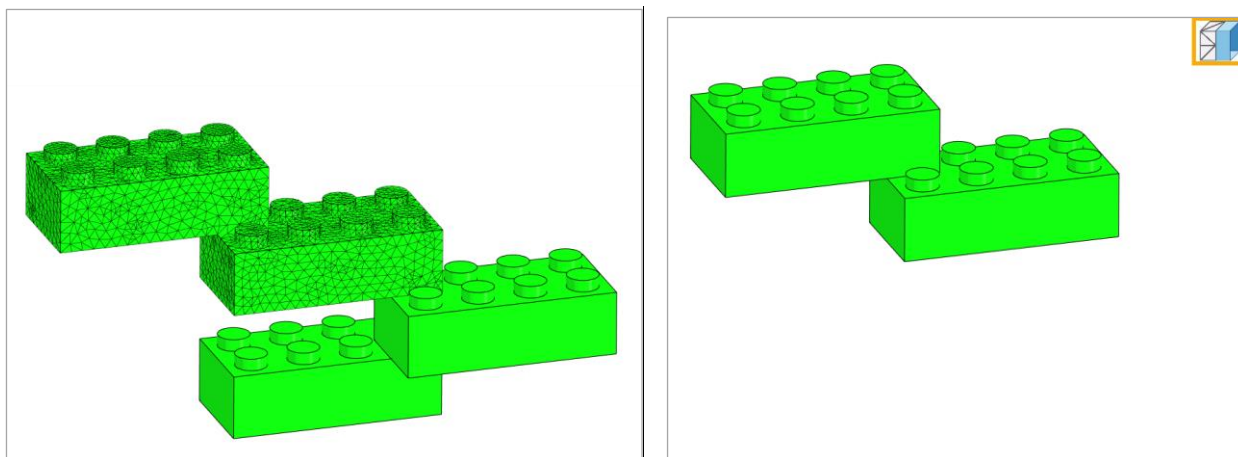
Команду **Расчётная геометрия** можно вызвать из ленты T-FLEX Анализ или из контекстного меню при выборе задачи в дереве окна **Задачи** или окна **3D Модель**.

Для удобной работы с элементами задачи существует команда **Расчетная геометрия**

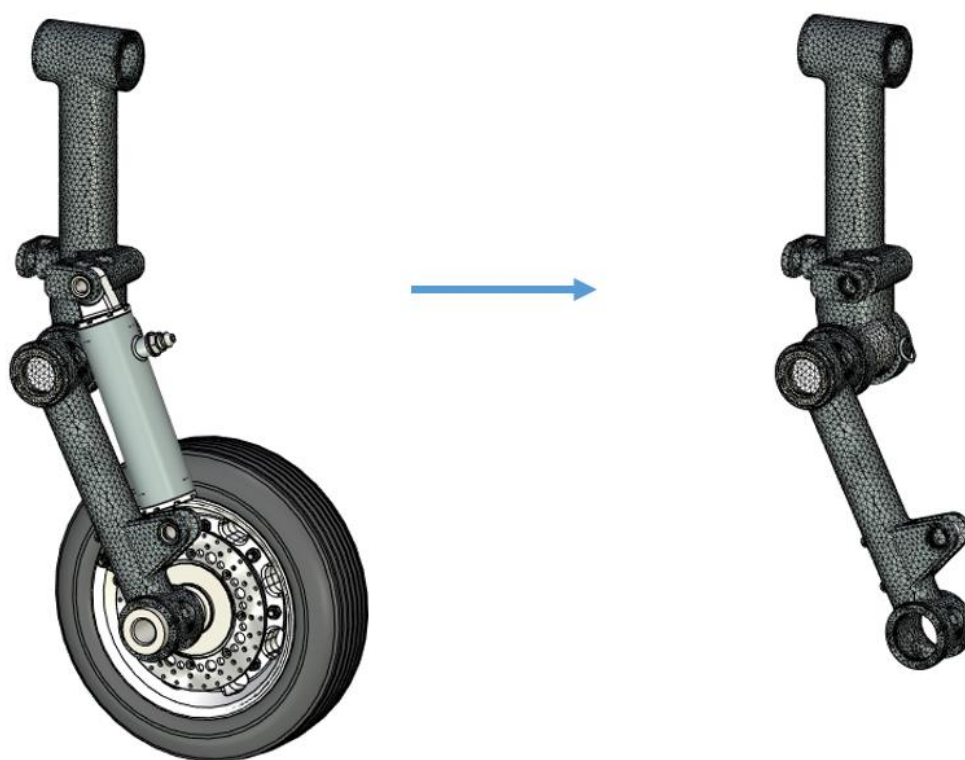
Расчётная геометрия - это геометрическая модель, детализации которой достаточно для использования в расчётах. Расчётная геометрия может быть с упрощениями или без них.

По умолчанию после создания [Новой задачи](#) все элементы 3D модели отображаются в основной сцене. При включении команды **Расчетная геометрия**, скрываются элементы из сцены, не входящие в задачу и появляется плавающее меню в правом верхнем углу.

Что бы выйти из команды и показать всю сборку в сцене необходимо нажать кнопку плавающего меню или ленты Анализ.



Применение команды «Расчётная геометрия»



Применение команды «Расчётная геометрия»

3.5.4. ДАТЧИК

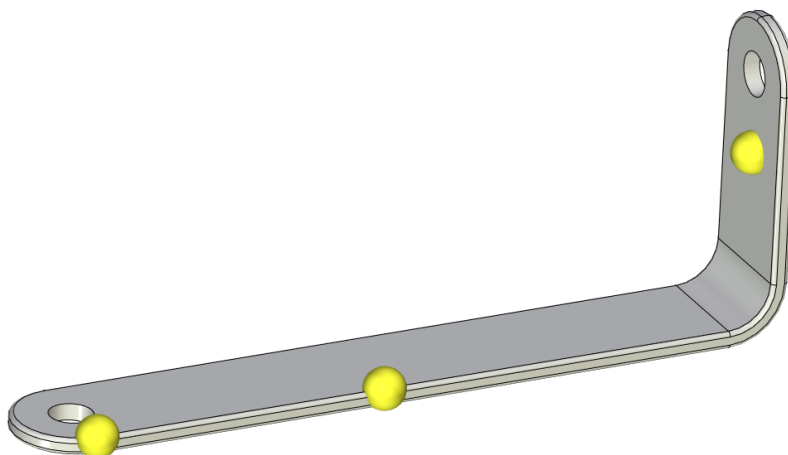
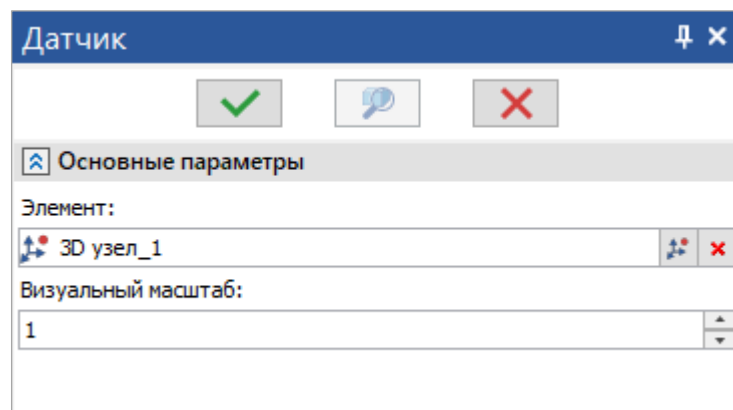
Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Подготовка модели > Датчик
Клавиатура	Текстовое меню
<3MD>	Анализ > Подготовка модели > Датчик

Команда **Датчик** предназначена для получения результатов расчёта в конкретном месте расчётной модели. По полученным значениям датчика можно построить графики см. п. [Шаблон графика](#) или использовать их при оптимизации конструкции.

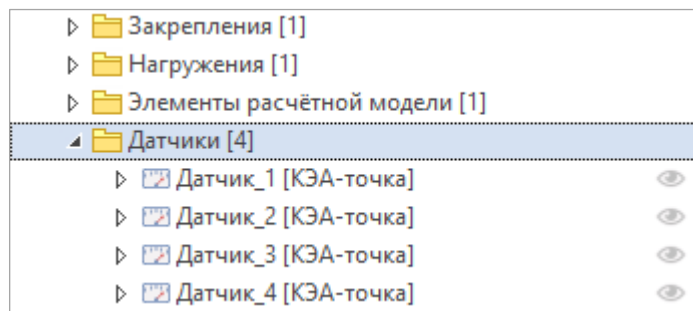
Датчик можно установить в вершинах расчётной модели или в 3D узлах принадлежащих этой модели.

3D узел можно выбрать из основной сцены, в дереве окна **3D Модель** или воспользоваться вложенной командой по созданию 3D узлов из диалогового окна **Датчик**.

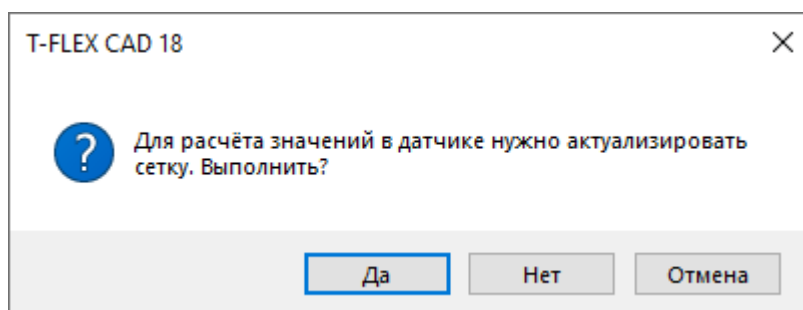


Применение команды «Датчик»

После создания датчиков, они отображаются в дереве задачи окна **Задачи** или окна **3D Модель** в папке **Датчики**, а цифра, стоящая в скобках, указывает на количество датчиков, созданных для данной задачи.



Если датчик был установлен по 3D узлу см. п. [Встраивание 3D узлов](#) после создания КЭ сетки, то при запуске на расчёт см.п. [Расчёт](#) система выдаст предупреждение с предложением актуализировать сетку. При нажатии **Да**, система обновит сетку и в месте расположения датчика поставится узел КЭ сетки. После завершения расчёта, значение в датчике будет вычислено с узла КЭ сетки. По нажатию **Нет**, система запустит расчёт, но значения в датчике будут вычислены с помощью интерполяции с ближайших узлов КЭ сетки.



Типичный порядок действий при создании датчика

- инициировать команду **Датчик**;
- выбрать 3D узлы, вершины для задания положения датчика;
- завершить команду.

3.5.5. ШАБЛОН ГРАФИКА

Вызов команды:

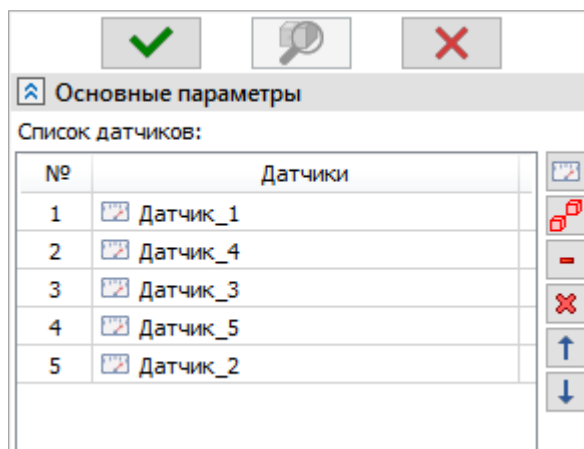
Пиктограмма	Лента
	Анализ > Подготовка модели > Шаблон графика
Клавиатура	Текстовое меню
<3GT>	Анализ > Подготовка модели > Шаблон графика

Графики предназначены для наглядного представления измеряемых от нескольких датчиков данных расчёта в виде кривых и построения зависимостей. Например, можно измерять температуру на разном расстоянии от центра объекта (расчётной модели) создав несколько датчиков, находящихся на одном радиусе и построить зависимость температуры от радиуса или построить график изменения напряжения в заданном сечении.

Чтобы создать график необходимо воспользоваться командой **Шаблон графика**.

В задаче может быть несколько шаблонов графиков, например, один, созданный для ряда датчиков, расположенных вдоль вертикальной оси какого-либо сечения, другой – вдоль горизонтальной.

При запуске команды **Шаблон графика**, **Список датчиков** изначально пустой. Датчики можно выбрать в необходимой последовательности из основной сцены или в дереве окна **3D Модель**, тем самым автоматически формируется **Список датчиков**. С помощью вложенных команд можно отредактировать **Список датчиков** как того требует задача.



При помощи вложенных команд можно:



- команда по созданию датчика;



- команда для добавления всех созданных датчиков активной задачи. При добавлении всех датчиков, они выстраиваются в списке согласно порядковому номеру их создания;



- команда убирает из списка выделенный датчик, при удалении происходит перенумерация элементов в списке;



- команда для очистки всего списка;

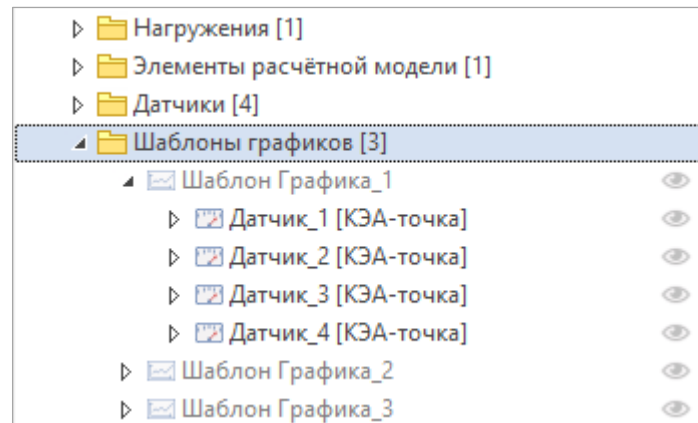


- команда для перемещения датчика выше по списку (для выстраивания порядка);



- команда для перемещения датчика вниз по списку (для выстраивания порядка).

После создания шаблона графика, он отображается в дереве задачи окна **Задачи** или окна **3D Модель** в папке **Шаблоны графиков**, а цифра, стоящая в скобках, указывает на количество шаблонов графиков, созданных для данной задачи.



Типичный порядок действий при создании шаблона графика

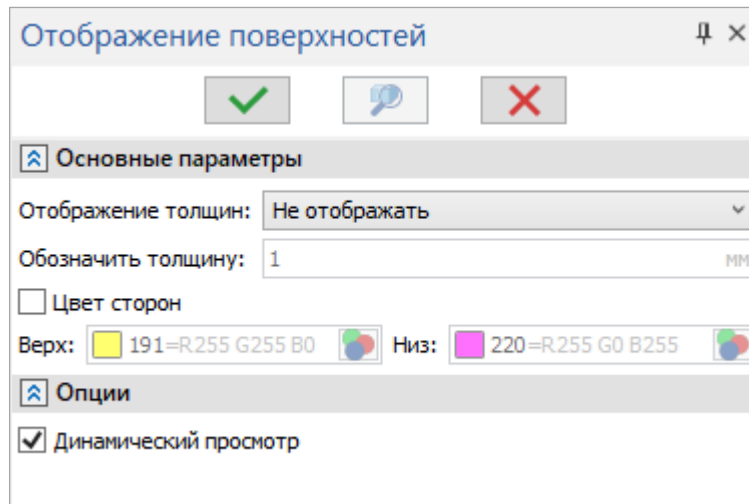
- инициировать команду **Шаблон графика**;
- выбрать датчики и при необходимости подкорректировав их порядок;
- завершить команду.

3.5.6. ОТОБРАЖЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Подготовка модели > Отображение поверхностей
Клавиатура	Текстовое меню
<3TV>	Анализ > Подготовка модели > Отображение поверхностей

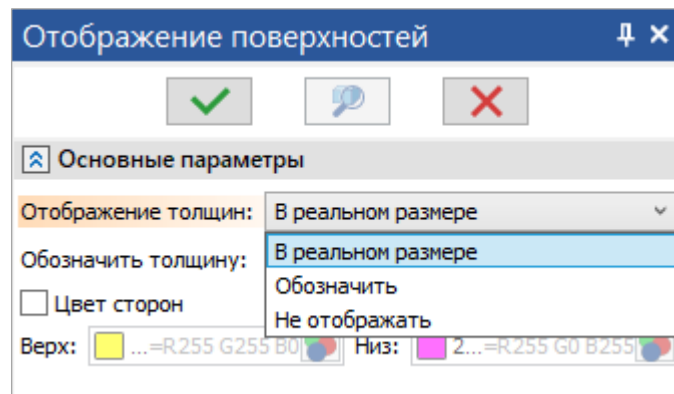
Команду **Отображение поверхностей** можно вызвать из ленты T-FLEX Анализ или из контекстного меню при выборе элемента **Сетка**  в дереве окна **Задачи** или окна **3D Модель**. Команда **Отображение поверхностей** служит для визуального представления заданной толщины поверхности в задаче.



Отобразить толщину поверхности можно:

- В реальном размере;
- Обозначить;
- Не отображать.

При отображении толщины в режиме **Обозначить**, становится активным поле **Обозначить толщину**, где можно ввести значение необходимой толщины поверхности, для лучшей визуализации.



Активировав переключатель **Цвет сторон**, можно выбрать любой цвет для верха и низа поверхности.

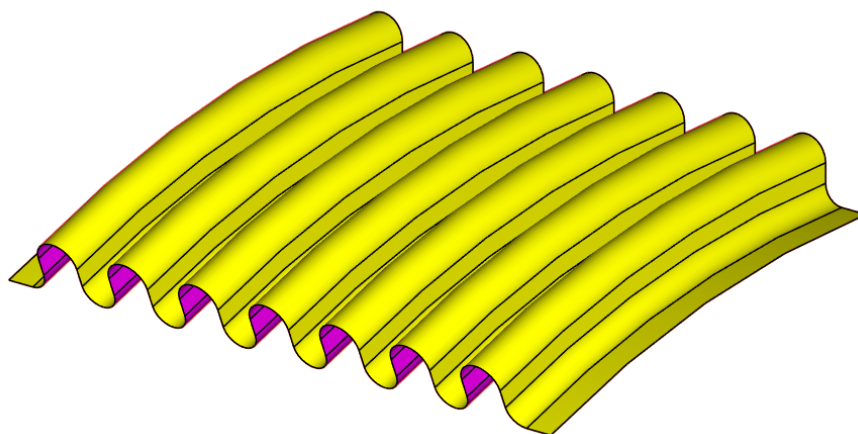
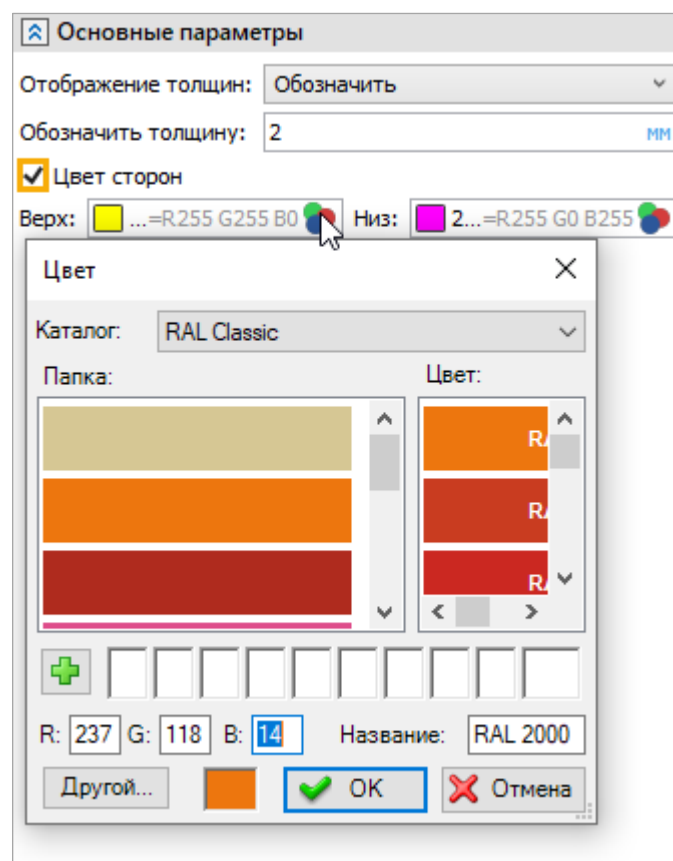


Рис. 1 – Отображение верха и низа поверхности. Здесь желтым цветом – верх, пурпурным – низ поверхности.

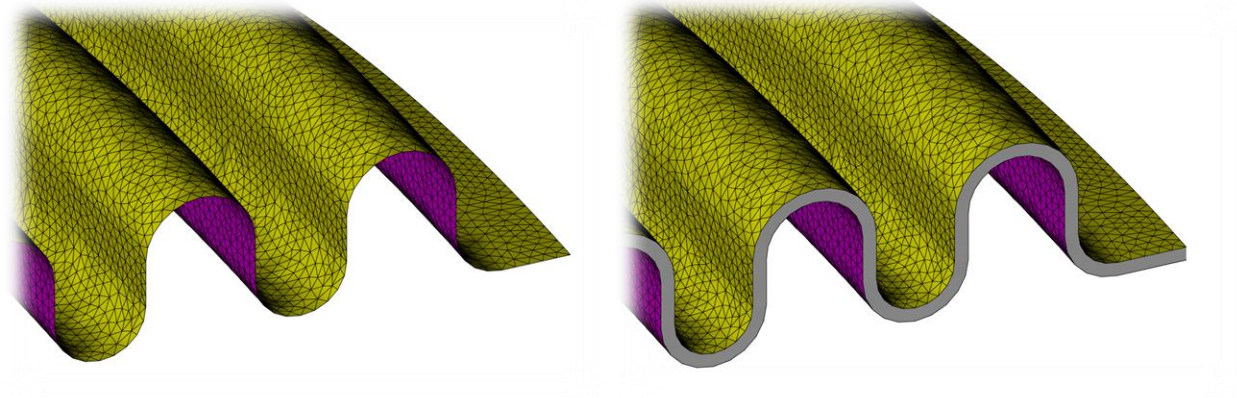


Рис. 2 – Отображение толщины поверхности

3.5.7. ОТОБРАЖЕНИЕ БАЛОК

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Подготовка модели > Отображение балок
Клавиатура	Текстовое меню
	Анализ > Подготовка модели > Отображение балок

Команда **Отображение балок** предназначена для визуального представления расчётной модели, состоящей из балочных элементов.

Режимы отображения, следующие:



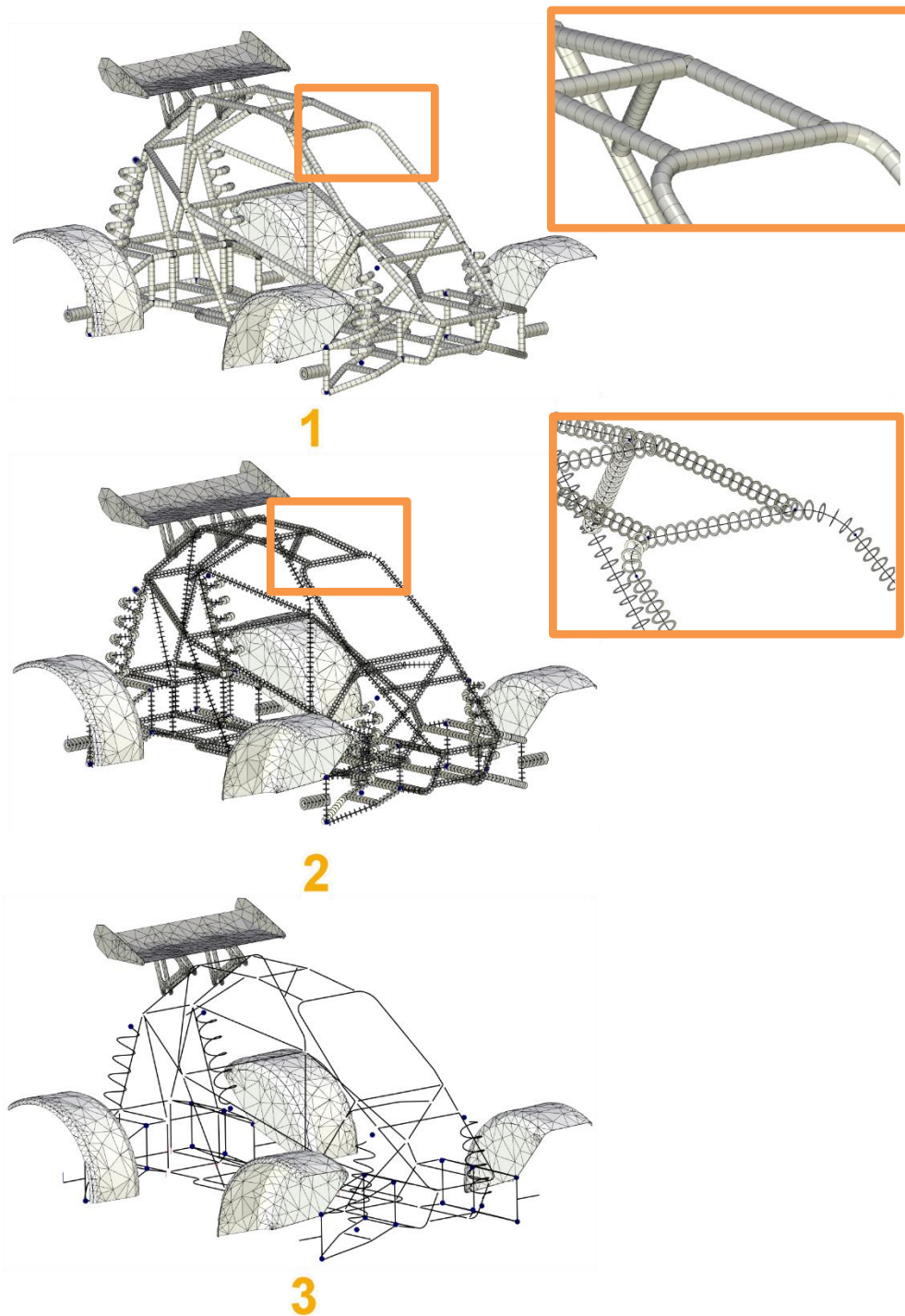
- Объёмное;



- Упрощённое;



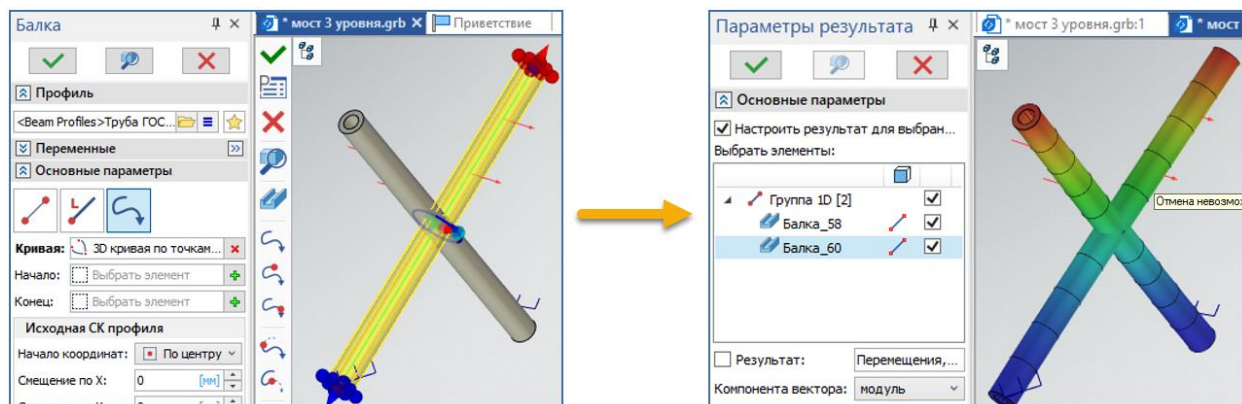
- Проволочное.



Применение команды «Отображение балок»: 1 – «Объёмное», 2 – «Упрощённое», 3 – «Проволочное»

3.5.8. ВСТРАИВАНИЕ 3D УЗЛОВ ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЯ ГУ, НАГРУЗОК, ДАТЧИКОВ НА ЭЛЕМЕНТЫ ЗАДАЧИ

При работе с балочными конструкциями возникает необходимость учитывать пересечения балок, например, X-образное пересечение или T-образное. Соединение реализуется при помощи создания 3D узлов системы T-FLEX CAD. Наличие 3D узла на образующей балки позволяет создавать как сочленение балок, так и создавать в этих местах закрепления или нагружения.



Учёт разделения балки на отрезки, ограниченные 3D узлами на её образующей

3.5.9. ЭКСПОРТ ДАННЫХ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Расчёт и выходные данные > Экспорт данных
Клавиатура	Текстовое меню
<3MX>	Анализ > Расчёт и выходные данные > Экспорт данных

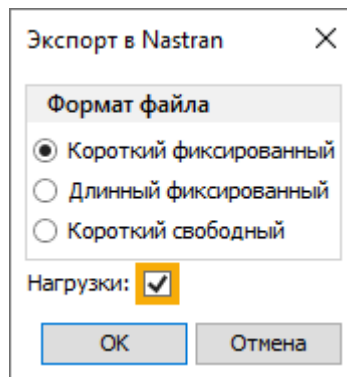
Команду **Экспорт данных** можно вызвать из ленты T-FLEX Анализ или из контекстного меню при выборе задачи в дереве окна **Задачи** или в окне **3D Модель**.

Подготовленные исходные данные каждой задачи можно экспортировать в формате Nastran (*.dat), (*.bdf).

Далее необходимо задать комбинацию двух свойств формата:

Короткий/длинный – задаёт точность выходных параметров (максимальный размер чисел в десятичных знаках, включая точку): короткий - до 8 десятичных знаков, длинный - до 16 десятичных знаков.

Фиксированный/свободный – определяет вид экспортируемых данных: фиксированный - данные выводятся в столбцах фиксированного размера, свободный - данные выводятся через запятую.

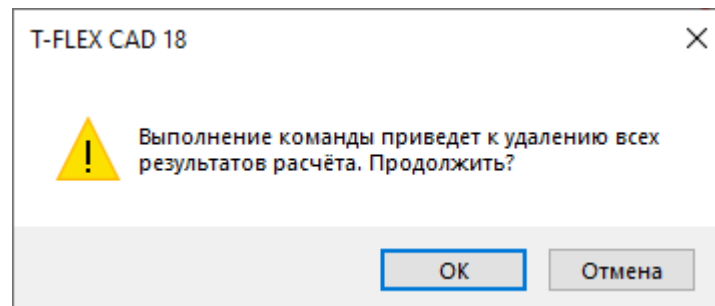


При активации переключателя **Нагрузки**, в экспортируемый файл будет содержать данные о имеющихся нагрузках (реализовано только для нагрузки [Сила](#)) задачи T-FLEX Анализ.

3.5.10. ОЧИСТИТЬ ЗАДАЧУ

Команду **Очистить задачу** можно вызвать из контекстного меню при выборе задачи  в дереве окна **Задачи** или окна **3D Модель**.

После вызова команды система выдаст предупреждение с информацией о том, что выполнение команды приведёт к удалению всех результатов расчёта.



3.5.11. КОПИРОВАТЬ ЗАДАЧУ

Команду **Копировать задачу** можно вызвать из контекстного меню при выборе задачи  в дереве окна **Задачи** или окна **3D Модель**.

Если на одной и той же расчётной геометрии необходимо выполнить другой вид анализа, изменить материал, условия и нагрузки или конечно-элементную модель можно воспользоваться командой **Копировать задачу**. Команда вызывается из контекстного меню.

В модальном диалоговом окне необходимо указать **Тип задачи**, а также отметить какую «копию» вы хотите получить. Система предлагает создать:

- **Создать независимую копию сетки** - созданная сетка будет редактироваться независимо от сетки в исходной задаче;
- **Создать зависимую копию сетки** - созданная сетка будет редактироваться совместно с сеткой в исходной задаче;
- **Не копировать задачу**;

- **Сохранить исходные материалы** – в новой задаче будут использованы те же материалы, что и в исходной;
- **Создать копии материалов задачи** - в новой задаче будут использованы копии материалов.

Параметры копирования задачи

Тип задачи: Статическая прочность

Расчёт напряжённо-деформированного состояния:

☒ Создать независимую копию сетки

☐ Создать зависимую копию сетки

☐ Не копировать сетку

Созданная сетка будет редактироваться независимо от сетки в исходной задаче

☒ Сохранить исходные материалы

☐ Создать копии материалов задачи

В новой задаче будут использованы те же материалы, что в исходной:

ОК Отмена

4. ПРОЦЕССИНГ: РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

T-FLEX Анализ предлагает следующие типы анализов:

- **Статический анализ**

Основная цель статического прочностного анализа конструкций заключается в оценке напряжённого состояния конструкции, находящейся под действием не изменяющихся во времени (статических) силовых воздействий. Основными результатами статических расчётов являются:

- поля перемещений конструкции в расчётных точках конечно-элементной сетки;
- поля относительных деформаций;
- поля компонентов напряжений;
- энергия деформаций;
- узловые усилия, реакции;
- поля распределения коэффициента запаса по напряжениям по объёму конструкции.
- **Анализ по потери устойчивости**

Потеря устойчивости - когда малые возмущения приложенных к системе сил приводят к большим деформациям конструкции, выходящими за рамки линейной теории упругости. Нагрузки, при которых происходит потеря устойчивости, называют критическими, а соответствующие состояния – критическим состоянием. Критическое состояние, как непосредственно предшествующее разрушению, считается недопустимым в условиях реальной эксплуатации. Функционал анализа устойчивости предназначен для решения задачи так называемой начальной устойчивости конструкции.

Результатом расчёта является коэффициент критической нагрузки, при действии которой конструкция может скачкообразно перейти в новое равновесное состояние, и соответствующая этой нагрузке форма нового равновесного состояния.

- **Анализ усталости**

Помогает предотвратить разрушение и обеспечить надёжность и безопасность конструкций. Усталость материала возникает из-за постепенного накопления повреждений в материале под действием переменных напряжений. Каждый цикл колебания напряжений в некоторой степени ослабляет объект, что приводит к образованию трещины, ее развитию и окончательному разрушению изделия. Исследования усталости вычисляют срок службы объекта, основанный на событиях усталости материалов и кривых S-N.

- **Частотный анализ**

Определение собственных (резонансных) частот колебаний конструкций и соответствующих им формы колебания.

Определение спектральных свойств конструкции помогает избежать резонансов в рабочем диапазоне частот от внешних воздействий на стадии проектирования. Это позволяет внести в конструкцию изменения, которые изменят спектр собственных частот.

- **Анализ вынужденных колебаний**

Анализ вынужденных колебаний проводится для предсказания поведения конструкции под действием внешних воздействий, изменяющихся по гармоническому закону.

Целью анализа вынужденных колебаний является получение зависимости отклика системы от частоты вынуждающих воздействий. Результатами расчета являются амплитуды перемещений, виброускорения и виброперегрузки на заданной вынуждающей частоте.

- **Тепловой анализ**

Предназначен для решения задач теплопроводности и теплопередачи. Целью осуществления тепловых расчётов обычно является определение температурных полей, а также тепловых потоков в объёме изделия.

- **Динамический анализ**

В динамическом анализе механическая система рассматривается под действием изменяющихся во времени внешних воздействий - приложенных к системе сил, давлений, ускорений и т.п. В результате решения динамической задачи мы получаем в основном те же самые результаты расчёта, как и в статическом анализе (перемещения, напряжения, коэффициент запаса), но каждый результат представлен для определенного момента времени, соответствующего заданному временному интервалу и конкретному временному шагу.

4.1. РАСЧЁТ ЗАДАЧИ

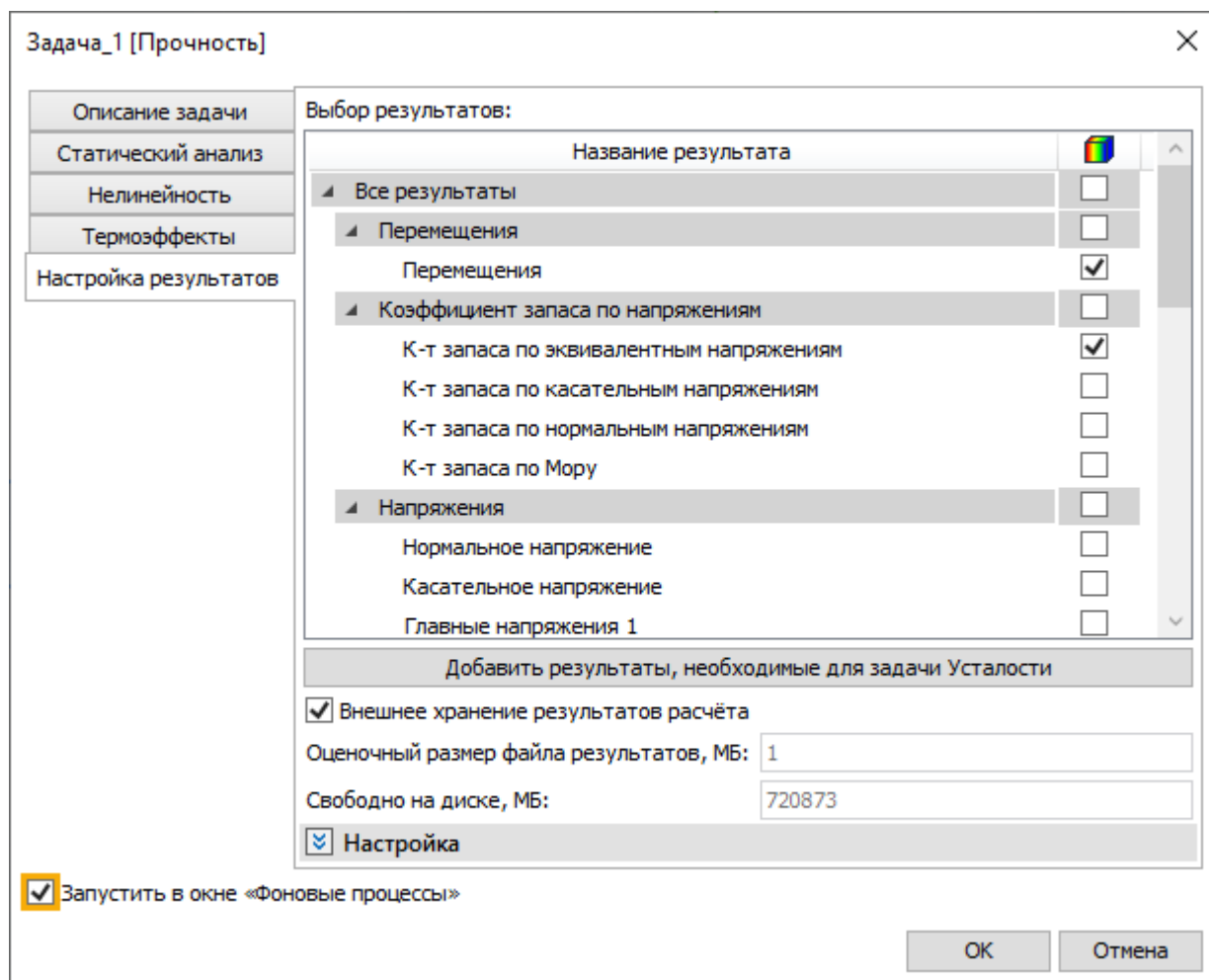
Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Расчёт и выходные данные > Расчёт
Клавиатура	Текстовое меню
<ЗМУ>	Анализ > Расчёт

Команду **Расчёт** можно вызвать из ленты T-FLEX Анализ или из контекстного меню при выборе задачи  в дереве окна **Задачи** или окна **3D Модель**.

Данная команда предназначена для запуска на расчёт активной задачи в соответствии с её исходными данными и параметрами расчёта.

При инициировании команды **Расчёт** появляется диалоговое окно задания параметров задачи, имеющий несколько переключаемых вкладок. Вкладки [Описание задачи](#) и [Настройка результатов](#) являются общими для всех типов задач. Пользователь может изменить установленные по умолчанию параметры задачи. Доступ к параметрам задачи можно также осуществить из контекстного меню по нажатию  на имени выбранной задачи в дереве окна **Задачи**. Параметры задачи, определённые пользователем, сохраняются при сохранении документа, а также наследуются при копировании задачи.



Задача_1 [Прочность]

Описание задачи
Статический анализ
Нелинейность
Термоэффекты
Настройка результатов

Выбор результатов:

Название результата	
Все результаты	☐
Перемещения	☐
Перемещения	☒
Коэффициент запаса по напряжениям	☐
К-т запаса по эквивалентным напряжениям	☒
К-т запаса по касательным напряжениям	☐
К-т запаса по нормальным напряжениям	☐
К-т запаса по Мору	☐
Напряжения	☐
Нормальное напряжение	☐
Касательное напряжение	☐
Главные напряжения 1	☐

Добавить результаты, необходимые для задачи Усталости

☒ Внешнее хранение результатов расчёта

Оценочный размер файла результатов, МБ: 1

Свободно на диске, МБ: 720873

☒ Настройка

☒ Запустить в окне «Фоновые процессы»

OK Отмена

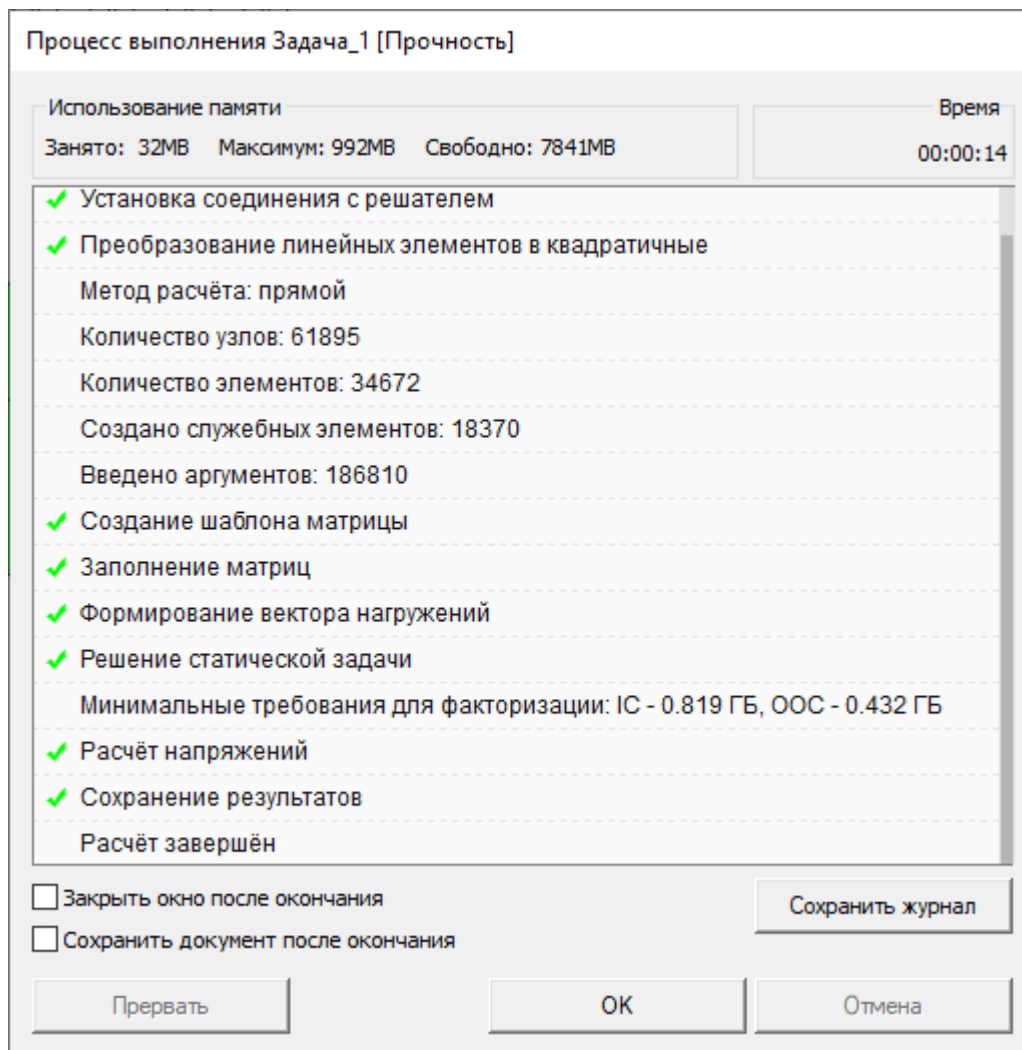
Команда **Расчёт** запускает процесс формирования систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) и их решения. Режимы для формирования СЛАУ и методы их решения выбираются автоматически процессором T-FLEX Анализ.

В процессе решения СЛАУ доступен диалог с отображением этапов расчёта. Процесс решения СЛАУ может занимать значительное время на задачах с сетками из большого количества

тетраэдров. По окончании расчёта выводится соответствующее информационное сообщение.

Кроме того, если активировать опцию **Запустить в окне «Фоновые процессы»**, расчёт будет проводиться в фоновом режиме см. п. [Окно «Фоновые процессы»](#).

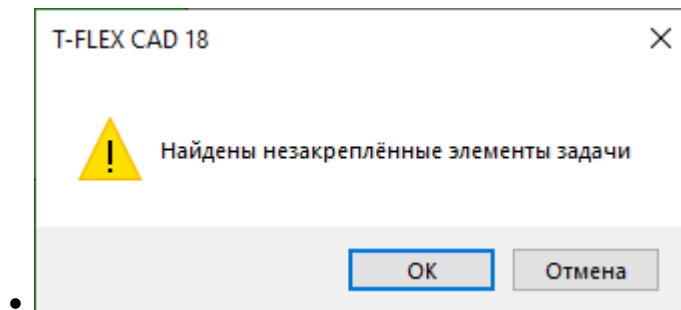
Активировав опцию **Внешнее хранение результатов расчёта**, результаты расчета сохраняются специальным tfea-файлом в папку с grb-файлом см. п. [Внешнее хранение результатов](#).



Основное назначение параметров задачи – задание требуемых для работы процессора режимов, списка отображаемых результатов после завершения расчёта в дереве окна **Задачи**. Наборы настроек и параметров, соответствующие различным типам задач, более подробно описаны в разделах:

- [Статическая задачи](#)
- [Динамические задачи](#)
- [Тепловые задачи](#)

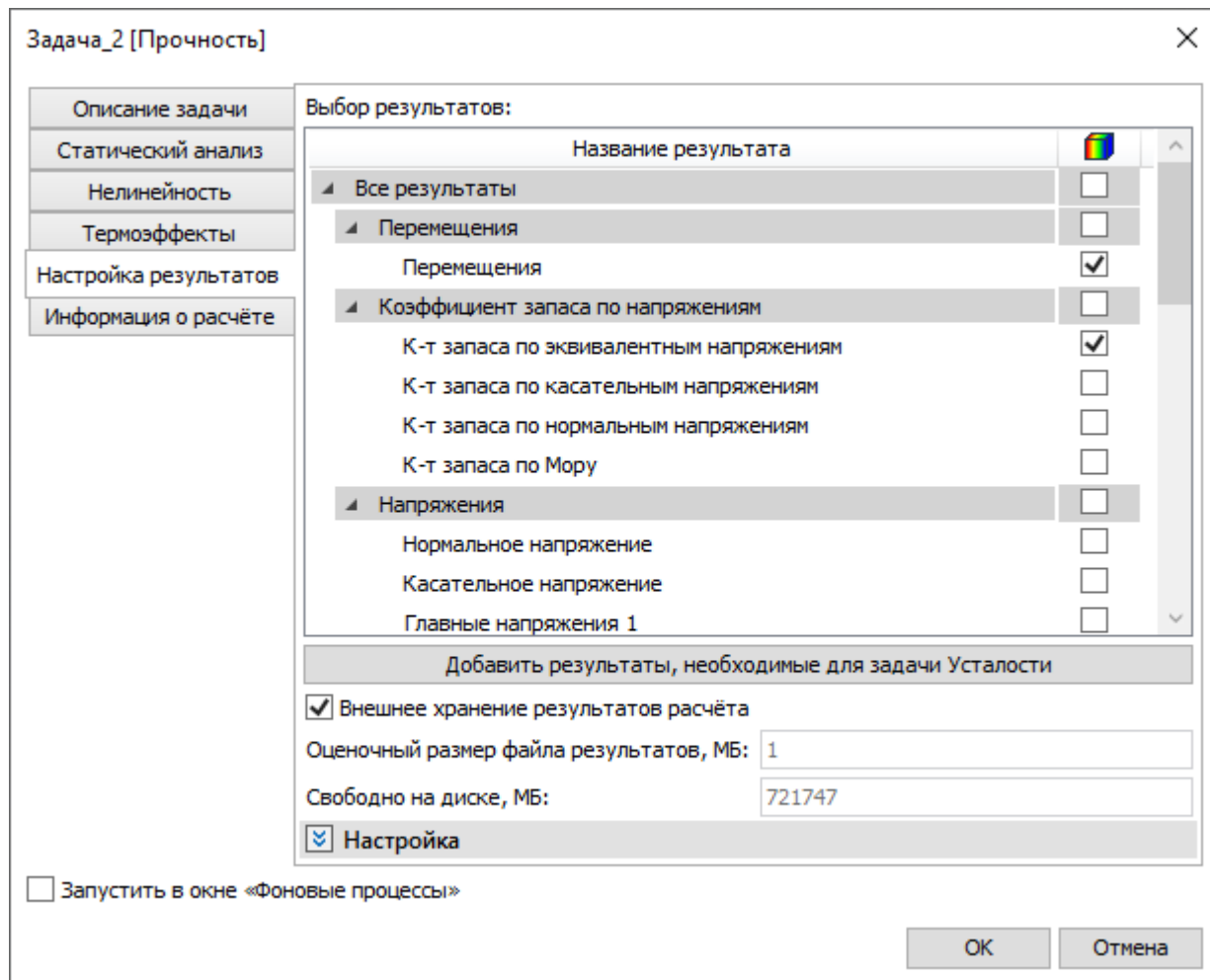
При запуске задачи на расчёт, происходит диагностика расчётной модели, и система может выдать предупреждение, что найдены незакреплённые элементы в задаче см. п. [Незакреплённые элементы](#).



4.1.1. НАСТРОЙКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТА

При инициировании команды **Расчёт**, автоматически открывается диалоговое окно на вкладке **Настройка результатов**. Система предлагает пользователю самому определить набор результатов, для этого необходимо активировать соответствующий тип результата в списке **Выбор результатов**. Например, в качестве результатов расчёта для статического анализа по умолчанию выбраны:

- **Перемещения;**
- **Коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям;**
- **Напряжения эквивалентные.** Это напряжение, под действием которого материал в условиях простого растяжения-сжатия оказывается в равноопасном состоянии с рассматриваемым сложным напряжённым состоянием.



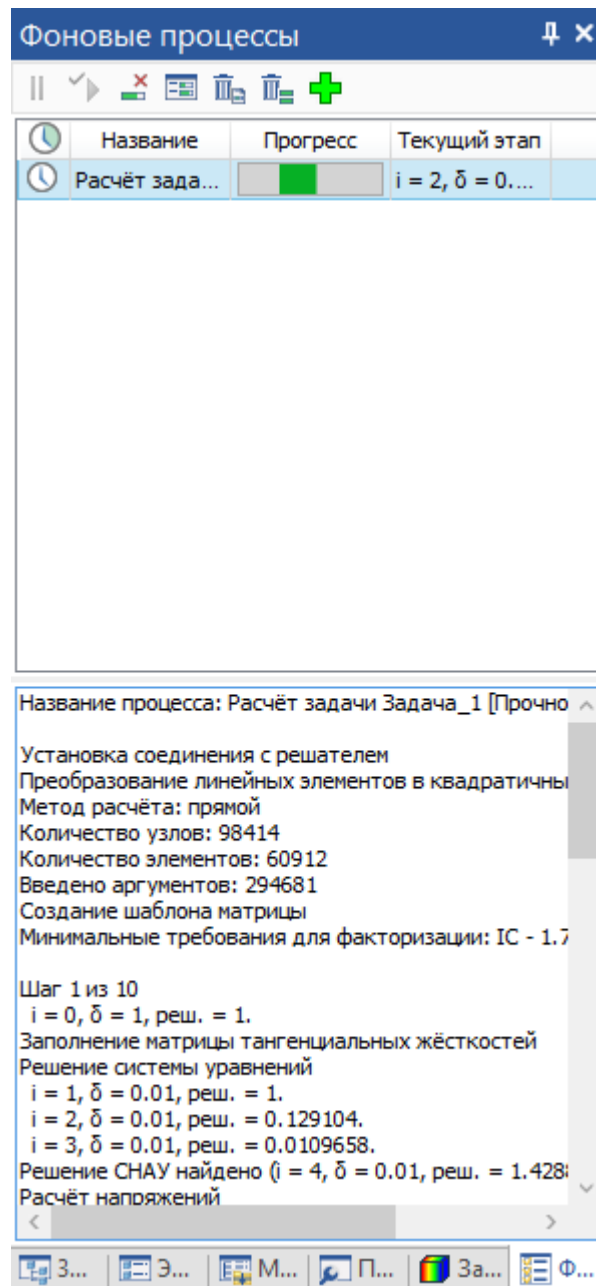
4.1.2. ОКНО «ФООНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ»

При активировании опции **Запустить в окне «Фоновые процессы»** [см. п. Расчёт задачи](#), диалог с отображением этапов расчёта будет скрыт, в правом нижнем углу будет лента с командами для управления процессом решения. С помощью которых можно:

-  - остановить расчёт;
-  - возобновить расчёт;
-  - отменить расчёт;
- открыть окно **Фоновые процессы**.



А информация о расчёте будет доступна в окне **Фоновые процессы**. Здесь представлена информация о всех задачах в рамках одного документа. При выборе задачи можно просмотреть более подробную информацию о ней. Например, метод расчёта, количество КЭ элементов, узлов, количество шагов необходимое для решения задачи и текущий этап.



4.1.3. ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ

В параметрах задачи вкладка **Описание задачи** является общей для всех типов задач. На данной закладке наследуется информация о типе и названии задачи. Дополнительно у пользователя существует возможность оставить поясняющий комментарий для данной задачи. Так же здесь можно отключить опцию по отображению диалогового окна параметры задачи при запуске на расчёт. Расчёт запустится с параметрами по умолчанию, а информацию о стадиях расчёта можно будет просматривать в окне [Фоновые процессы](#). Для того чтобы вернуть данное окно необходимо запустить параметры задачи из контекстного меню выбранной задачи в дереве окна **Задачи** и активировать опцию заново.

Задача_1 [Прочность]

Описание задачи

Статический анализ

Пластичность

Термоэффекты

Настройка результатов

Информация о расчёте

Общие

Имя

Тип

Для изменения типа используйте диалог редактирования задачи.

Комментарий

☒ Показывать этот диалог перед расчётом

☐ Запустить в окне «Фоновые процессы»

OK

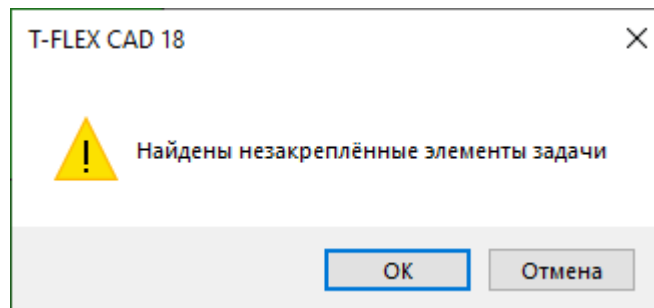
Отмена

4.1.4. НЕЗАКРЕПЛЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Вызов команды:

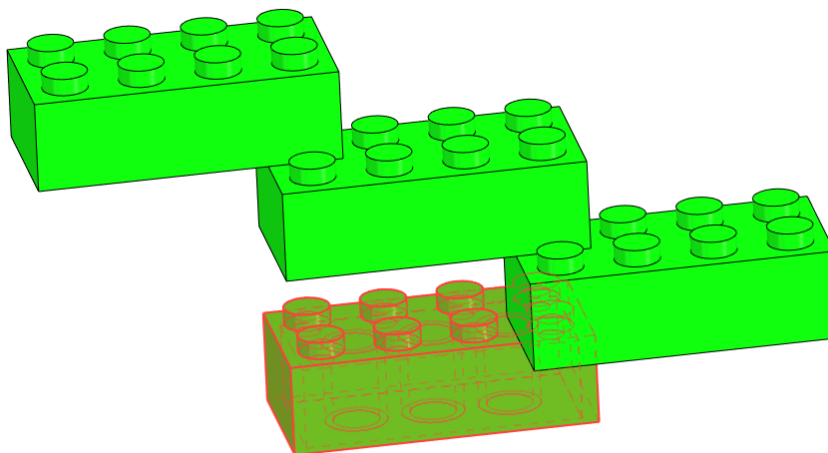
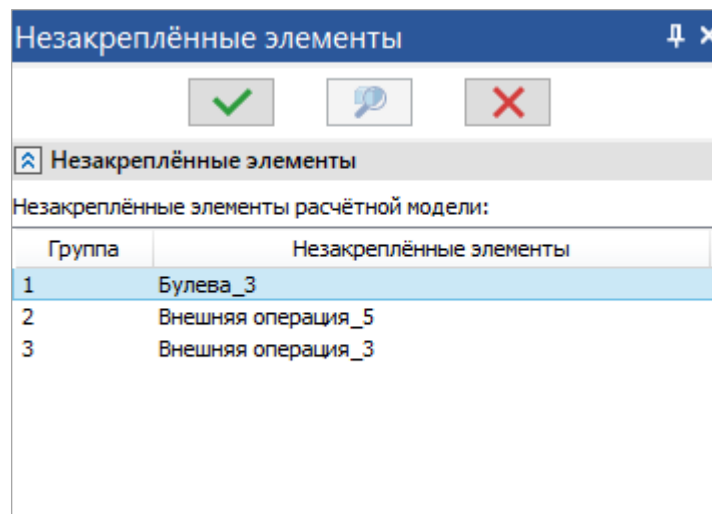
Пиктограмма	Лента
	Анализ > Диагностика модели > Незакрепленные элементы
Клавиатура	Текстовое меню
<3M3X>	Анализ > Диагностика модели > Незакрепленные элементы

При запуске задачи на расчёт см. п. [Расчёт задачи](#), происходит диагностика расчётной модели и система может выдать предупреждение, что найдены незакреплённые элементы в задаче.



Что бы определить эти элементы можно воспользоваться командой **Незакреплённые элементы**.

При инициировании команды **Незакреплённые элементы**, система выдаёт список из незакреплённых элементов расчётной модели. Если выбрать элемент в списке, то он подсвечивается другим цветом в основной сцене.



Применение команды «Незакреплённые элементы»

4.2. СТАТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ

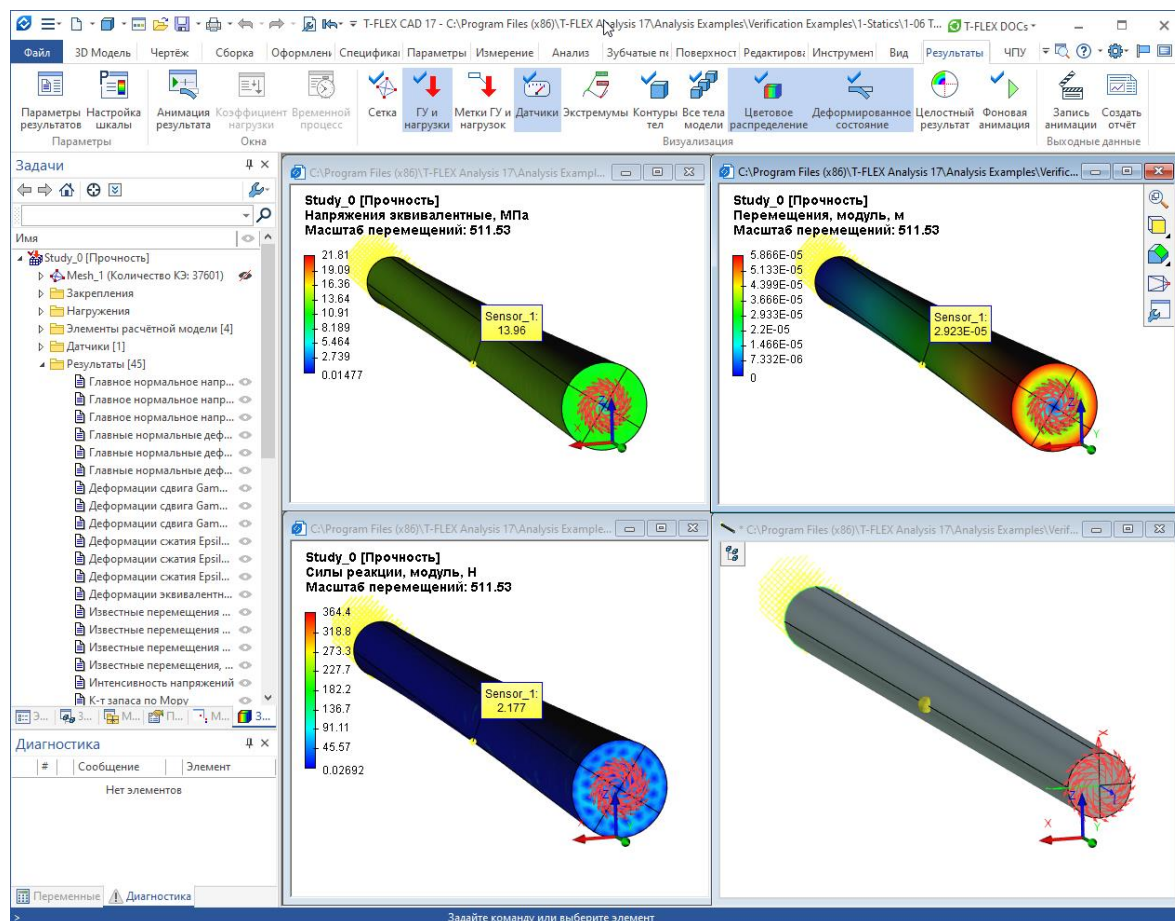
4.2.1. СТАТИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ

Основная цель статического прочностного анализа конструкций заключается в оценке напряжённого состояния конструкции, находящейся под действием не изменяющихся во времени (статических) силовых воздействий. Эта оценка напряжённого состояния выполняется обычно с целью проверки принятых конструкторских решений на условие прочности. Условие прочности в общем случае формулируется следующим образом:

Напряжения σ , возникающие в конструкции под действием приложенных к ней внешних сил, должны быть меньше допускаемых напряжений $[\sigma]$ для данного конструкционного материала с учётом коэффициента запаса $K_{\text{зап}}$ по прочности

$$\sigma K_{\text{зап}} \leq [\sigma]$$

Функционал статического анализа системы конечно-элементного моделирования T-FLEX Анализ предназначен для расчёта статического напряжённого состояния объёмных конструкций в среде T-FLEX CAD. Он работает непосредственно с трёхмерными моделями T-FLEX CAD и не требует отдельных построений для расчёта специальной трёхмерной модели.



Основными результатами статических расчётов являются:

- поля перемещений конструкции в расчётных точках конечно-элементной сетки;
- поля относительных деформаций;
- поля компонентов напряжений;
- энергия деформаций;
- узловые усилия.
- поля распределения коэффициента запаса по напряжениям по объёму конструкции;

Этих данных обычно достаточно для прогнозирования поведения конструкции и принятия решений для оптимизации геометрической формы изделия с целью обеспечения основных условий прочности изделий.

Подробнее о:

[Характеристики конструкционных материалов. Объёмное напряжённое состояние в точке. Теории прочности.](#)

[Физическая и геометрическая нелинейности. Понятия о Больших перемещениях, больших поворотах и больших деформациях. Метод Ньютона-Рафсона. Следящие нагрузки. Изменение жесткости при больших перемещениях.](#)

[Многошаговость, режим больших перемещений.](#)

Основные темы в этом разделе:

- [Этапы](#)
- [Параметры расчёта](#)
- [Оценка результатов](#)

4.2.1.1. ЭТАПЫ

Статический анализ модели осуществляется в несколько этапов. Перечислим необходимые для выполнения анализа элементы. Для осуществления статических расчётов необходимо выполнить следующие шаги.

Шаг 1. Создание объёмной твердотельной модели изделия

Перед началом работы в системе T-FLEX Анализа пользователь должен подготовить твердотельную трёхмерную модель, которую он будет рассчитывать. Твердотельная модель может быть построена в среде T-FLEX CAD или импортирована из других систем. Статические расчёты могут выполняться над одной или несколькими операциями-телами.

Шаг 2. Создание «Задачи»

«Задача» создается с помощью команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Задача > Создать задачу > Конечно-элементный анализ
Клавиатура	Текстовое меню
< 3MN >	Анализ > Новая задача > Конечно-элементный анализ

Для осуществления статического расчёта при создании задачи пользователь указывает её тип – **«Статическая прочность»** в окне параметров команды. Если в сцене присутствует несколько тел, необходимо выбрать одно или несколько соприкасающихся тел, для которых будет создана новая задача.

Шаг 3. Задание материала

Одним из обязательных элементов любого расчёта является материал задачи. Подробнее о способах задания материалов для расчёта приводится в соответствующем разделе описания препроцессора [Задание материала](#).

Шаг 4. Создание сетки

Для осуществления конечно-элементного моделирования необходимо построение конечно-элементной сетки. По умолчанию, команда построения такой сетки инициируется автоматически при создании задачи. Пользователь может также создать сетку, используя команду T-FLEX Анализа [Анализ > Сетка](#). При создании сетки пользователь определяет различные параметры дискретизации твердотельной модели. Конечно-элементная сетка существенным образом может влиять на качество получаемых решений в случае сложной пространственной конфигурации изделий. Подробно параметры управления генерацией конечно-элементной сетки рассматриваются в соответствующем разделе описания препроцессора T-FLEX Анализа.

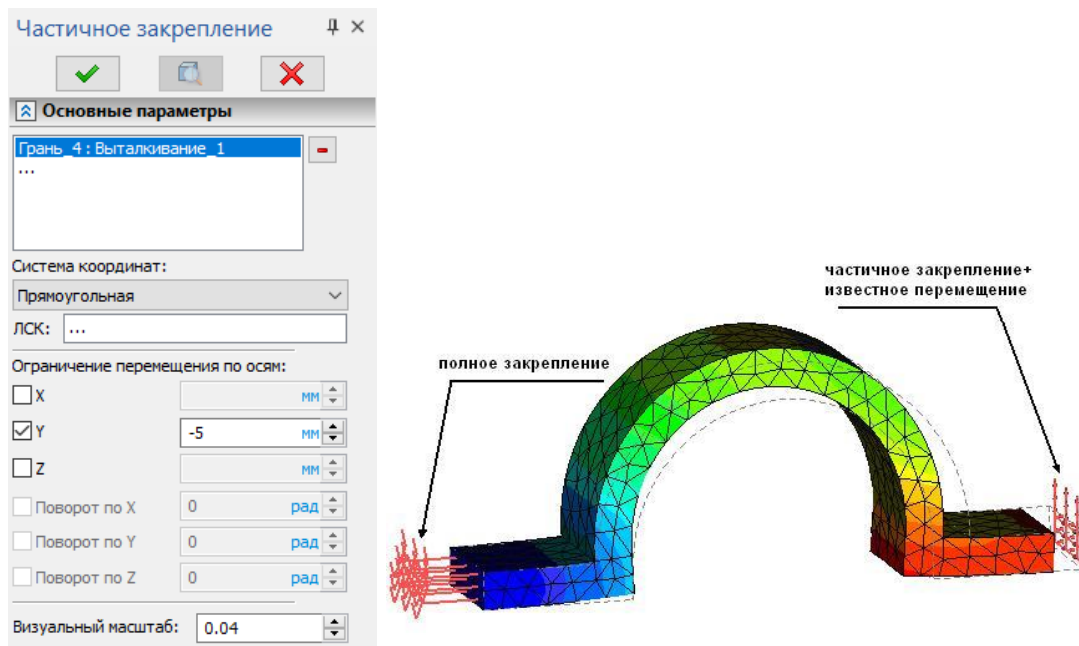
Шаг 5. Наложение граничных условий

В статическом анализе роль граничных условий выполняют закрепления и приложенные к системе внешние нагрузки. Результат анализа напрямую зависит от заданных нагрузок и закреплений. Задание закреплений является обязательным условием выполнения корректного статического расчёта. Суммарно наложенные на перемещение тела ограничения должны удовлетворять следующему условию:

Для обеспечения статического анализа модель должна иметь закрепление, исключающее её свободное перемещение в пространстве как твёрдого тела. Невыполнение этого условия приведёт к неверным результатам конечно-элементного анализа или завершению вычислительного процесса.

Для задания закреплений в T-FLEX Анализ предусмотрены две команды: [«Полное закрепление»](#) и [«Частичное закрепление»](#). Команда **«Полное закрепление»** определяет для выбранного элемента модели полностью неподвижное (фиксированное) состояние. Команда **«Частичное закрепление»** позволяет ограничить перемещение элементов модели избирательно по осям выбранной системы координат.

Команда **«Частичное закрепление»** обладает ещё одним полезным функционалом. Пользователь может задать для конструкции известное значение перемещения, например, известную предварительную деформацию конструкции. Для этого в окне параметров команды **«Частичное закрепление»** необходимо указать значение фиксированного перемещения элемента модели по какой-либо из координатных осей. Статический анализ будет выполнен с учётом этого условия. Отметим, что в этом случае, возможно осуществление статического расчёта без наложения дополнительных (силовых) нагружений. Таким образом можно оценить напряжения, возникающие в деформированной конструкции, если известны количественные значения этих деформаций (перемещений).



Пример использования известных перемещений

Для задания нагрузок в T-FLEX Анализ предусмотрен набор специализированных команд, позволяющих задать основные виды нагрузок («Сила», «Давление», «Вращение», «Ускорение», «Цилиндрическая нагрузка», «Крутящий момент»).

Отметим ещё одну функциональную возможность статических расчётов T-FLEX Анализа. Пользователь может задать расчёт напряжённого состояния конструкции, возникающий под действием не только различных силовых, но и температурных нагрузок – задача «термоупругости». Известно, что под действием температур конструкционные материалы испытывают линейные деформации - расширяются при нагревании и сужаются при охлаждении. Изменение размеров тела приводит к деформациям и появлению напряжённого состояния. T-FLEX Анализ позволяет учесть влияние перепада температур. Задать температуру для учёта неравномерных температурных полей можно с помощью команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия > Температура > Температура
Клавиатура	Текстовое меню
<ЗТТ>	Анализ > Тепловая нагрузка > Температура

Вместе с тем, чтобы температурные нагрузки учитывались в статическом расчёте, необходимо включить режим «Учитывать термоэффекты» на закладке **Термоупругость** диалога параметров статической задачи. Также понадобится определить температуру «нулевых» деформаций, соответствующую ненапряжённому состоянию модели и определить рабочее температурное поле (подробнее в разделе «Настройки процессора линейной статики»).

Шаг 6. Выполнение расчёта

После того как для модели была построена конечно-элементная сетка и наложены граничные условия (закрепления и нагрузки), можно запустить процесс формирования и решения линейных алгебраических уравнений статического анализа. Для запуска расчёта активной задачи можно использовать команду:

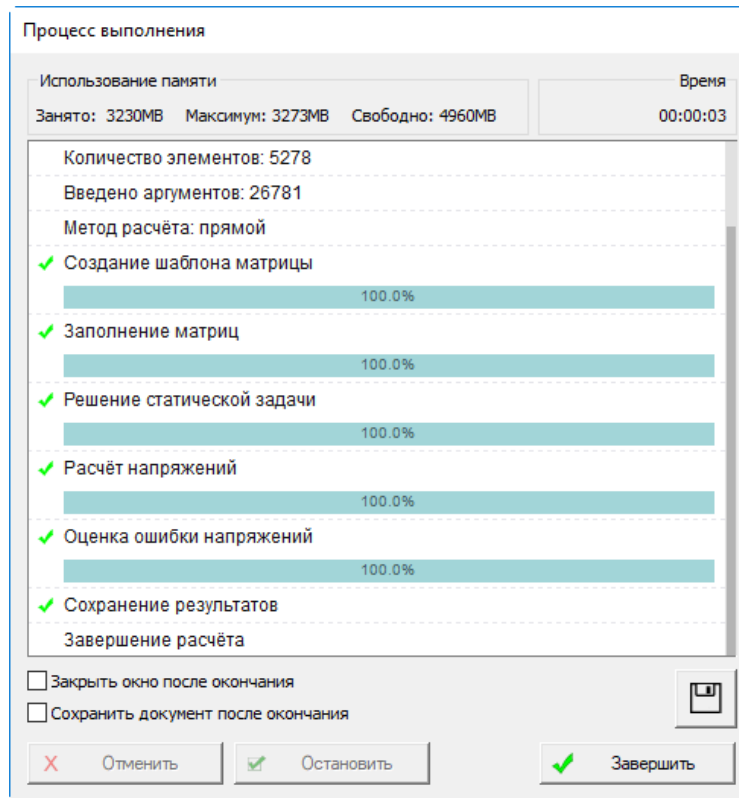
Пиктограмма	Лента
	Анализ > Расчёт > Расчёт
Клавиатура	Текстовое меню
<ЗМУ>	Анализ > Расчёт

Расчёт выбранной задачи можно также запустить из контекстного меню по нажатию  на имени выбранной задачи в дереве задач.

По умолчанию, перед расчётом открывается диалог «**Параметров задачи**» статического анализа. В данном диалоге пользователь может установить требуемые режимы и настройки расчёта, а также задать отображаемые в дереве задач типы результатов. Подробное описание назначения настроек задачи рассмотрено далее в разделе «**Настройки процессора линейной статики**». Большинство режимов выбираются процессором автоматически в зависимости от размерности решаемой задачи и наложенных граничных условий.

Нажатие кнопки **ОК** диалога параметров задачи запускает процесс формирования и решения систем линейных алгебраических уравнений. Этапы решения уравнений и дополнительная справочная информация отображаются в специальном информационном окне. Нажатие кнопки **Заккрыть** в информационном окне приводит к прекращению расчёта. Флажок «**Заккрыть окно после окончания расчёта**» приведёт к автоматическому закрытию окна отображения этапов расчёта после завершения решения уравнений.

Флажок «**Сохранить документ после окончания расчёта**» приведёт к автоматическому сохранению результатов расчёта и всех изменённых данных рабочего документа.



В информационное окно выводятся следующие справочные данные:

Количество узлов – количество узлов расчётной конечно-элементной сетки.

Количество элементов – количество тетраэдров в конечно-элементной сетке.

Введено аргументов – количество уравнений линейной статики.

Метод расчёта – используемый для решения уравнений алгоритм. Виды возможных алгоритмов и их использование описаны в разделе «Настройки процессора линейной статики».

Решение СЛАУ найдено – символизирует о том, что процесс решения завершился успешно. В скобках указывается дополнительная информация: **iter** – количество выполненных итераций (при использовании итерационного метода решения СЛАУ), **tol** – достигнутая в результате решения уравнений погрешность.

Этапы расчёта также отображаются наглядно в виде динамически меняющейся шкалы. В группе **Использование памяти** отображается текущее состояние памяти и по нему можно судить о пригодности используемого компьютера для решения больших задач. Поле «**Занято**» показывает, сколько оперативной памяти занято в текущий момент (включая своп). Поле «**Максимум**» – пиковое значение, достигнутое за время решения. Поле «**Свободно**» – размер свободной физической оперативной памяти. Если значение упало до нуля, тогда используется своп. Кроме того, показывается время, прошедшее с момента начала расчёта и процент решения текущей итерации. После завершения расчёта пользователь должен закрыть дополнительное окно (если не включен режим автоматического закрытия).

Шаг 7. Анализ результатов статического расчёта

После выполнения расчёта, в дереве задач появляется новая папка «Результаты». По умолчанию в ней отображаются результаты, определённые в закладке «Результаты» диалога

«**Параметры задачи**». Всего по результатам статического анализа пользователю доступны 38 результатов, сгруппированные в 6 групп.

Группа «Перемещения». Включает в себя следующие результаты:

- Δ_x - компонента вектора узловых перемещений конечно-элементной сетки в направлении оси OX глобальной системы координат
- Δ_y - компонента вектора узловых перемещений конечно-элементной сетки в направлении оси OY глобальной системы координат
- Δ_z - компонента вектора узловых перемещений конечно-элементной сетки в направлении оси OZ глобальной системы координат

Перемещения, модуль - значение абсолютных перемещений модели в узлах, определяемое для каждого узла по формуле: $\Delta = (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)^{1/2}$, где x, y, z - компоненты вектора перемещений i -го узла конечно-элементной сетки.

Группа «Напряжения» включает в себя результаты:

- $\sigma_{\text{экв}}$ - относительные эквивалентные напряжения, вычисляемые из компонентов тензора напряжений по формуле:

$$\sigma_{\text{экв}} = (((\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2))/2)^{1/2}$$

- σ_x - напряжение в направлении оси OX глобальной системы координат
- σ_y - напряжение в направлении оси OY глобальной системы координат
- σ_z - напряжение в направлении оси OZ глобальной системы координат
- τ_{xy} - напряжение в направлении оси OY глобальной системы координат, действующее на площадке с нормалью параллельной оси OX
- τ_{xz} - напряжение в направлении оси OZ глобальной системы координат, действующее на площадке с нормалью параллельной оси OX
- τ_{yz} - напряжение в направлении оси OZ глобальной системы координат, действующее на площадке с нормалью параллельной оси OY

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - главные напряжения ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$).

Интенсивность напряжений определяется следующим образом:

$$\sigma_1 = \max(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|)$$

Группа «Коэффициент запаса по напряжениям» включает в себя результаты:

Коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям представляет собой отношение допускаемых напряжений $[\sigma]$ для данного конструкционного материала к эквивалентным напряжениям:

$$K = [\sigma] / \sigma_{\text{экв}}$$

Коэффициент запаса по касательным напряжениям вычисляется следующим образом:

$$K_\tau = [\sigma] / 2\tau_{\text{max}} \tau_{\text{max}} = (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot 0,5 ;$$

Коэффициент запаса по нормальным напряжениям вычисляется следующим образом:

$$K_n = [\sigma]/\sigma_1;$$

Допускаемое напряжение материала задаётся в характеристиках материала в стандартной библиотеке T-FLEX CAD или в соответствующем поле библиотеки материалов задачи. В качестве допускаемого напряжения для пластичных материалов выбирается предел текучести.

Группа «Деформации» включает в себя результаты:

$\varepsilon_{\text{экв}}$ - относительные эквивалентные деформации, вычисляемые из компонентов тензора деформаций по формуле:

$$\varepsilon_{eq} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{3(\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2)}{2} + \frac{3(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{xz}^2)}{4}}$$

ε_x - относительная линейная деформация в направлении оси OX глобальной системы координат

ε_y - относительная линейная деформация в направлении оси OY глобальной системы координат

ε_z - относительная линейная деформация в направлении оси OZ глобальной системы координат

γ_{xy} - угловая деформация в плоскости OXY

γ_{xz} - угловая деформация в плоскости OXZ

γ_{yz} - угловая деформация в плоскости OYZ

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ - главные деформации ($\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3$).

Плотность энергии деформации. Результат отображает распределение энергии деформаций по объёму модели.

Группа «Реакции». Результат отображает усилия, возникающие в опорных (закрепленных) узлах конечно-элементной модели.

F_x - сила реакции в направлении оси OX глобальной системы координат

F_y - сила реакции в направлении оси OY глобальной системы координат

F_z - сила реакции в направлении оси OZ глобальной системы координат

Сила реакции (модуль) значение абсолютных усилий модели в узлах, определяемое как $F_{mi} = (F_{xi}^2 + F_{yi}^2 + F_{zi}^2)^{1/2}$ для каждого узла, где F_x - x-компонента, F_y - y-компонента, F_z - z-компонента вектора усилий i-го узла конечно-элементной сетки.

Группа «Нагрузки» отображает приложенные к конечно-элементной модели и приведённые к узлам нагрузки. Этот тип данных представляет собой справочную информацию.

Температура. Результат отображает распределение поля температур по объёму модели.

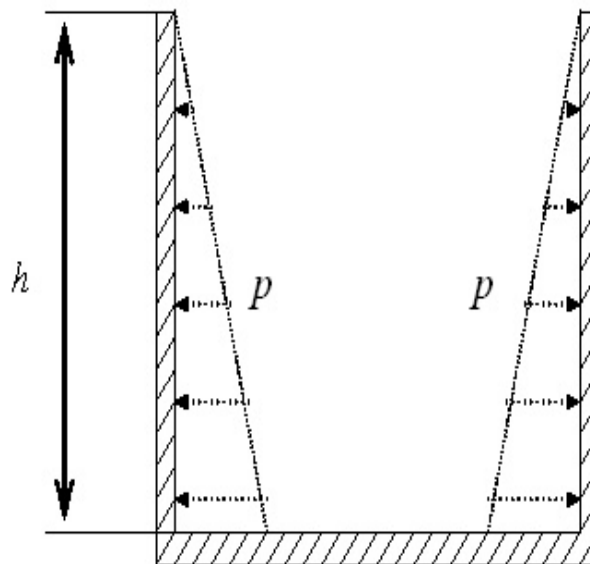
4.2.1.2. ПАРАМЕТРЫ РАСЧЁТА

Параметры задачи, определённые пользователем, сохраняются при сохранении документа, а также наследуются при копировании задачи. Основное назначение параметров задачи –

задание требуемых для работы процессора режимов, списков отображаемых после расчёта в дереве задач результатов, а также хранение описательных атрибутов задачи, таких как имя или комментарий. Диалог параметров задачи статического анализа содержит пять закладок.

Описание задачи и Статический анализ

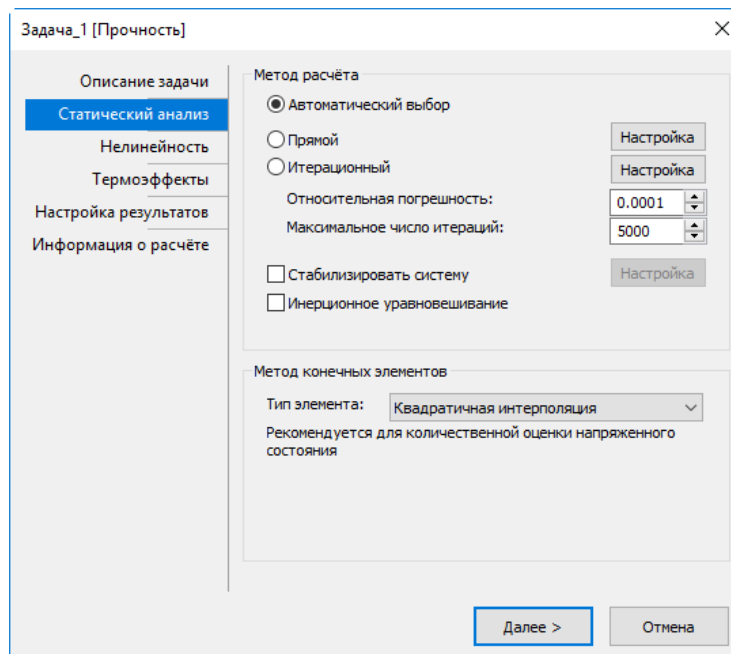
Закладка **Описание задачи** позволяет определить описательные параметры текущей задачи.



В поле «Имя» пользователь может изменить наименование задачи, присвоенное системой по умолчанию при её создании. Это имя будет в дальнейшем отражаться в дереве задач, в окне результатов и в отчёте. Элемент управления «Тип» позволяет устанавливать тип задачи. Отметим, что T-FLEX Анализ поддерживает изменение типа уже существующей задачи на другой, из числа доступных пользователю типов задач. Например, пользователь может создать задачу типа «Статическая прочность», а затем изменить её тип, например, на «Устойчивость» или «Частотный анализ».

Текстовое поле «Комментарий» позволяет пользователю занести произвольную текстовую информацию, относящуюся к текущей задаче. Эта информация будет в дальнейшем использоваться при генерации отчёта по результатам решения задачи.

Закладка **Статический анализ** позволяет задать параметры процессора для решения уравнений линейной статики. Элементы управления в группе «Метод расчёта» позволяют пользователю определить способы решения систем алгебраических уравнений линейной статики.



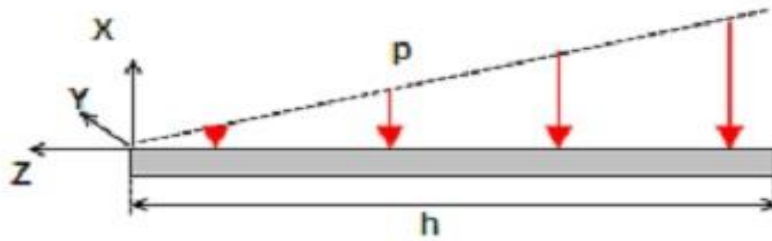
Прямой метод. Системы уравнений решаются методом Гаусса, с вычислением треугольного разложения матрицы жесткости. Данный метод эффективен для решения систем уравнений, построенных на основе линейного конечного элемента. В некоторых случаях использование прямых методов оправдано и при расчёте систем на квадратичных конечных элементах. Его можно использовать вместо итерационного, если итерационный алгоритм не сходится к устойчивому решению, или скорость сходимости очень мала (количество итераций составляет несколько тысяч). Такая ситуация может наблюдаться на «тонких» задачах (модель плоская или вытянутая), а также при большом количестве конечных элементов, сильно отличающихся от равносторонних (когда отношение длин ребер конечных элементов составляет сотни или тысячи).

Итерационный. Системы уравнений решаются итерационными методами. Этот метод используется по умолчанию для решения систем уравнений, формируемых на основе квадратичного конечного элемента. Для итерационного метода можно установить следующие два параметра: относительная погрешность и максимальное число итераций.

Относительная погрешность – погрешность получаемого итерационным методом решения. Чем меньше установленная погрешность, тем большее количество шагов (итераций) необходимо.

Максимальное число итераций – предельное количество итераций, по достижении которого решение систем уравнений итерационным методом прекращается, даже если требуемая точность решения не достигнута.

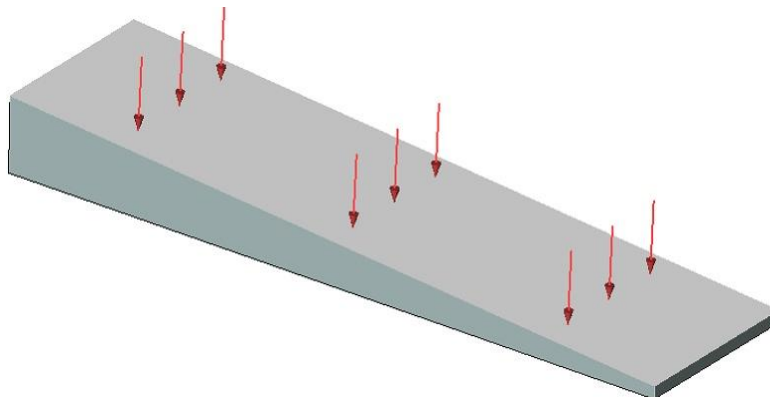
Пользователь может также управлять работой с внешней (дисковой) памятью системы при решении СЛАУ прямым или итерационным методом (**Настройка**).



Существует три варианта использования дополнительной дисковой памяти: *автоматически, запрещено, принудительно*. Использование дополнительной дисковой памяти позволяет сохранить разложение матрицы жёсткости. Использовать дополнительную дисковую память для решения систем уравнений необходимо только в том случае, если память, необходимая для хранения промежуточных матриц, превышает объём оперативной памяти вычислительной системы. Отметим, также, что время решения задач большой размерности с использованием внешней памяти может быть значительным из-за большого количества операций последовательного чтения-сохранения данных.

Для хранения промежуточных матриц могут понадобиться значительные объёмы дисковой памяти (несколько Гбайт). Проверьте наличие достаточного объёма свободного места на диске при решении задач большой размерности с использованием внешней памяти.

Если пользователь отключил возможность использования дисковой памяти, но порядок решаемой системы уравнений велик, и память, необходимая для хранения разложения матрицы приближается к 2 Гбайт (для Windows 32-bit), возможен аварийный выход из вычислительного процесса и прекращение решения задачи.



В настройках итерационного метода пользователь может также выбрать "**Предобуславливатель**" для системы уравнений. *Предобуславливанием* называется определенная численная процедура, позволяющая ускорить процесс решения системы уравнений итерационным методом. В T-FLEX Анализе доступны 4-е вида предобуславливателей:

- **Комбинированный** (по умолчанию) - обычно обеспечивает самое быстрое решение с минимальным числом итераций, но при этом и самые большие накладные расходы по оперативной памяти для итерационного метода.

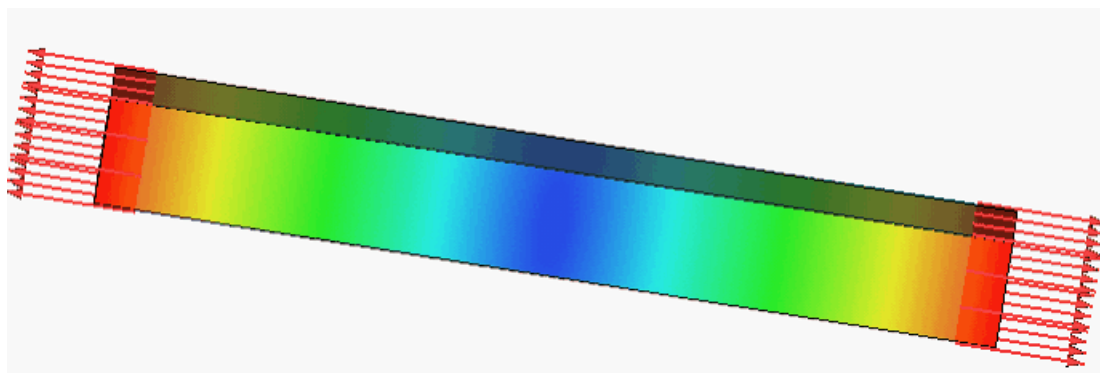
- **Неполное разложение** - затраты по памяти не превышают удвоенного размера памяти, занятого матрицей жесткости, количество итераций уменьшается, но не так эффективно, как в случае с использованием Комбинированного предобуславливателя.
- **Диагональный и единичный** - обеспечивают минимальные требования к дополнительной оперативной памяти, но требуют большого количества итераций для решения, обычно редко применяются в практических задачах.

Метод конечных элементов. По умолчанию, все расчёты осуществляются с использованием квадратичной аппроксимации перемещений, независимо от того, какая сетка конечных элементов была построена для модели. Если пользователь заинтересован в получении качественных результатов, т.е. его интересуют лишь относительные распределения полей напряжений на достаточно подробной сетке, можно использовать расчёт линейным элементом, который осуществляется намного быстрее, чем квадратичным. Гибридный элемент используется при расчёте моделей, состоящих одновременно из линейных пластинчатых и объёмных элементов (т.н. «гибридных моделей»), на статическую прочность.

Расчёт линейным тетраэдральным элементом обеспечивает недостаточную точность количественных результатов. Максимумы перемещений и напряжений при расчёте линейным тетраэдральным конечным элементом значительно меньше значений, получаемых при расчёте более точными методами. Настоятельно рекомендуется для количественной оценки использовать расчёт квадратичным элементом (режим по умолчанию).

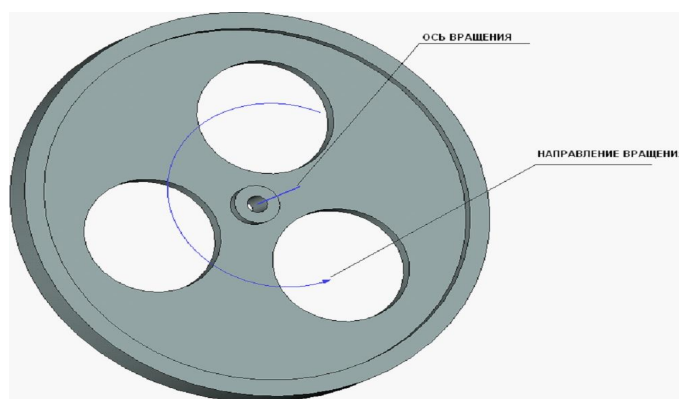
Стабилизировать систему. Данный режим позволяет осуществлять расчет нефиксированных в пространстве систем, уравниваемых силами. Обычно, если в конечно-элементных расчетах используется модель, не закрепленная в пространстве, т.е. имеющая возможность перемещаться в пространстве как целое, то её конечно-элементный статический анализ не возможен. Опция «Стабилизировать систему» позволяет преодолеть это ограничение в случае, если система уравнивается силами в пространстве. Принцип стабилизации следующий: на все грани модели накладываются эластичные элементы, жесткость которых достаточно мала по сравнению с жесткостью модели и не оказывает существенного влияния на распределение деформаций (а, следовательно, и напряжений).

При этом эластичные элементы предотвращают перемещение модели в пространстве как целого и тем самым делают матрицу жесткости определенной, что позволяет решить конечно-элементную задачу. Следует учесть, что во избежание больших перемещений конечно-элементной модели приложенная система сил должна быть уравнивающейся. Если все же происходит большое перемещение модели в пространстве как целого, можно воспользоваться дополнительными частичными закреплениями грани или ребра во избежание вращения модели. При этом следует учитывать, что дополнительные закрепления должны быть выбраны так, чтобы не предвосхищать способ деформирования тела в условиях данной системы сил (не вызывать дополнительных сил реакции, например, ограничивать перемещение в тех направлениях, по которым составляющие сил равны нулю либо по осям симметрии).



Расчет незакрепленной модели, уравниваемой силами

Кнопка **Настройка**, расположенная рядом с флагом «**Стабилизировать систему**» позволяет настроить величину дополнительной жесткости, в Н/м, приемлемой в условиях данной задачи.



Термоэффекты

Закладка **Термоэффекты** позволяет определить режимы учёта термических нагрузок.

Задача_1 [Прочность]

Описание задачи

Статический анализ

Нелинейность

Термозффекты

Настройка результатов

Информация о расчёте

☐ Учитывать термоупругость

☒ Учитывать изменение физических свойств от температуры

Ненапряжённое состояние

Температура нулевых деформаций: 298

Температурные поля

☒ Равномерная температура: 298

☐ Использовать заданные температуры

Температуры должны быть заданы с помощью команды "Температура" тепловых нагрузок.

☐ Использовать результаты теплового анализа:

Время:

Далее >

Отмена

Учитывать термоупругость. Включает режим расчёта нагрузок, возникающих в конструкции из-за сил линейного расширения под действием приложенной к телу температуры.

Учитывать изменение физических свойств от температуры. Включает режим учета параметров материалов задачи от температуры, заданных в свойствах каждого материала.

Температура нулевых деформаций – начальная температура тела, при которой температурные деформации отсутствуют, и отсутствуют напряжения, вызванные разностью температур. Пользователь может задать значение температуры в одной из принятых систем измерения температур: К – в Кельвинах; С – по Цельсию; F- по Фаренгейту.

В зоне «**Температурные поля**» определяется способ задания тепловой нагрузки.

Равномерная температура – в выбранной системе единиц задаётся значение однородного температурного поля, распространяющегося на все тела задачи.

Использовать заданные температуры – в статическом расчёте учитываются температурные нагружения, заданные при помощи команды «Анализ > Тепловые нагрузки > Температура».

Использовать результаты теплового анализа – для задания температурного нагружения используются результаты решения имеющейся задачи теплового анализа. В выпадающем списке нужно выбрать имя рассчитанной задачи теплового анализа и (если необходимо) время, которому должен соответствовать результат. Необходимо учитывать, что для использования в качестве исходных температур результатов теплового расчёта нужно соблюсти определенные условия.

Условие первое. Идентичность конечно-элементных сеток статического и теплового расчётов. Наиболее простым способом достижения такой идентичности является использование команды «Копия», доступной из контекстного меню. Последовательность действий может быть, например, следующей:

- 1) создаём задачу типа «**Установившиеся тепловые процессы**», генерируем сетку, определяем граничные условия, считаем;

- 2) используя команду **«Копия»**, создаём копию задачи;
- 3) переходим в редактирование задачи и меняем тип задачи на **«Статическая прочность»**.

В результате получаем две задачи разного типа с одинаковыми конечно-элементными сетками.

Условие второе. В обеих задачах режим **«Производить расчёт линейным элементом»** на закладке **«Расчёт»** диалога параметров задачи должен иметь одинаковую установку. Например, если тепловой расчёт осуществлялся линейным элементом, то и статический расчёт с использованием результатов теплового расчёта, можно осуществить только линейным элементом.

Результаты

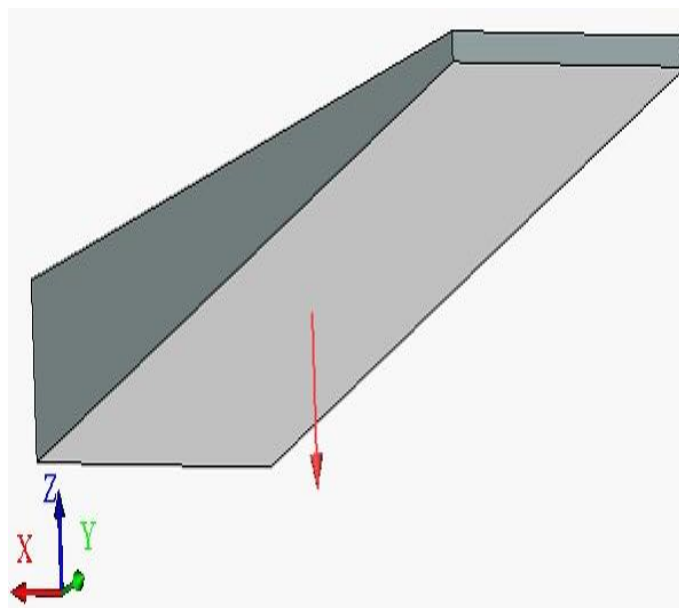
Закладка **Результаты** позволяет определить типы результатов, отображаемых в дереве задач после завершения расчёта.

Сохранять результаты расчёта в файле – включает режим, при котором все результаты расчёта сохраняются в файле вместе с моделью. Это позволяет анализировать результаты ранее посчитанной и сохранённой задачи без необходимости заново выполнять расчёт. Следует иметь в виду, что сохранение результатов расчёта в документе приводит к увеличению размера файла документа - ориентировочно на 4,5-5 Мбайт на сто тысяч степеней свободы.

Нелинейность

Закладка **Нелинейность** позволяет проводить статический расчет с учетом больших перемещений.

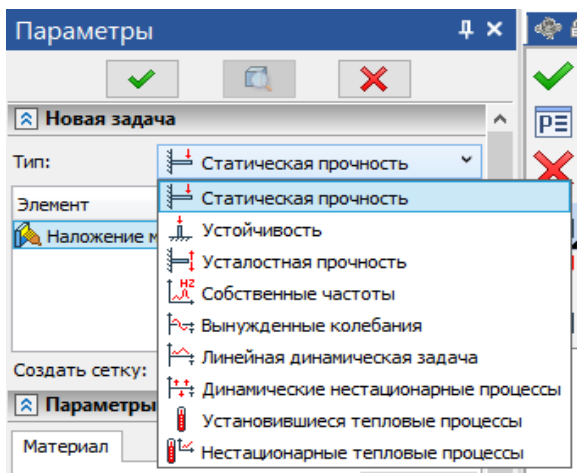
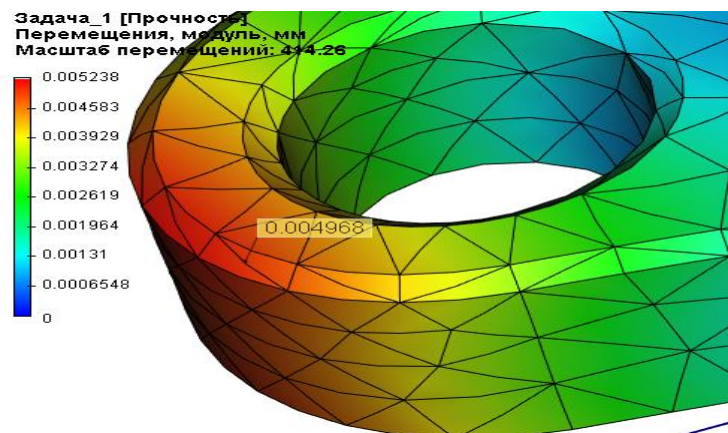
На практике встречаются ситуации, в которых под воздействием внешних нагрузок перемещения отдельных точек конструкции достигают значительных величин. Такие задачи особенно актуальны в авиационной и космической технике, при конструировании радиотелескопов, градирен и других тонкостенных конструкций. В таких случаях следует учитывать нелинейные эффекты, так как предположения, на которых основан линейный анализ, нарушаются.



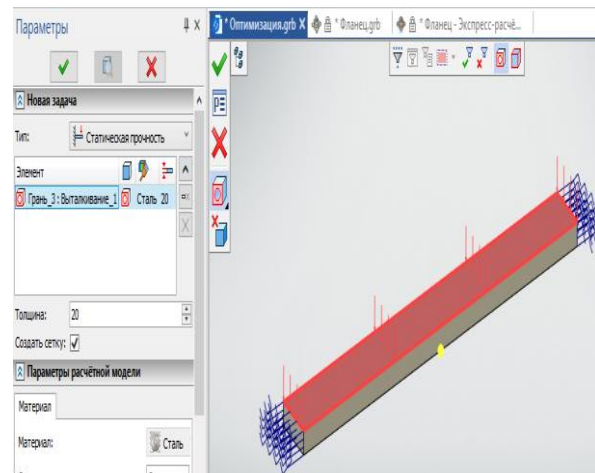
Опцию «Учет изменения жесткости при больших перемещениях» следует активировать в том случае, когда нарушается хотя бы одно из следующих предположений линейного анализа:

- 1) Вызываемые деформации достаточно малы, вследствие чего можно игнорировать изменения жесткости, вызванные нагрузкой;
- 2) В процессе приложения нагрузки граничные условия не меняют амплитуды, направления и распределение.

Например, линейный расчет детали типа спирали под действием нагрузки на торце дает погрешность примерно 30% по сравнению с нелинейным расчетом. Такое различие результатов возникает вследствие предположения малости перемещений в линейном анализе.



Линейный расчет



Нелинейный расчет

Элементы управления в группе «Геометрическая нелинейность» позволяют настроить процесс решения геометрически нелинейных задач.

Для решения таких задач шаговый нелинейный решатель организует процесс пошагового нагружения конструкции и обеспечивает решение линеаризованной системы уравнений на каждом шаге для текущего приращения вектора нагрузок, сформированного для конкретного нагружения.

Количество шагов. Позволяет установить количество шагов, в течение которых нагрузка будет изменяться от нуля до установленного значения. Теоретически все решения можно найти за один шаг для полной действующей нагрузки. Однако возникает возможность множества решения и при этом может быть найдено решение, не имеющее физического смысла. В таких случаях целесообразно задавать нагрузку отдельными приращениями и получать нелинейное решение для каждого приращения. С вычислительной точки зрения это часто экономично, поскольку эффекты нелинейности на каждом шаге становятся меньше. Если приращения нагрузки достаточно малы по величине, то каждое решение в приращениях с достаточной степенью точности может быть найдено за один шаг. По умолчанию определено 10 шагов.

Обновление направления нагрузок позволяет учитывать изменение вектора нагрузок в процессе нагружения в соответствии с деформированной геометрией модели.

Метод решения. По умолчанию используется метод Ньютона-Рафсона решения системы нелинейных уравнений.

На каждом шаге приложения нагрузки решение системы линейных алгебраических уравнений продолжается до тех пор, пока **относительная погрешность** между соседними решениями не станет меньше установленной величины.

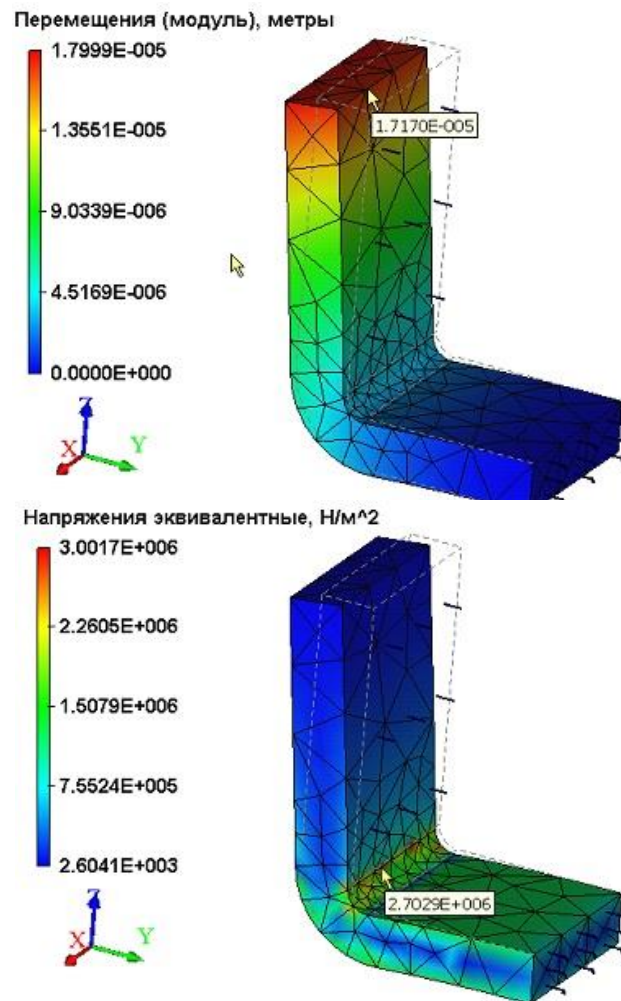
Если **количество итераций** достигает величины, большей установленной, то происходит завершение расчета.

4.2.1.3. ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

После успешного расчёта задачи необходимо проанализировать полученные результаты, чтобы сделать заключение о вероятной статической прочности конструкции. В большинстве случаев для этого достаточно трёх типов результатов – перемещений, напряжений и коэффициента запаса по напряжениям. Примерная последовательность действий по оценке результатов конечно-элементного моделирования:

Анализ перемещений

В дереве задач из контекстного меню по команде «Открыть» или «Открыть в новом окне» открываем результат «**Перемещения, модуль**». Визуально оцениваем характер и амплитуды деформированного состояния конструкции. Перемещения необходимо контролировать для того чтобы проверить правильность приложенных нагрузок и убедиться, что в результате решения систем уравнений было найдено корректное решение. Если результаты анализа перемещений показывают, что решение задачи найдено и характер деформированного состояния конструкции соответствует ожидаемому, можно перейти к следующему шагу.



Эпюры модуля перемещений и эквивалентных напряжений

Анализ напряжений

Открываем результат «**Напряжения эквивалентные**». Визуально оцениваем характер рассчитанных эквивалентных напряжений. Градиенты напряжений отображаются цветовыми переходами. Шкала цветовых значений, отображаемая в окне просмотра результатов расчёта, позволяет определить ориентировочное значение отображаемого результата. Если навести курсор мыши на интересующее место модели, то появляется всплывающая подсказка, содержащая интерполированное по ближайшим узлам значение отображаемой величины непосредственно под курсором мыши. По результату «Эквивалентные напряжения» пользователь может сделать следующие заключения:

- 1) Определить, в каких местах и элементах конструкции возникают наибольшие напряжения;
- 2) Сравнивая максимумы расчётных напряжений с допускаемыми для материала модели напряжениями, можно оценить степень прочности конструкции.

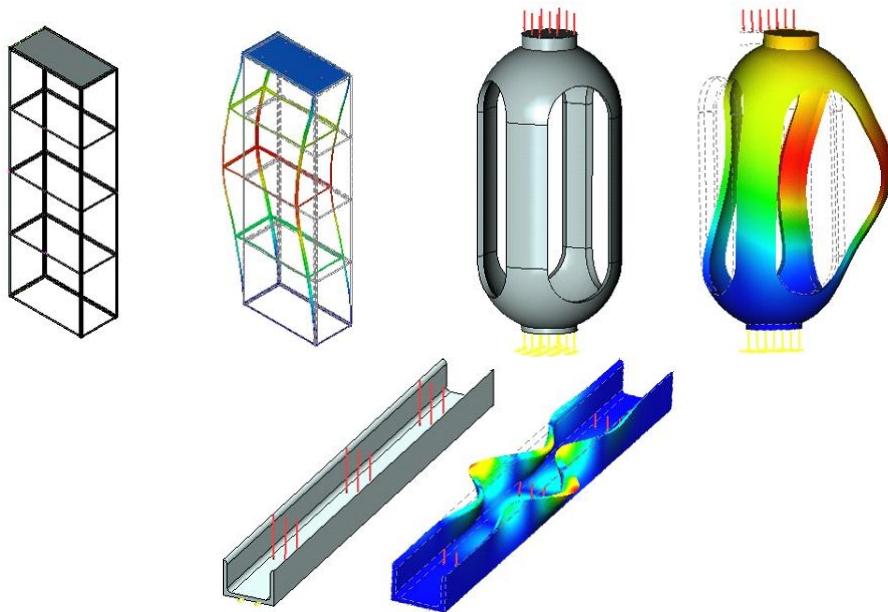
Оценка запаса прочности

Открываем результат «**Коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям**». Данный результат позволяет оценить количественное отношение допускаемых напряжений, указанных

в характеристиках материала к рассчитанным эквивалентным. По умолчанию результат отображается в логарифмическом масштабе шкалы с целью уменьшения разброса цветовых градиентов. Если отношение допускаемого и расчётного напряжений приближается к единице, или меньше её, условие прочности перестаёт выполняться и, следовательно, в конструкцию необходимо вносить изменения.

4.2.2. УСТОЙЧИВОСТЬ

Равновесие статически нагруженной конструкции называют устойчивым, если малым возмущающим воздействиям соответствуют малые деформации. В определённых случаях нагружений конструкций возможны ситуации т.н. **потери устойчивости** – когда малые возмущения приложенных к системе сил приводят к большим деформациям конструкции, выходящими за рамки линейной теории упругости. Нагрузки, при которых происходит потеря устойчивости, называют **критическими**, а соответствующие состояния – **критическими состояниями**. При сжимающих силах, даже незначительно превышающих критическое значение, дополнительные напряжения изгиба достигают весьма больших значений и непосредственно угрожают прочности конструкции. Поэтому, критическое состояние, как непосредственно предшествующее разрушению, считается недопустимым в условиях реальной эксплуатации. Опасность потери устойчивости особенно велика в сжатых зонах для лёгких тонкостенных конструкций типа гибких стержней, пластин и оболочек. Явления потери устойчивости весьма разнообразны: появление качественно новых форм равновесия; исчезновение устойчивых форм равновесия и др.



Конфигурация анализа устойчивости предназначен для решения задачи т.н. **начальной устойчивости** конструкции. Результатом расчёта является коэффициент критической нагрузки, при действии которой конструкция может скачкообразно перейти в новое равновесное состояние, и соответствующая этой нагрузке форма нового равновесного состояния. В этом случае возможна ситуация, когда критическая нагрузка, при которой произойдёт по-

теря устойчивости, может быть значительно меньше нагрузки, при которой произойдёт потеря прочности конструкции по критериям линейного статически-напряженного состояния. Т.е. напряжения в материале конструкции могут не достигнуть предельных значений, но деформации из-за потери устойчивости могут привести к разрушению конструкции. Таким образом, условие устойчивости по критерию критических нагрузок может быть сформулировано так:

Фактические нагрузки, приложенные к конструкции, с учётом назначаемого коэффициента запаса, должны быть меньше расчётных критических нагрузок:

$$F_{\text{фактические}} \cdot K_{\text{запаса}} < F_{\text{критические}}$$

Оценив значение критической нагрузки, при котором конструкция может потерять устойчивость, можно оптимизировать изделие с целью достижения условия надёжности. Например, для протяжённого объекта можно повысить устойчивость путём уменьшения длины или увеличения толщины объекта, либо можно создать дополнительные рёбра жесткости.

Основные темы в этом разделе:

- [Этапы](#)
- [Параметры расчёта](#)
- [Оценка результатов](#)

4.2.2.1. ЭТАПЫ

Анализ на устойчивость осуществляется в несколько этапов. Последовательность действий пользователя по подготовке задачи и выполнению расчёта конструкции на устойчивость во многом схожа с алгоритмом, описанным для Анализа прочности. Поэтому в данном разделе отметим только некоторые особенности, характерные для расчёта на устойчивость:

Шаг 1. Создание задачи

При создании задачи нужно указать её тип – «Устойчивость».

Шаг 2. Наложение граничных условий

В анализе устойчивости, как и в статическом анализе, роль граничных условий выполняют закрепления и нагрузки. При анализе на устойчивость могут использоваться все типы закреплений и все виды силовых нагрузок. Температурные воздействия задаются также, как и в статическом анализе. Задание закреплений и силовых нагрузок является обязательным условием выполнения корректного расчёта. Суммарно наложенные на модель ограничения должны удовлетворять следующему условию:

Для обеспечения анализа устойчивости модель должна иметь закрепление, исключаящее её свободное перемещение в пространстве как твёрдого тела. Невыполнение этого условия приведёт к неверным результатам конечно-элементного моделирования или срыву вычислительного процесса.

Отметим также, что задание нагрузок имеет большое значение для обеспечения корректности постановки задачи расчёта начальной устойчивости. В частности, при определенных случаях нагружения, решение задачи может не иметь физического смысла (например, стер-

жень, растягиваемый продольной силой). Признаком корректно заданных граничных условий является положительное значение коэффициента критической нагрузки, полученного в результате расчёта.

Шаг 3. Выполнение расчёта

Перед выполнением расчёта пользователь указывает в параметрах задачи алгоритмы расчёта и количество форм потери устойчивости, которые он хочет анализировать.

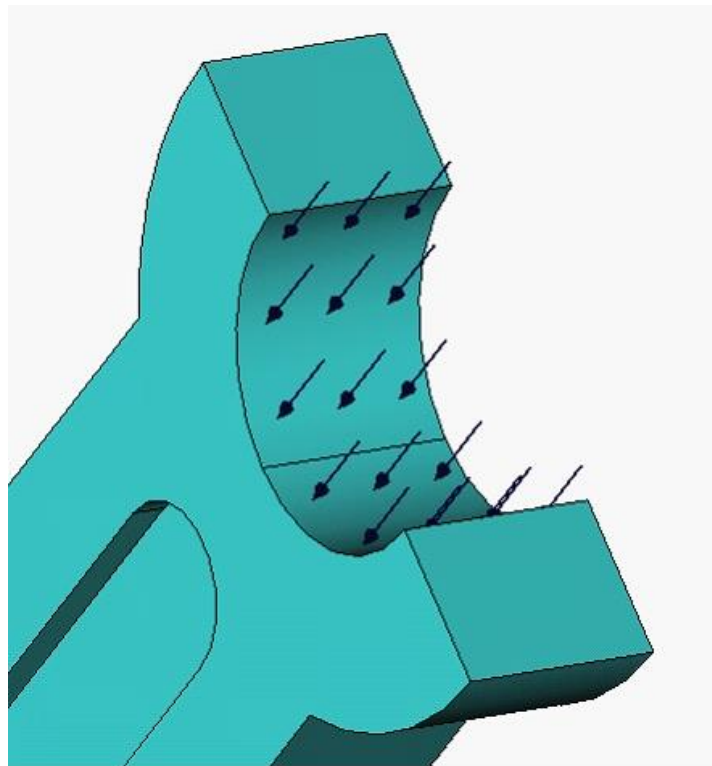
В информационное окно при выполнении расчёта выводится следующая справочная информация:

Количество узлов – количество узлов расчётной конечно-элементной сетки.

Количество элементов – количество тетраэдров в конечно-элементной сетке.

Введено аргументов – количество уравнений, участвующих в решении.

Расчёт закончен – символизирует о том, что процесс решения завершился успешно.



Шаг 4. Результаты

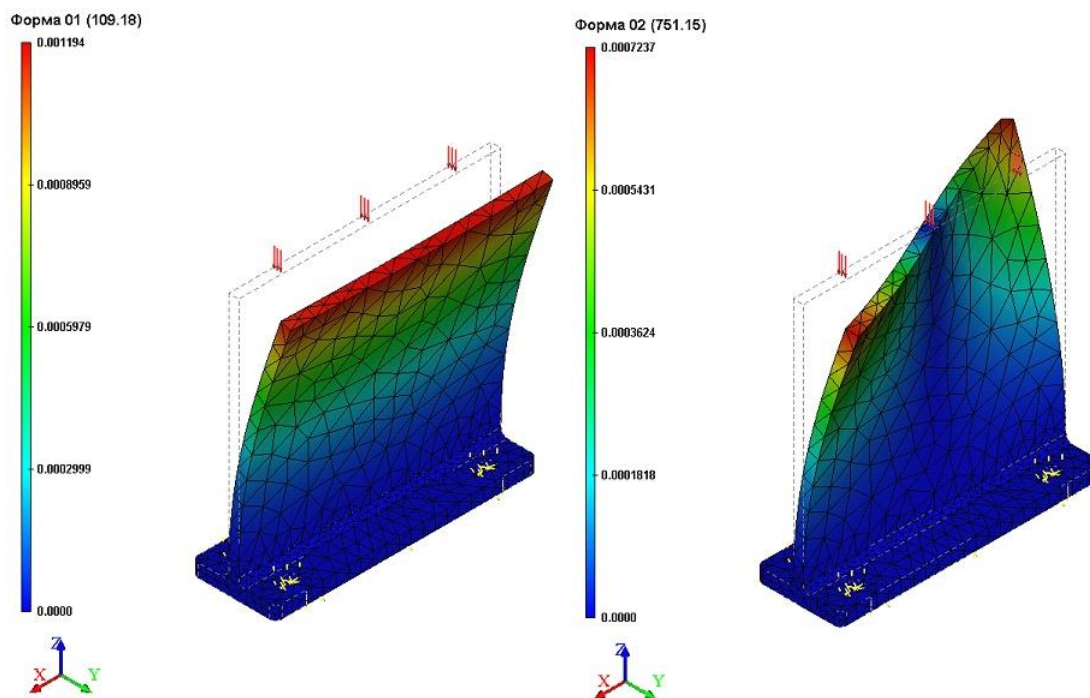
Результатами анализа устойчивости являются.

Коэффициент критической нагрузки – расчётное значение коэффициента, произведение которого на приложенные к системе нагрузки, даёт фактическое значение критической нагрузки, приводящей систему в новое равновесное состояние. Например, для модели приложена распределенная сила 1000 Н. Коэффициент критической нагрузки по результатам расчёта составил 109,18. Это означает, что первая форма устойчивого равновесного состояния для данной модели имеет критическую нагрузку 109180 Н.

Коэффициент критической нагрузки должен быть положительным. Если в результате решения коэффициент критической нагрузки получился отрицательным, это означает, что при приложенных к конструкции нагрузках состояние потери устойчивого равновесия не может быть достигнуто.

Относительные перемещения, соответствующие данной критической нагрузке. Этот тип результата отражает форму равновесного устойчивого состояния конструкции, соответствующую определенной критической нагрузке. Формы равновесных состояний, отображаемые в окне постпроцессора после завершения расчёта, представляют собой относительные перемещения. Анализируя эти формы, можно сделать заключения о характере перемещений в ситуации потери устойчивости. Зная ожидаемую равновесную форму на некоторой критической нагрузке, можно, например, задать дополнительное закрепление или опору в области конструкции, соответствующей максимуму данной формы равновесного состояния, что приведёт к эффективному изменению механических свойств изделия.

В качестве дополнительного (справочного) результата можно вывести также перемещения конструкции под действием приложенных статических нагрузок, расчёт которых предшествует расчёту коэффициентов критических нагрузок.



Формы равновесных состояний, соответствующие первой и второй критическим нагрузкам детали

4.2.2.2. ПАРАМЕТРЫ РАСЧЁТА

По умолчанию, после инициализации команды «Анализ > Расчёт» появляется диалог задания параметров задачи, имеющий несколько переключаемых закладок. Пользователь может изменить установленные по умолчанию параметры задачи. Доступ к параметрам задачи

можно также осуществить по  на имени задачи в дереве задач или из контекстного меню по нажатию  на имени выбранной задачи в дереве задач. Параметры задачи, определённые пользователем, сохраняются при сохранении документа, а также наследуются

при копировании задачи. Основное назначение параметров задачи – задание требуемых для работы Процессора режимов, списков отображаемых после расчёта в дереве задач результатов и количество форм потери устойчивости.

На закладке **Описание задачи** можно определить или изменить описательные параметры текущей задачи: имя и комментарий.

На закладке **Анализ устойчивости** можно задать свойства процессора для решения уравнений. В группе "Решение системы уравнений" пользователь может выбрать способ решения уравнений устойчивости.

Задача_1 [Устойчивость]

Описание задачи

Анализ устойчивости

Термоэффекты

Настройка результатов

Информация о расчёте

Метод расчёта

☐ Автоматический выбор

☐ Прямой

☒ Итерационный

Настройка

Настройка

Определение форм равновесных состояний

Количество форм равновесных состояний: 1

☐ Стабилизировать систему

Настройка

Метод конечных элементов

Тип элемента: Квадратичная интерполяция

Рекомендуется для осуществления расчёта без использования количественных данных для оценки устойчивости

Далее >

Отмена

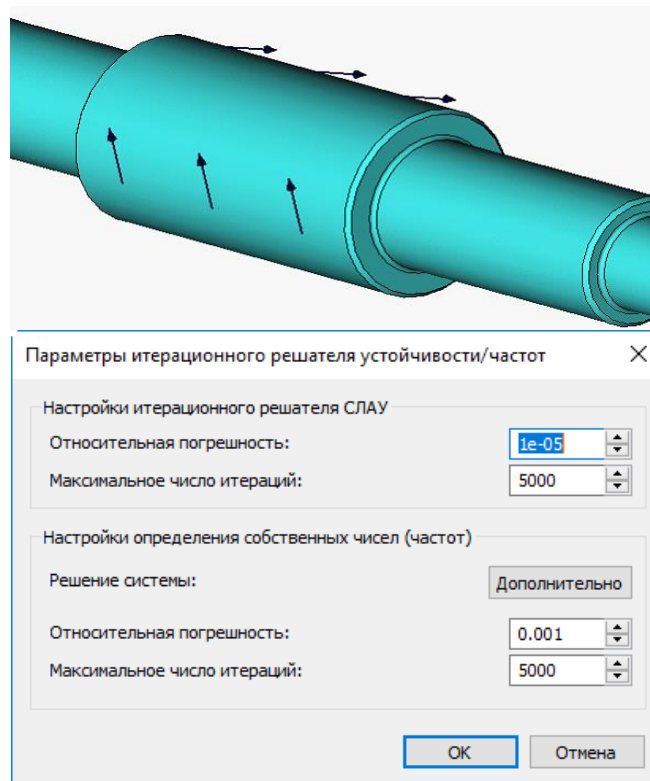
Метод расчёта

Автоматический выбор - метод решения уравнений выбирается системой автоматически исходя из общего количества уравнений. По умолчанию пороговое значение равно 100 000 уравнений (степеней свободы) и задаётся на странице **Установки | Препроцессор**. Если общее число уравнений превышает заданное значение, для решения уравнений используется итерационный метод, в противном случае система решается прямыми методами.

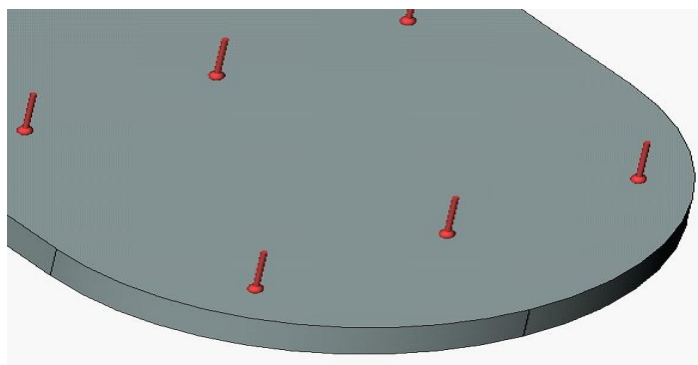
Прямой - система уравнений решается методом Гаусса, что занимает большее количество оперативной памяти в сравнении с итерационным методом. Если имеется достаточное количество оперативной памяти, то решение этим методом достигается быстрее, чем итерационным. Предпочтителен для небольших задач с числом степеней свободы менее 100 000, однако в зависимости от доступной оперативной памяти это число может быть увеличено. Также предпочтителен для решения линейным конечным элементом. Нажатие на кнопку **Настройка** приводит к открытию окна свойств прямого частотного решателя, в котором можно установить относительную погрешность нахождения критических нагрузок и число итераций Ланцоша (см ниже).

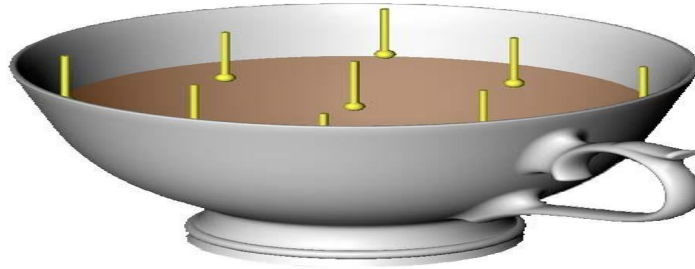
Итерационный - система уравнений решается итерационными методами, не требующими полного обращения матрицы, что занимает меньше оперативной памяти. Время расчёта примерно пропорционально числу искомых форм потери устойчивости. Если сетка конечных элементов содержит много элементов, имеющих неоптимальную форму, т.е. вытянутых,

то скорость схождения существенно замедляется. Нажатие на кнопку **Настройка** приводит к открытию окна свойств итерационного решателя устойчивости/частот, в котором можно установить относительную погрешность решения СЛАУ (невязку) и максимальное число итераций в группе настройки итерационного решателя СЛАУ; в группе настройки определения собственных чисел (частот) можно установить относительную погрешность нахождения критических нагрузок и максимальное число итераций определения собственных чисел (см ниже).



При нажатии на кнопку **Дополнительно** для любого из методов можно указать возможность использования дополнительной дисковой памяти: **автоматически, запрещено, принудительно**.





Определение форм равновесных состояний

Количество форм равновесных состояний. Пользователь может определить количество критических нагрузок и соответствующих форм равновесных состояний, подлежащих определению. Для практических целей, наибольшую ценность представляет 1-я форма, соответствующая минимальной критической нагрузке. Однако пользователь может найти также критические нагрузки других форм равновесных состояний.

В группе **“Метод конечных элементов”** пользователь может установить режим **«Производить расчёт линейным элементом»**. Он позволит провести намного более быстрый расчёт для приблизительной оценки относительного распределения амплитуд форм равновесных состояний на достаточно подробной сетке.

Расчёт линейным элементом обеспечивает недостаточную точность определения критических нагрузок. Значения критических нагрузок при расчёте линейным конечным элементом значительно (в десятки и сотни раз) больше значений, получаемых при расчёте более точными методами. Настоятельно рекомендуется для количественной оценки коэффициента критических нагрузок использовать только расчёт квадратичным элементом (режим по умолчанию).

На закладке **Термоэффекты** определяются параметры учета влияния изменения температуры конструкции на возникновение внутренних напряжений и изменение свойств материалов.

Задача_1 [Прочность]

Описание задачи

Статический анализ

Нелинейность

Термозффекты

Настройка результатов

Информация о расчёте

☐ Учитывать термоупругость

☒ Учитывать изменение физических свойств от температуры

Ненапряжённое состояние

Температура нулевых деформаций: 298

Температурные поля

☒ Равномерная температура: 298

☐ Использовать заданные температуры

Температуры должны быть заданы с помощью команды "Температура" тепловых нагрузок.

☐ Использовать результаты теплового анализа:

Время:

Далее > Отмена

Учитывать термоупругость. Учёт влияния температурных напряжений на изменение жесткости конструкции и изменение величины критической нагрузки.

Учитывать изменение физических свойств от температуры. Свойства материала будут считаны с графиков зависимостей параметров материалов задачи от температуры, заданных в свойствах каждого материала.

Обе опции могут учитываться совместно или порознь. Остальные параметры на этой закладке работают также, как в задачах статического анализа.

На закладке **Настройка результатов** определяются типы результатов, отображаемых в дереве задач после завершения расчёта.

4.2.2.3. ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

После успешного расчёта задачи необходимо проанализировать результаты расчётов, чтобы сделать заключение о вероятной устойчивости конструкции по результатам конечно-элементного моделирования. Примерная последовательность действий по оценке результатов конечно-элементного моделирования явления начальной устойчивости следующая:

Оценка корректности решения. Как уже отмечалось, коэффициент критической нагрузки должен быть положительным. Если коэффициент получился отрицательным, значит нагружения, приложенные к конструкции, не вызывают эффектов неустойчивого поведения системы.

Оценка значения коэффициента. Если коэффициент критической нагрузки получился положительным и меньше 1, это означает, что при заданных нагружениях система потеряет устойчивость, и конструкция нуждается в доработке. Если коэффициент критической нагрузки положителен и больше 1, значит, при заданных условиях нагружения потеря устойчивости конструкции не угрожает.

Анализ форм равновесных состояний. В дереве задач из контекстного меню по команде «Открыть» или «Открыть в новом окне» открываем результат «Форма 01», соответствующий наименьшей критической нагрузке. Визуально оцениваем характер деформированного состояния конструкции. Анализ форм равновесных состояний позволяет сделать вывод о направлениях и местах максимальных перемещений, соответствующих критической нагрузке. Эта информация может быть использована для оптимизации конструкции изделия с целью повышения её устойчивости.

4.2.3. УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ

Некоторые детали машин, механизмов, а также элементы сооружений в процессе эксплуатации подвергаются действию нагрузок, меняющихся во времени. Сопротивление материалов действию таких нагрузок существенно отличается от сопротивления тех же материалов статическому и ударному действию нагрузок.

Для изучения прочности материала при действии переменных нагрузок в T-FLEX Анализ используется конфигурация **Анализ усталости**.

Усталостью материала называется процесс постепенного накопления повреждений в материале под действием переменных напряжений, приводящих к образованию трещины, ее развитию и окончательному разрушению изделия.

Подробнее:

[Цикл напряжений. Основные характеристики. Кривая усталости. Оценка характеристик сопротивления усталости при сложном напряженном состоянии](#)
[Зависимость сопротивления усталости от вида напряжённого состояния и геометрии конструкции](#)
[Интерпретация результатов усталостного анализа](#)
[Влияние концентраторов на прочность конструкций. Примеры концентраторов напряжений. Численные значения коэффициента концентрации](#)

Основные темы в этом разделе:

- [Этапы](#)
- [Параметры расчёта](#)
- [Оценка результатов](#)
- [Однособытийный расчёт](#)
- [Многособытийный расчёт](#)

4.2.3.1. ЭТАПЫ

Перед выполнением расчёта на усталостную прочность, необходимо сначала исследовать действие статической нагрузки на рассматриваемую деталь или конструкцию (т.е. выполнить статический анализ). Это необходимо для того, чтобы выяснить, подвергается ли изделие разрушению под действием заданной нагрузки. Если изделие разрушается при заданном статическом нагружении (коэффициент запаса меньше 1), то выполнять Анализ усталости не имеет смысла.

Предварительный расчёт задачи статического анализа необходим еще и потому, что рассчитанные в статическом анализе напряжения (эквивалентные или главные) будут использованы для расчёта усталостной прочности в качестве амплитуды циклических напряжений.

Кроме того, при расчёте усталости необходимо, чтобы для материала, из которого изготовлено рассматриваемое изделие, была определена **кривая усталости**.

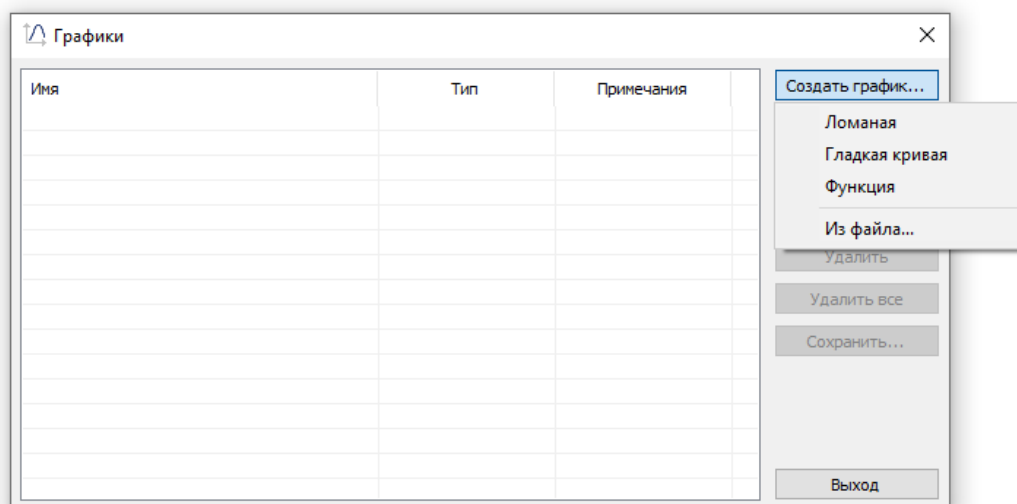
Шаг 1. Кривая Усталости

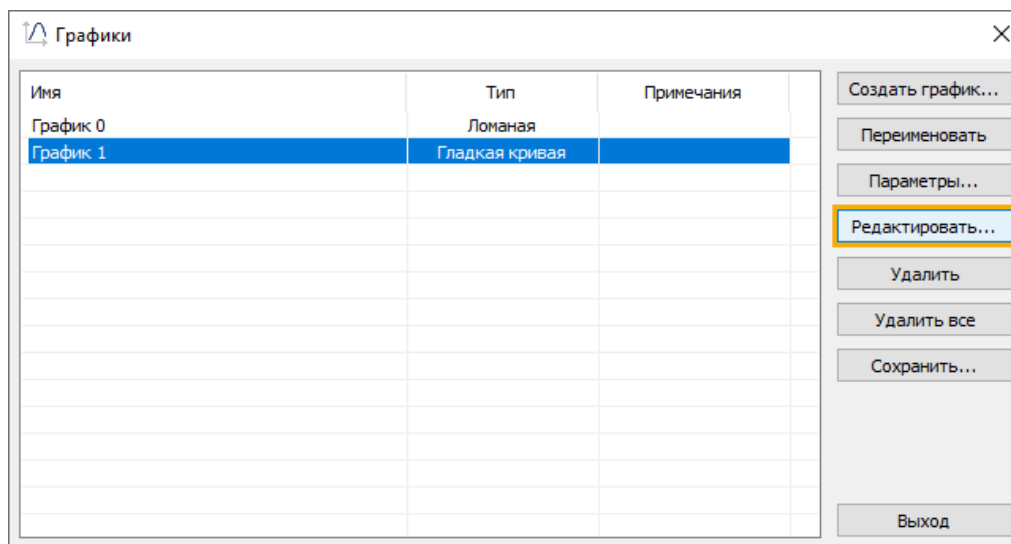
Кривая усталости может быть выбрана из уже существующих кривых, или задана самостоятельно.

При помощи команды:

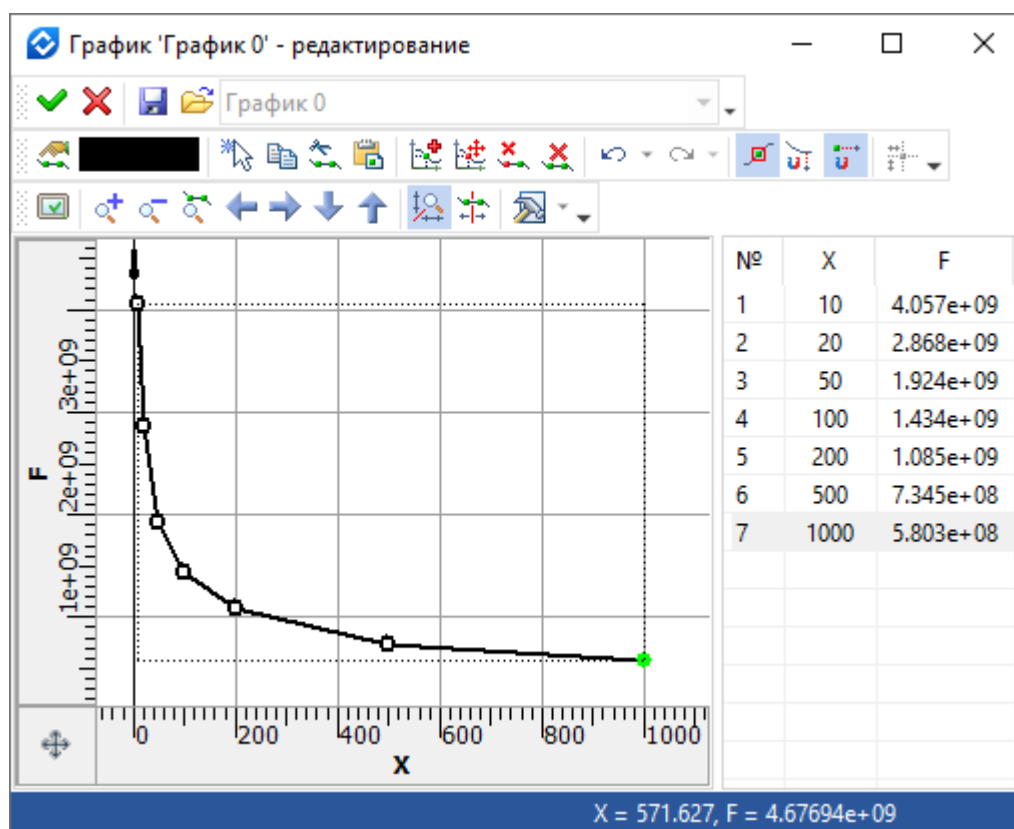
Пиктограмма	Лента
	Параметры > Инструменты > Графики
Клавиатура	Текстовое меню
<3GT>	Параметры > Графики

Можно вызвать диалог для работы с кривыми усталости. Таким образом, пользователь может создавать новые, редактировать или удалять уже существующие кривые. Вид кривой (ломаная, гладкая, функция) определяется при создании графика.

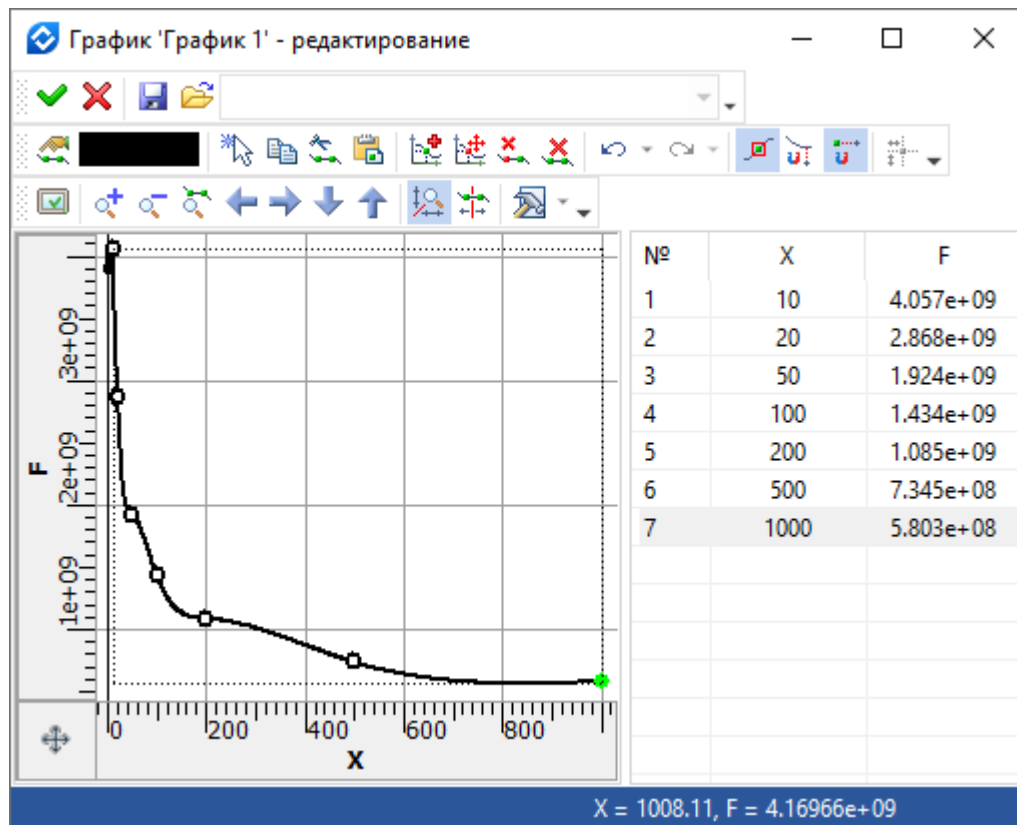




После того как кривая создана (определен её тип и имя), необходимо задать узлы кривой и значения функции в них.



Ломаная



Гладкая кривая

Полностью заданная кривая усталости имеет следующий вид:

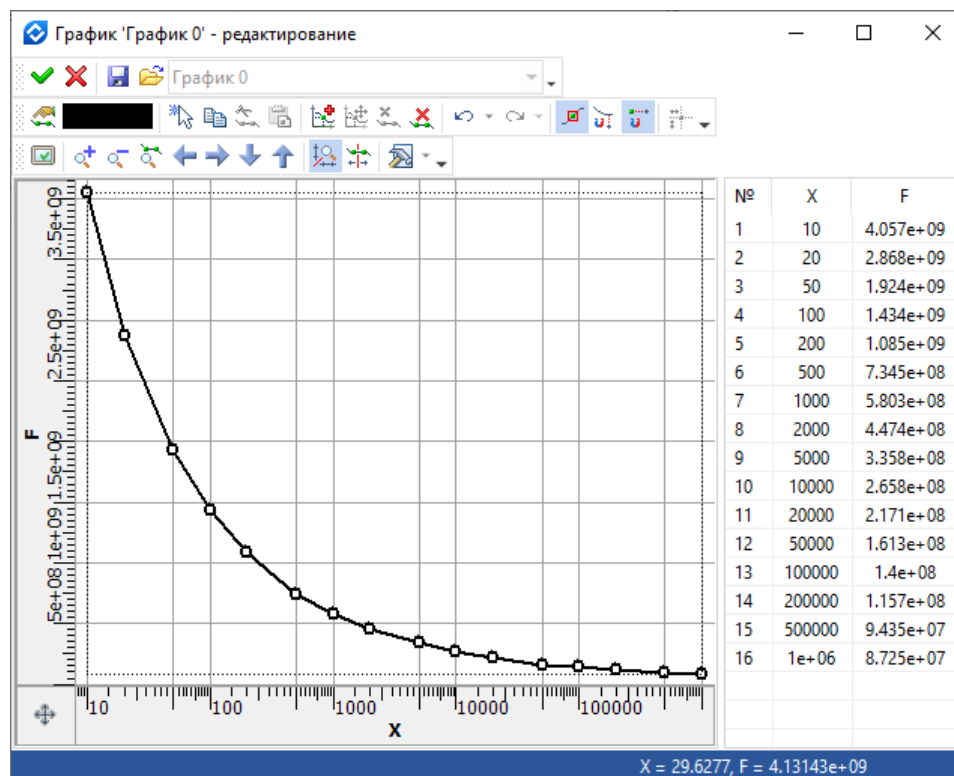
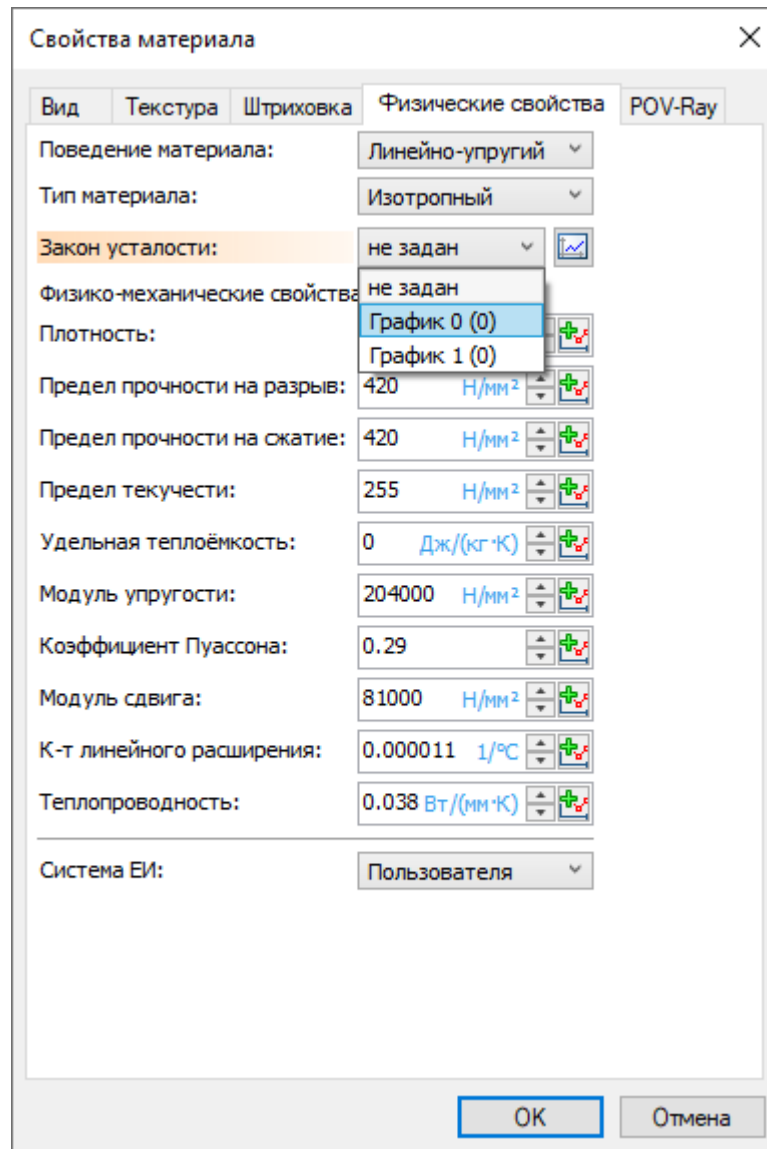


График кривой можно сохранить во внешний файл для того, чтобы в дальнейшем его можно было повторно использовать в других усталостных расчётах.

Далее необходимо выполнить привязку кривой усталости к материалу задачи.

Для этого откройте окно материалов и во вкладке **Документ** откройте окно свойств для материала текущей задачи. Перейдите в закладку **Физические свойства** и выберите кривую усталости.



Если 3D модель является сборкой, т.е. состоит из 3D фрагментов, то для того, чтобы привязать кривую усталости к материалу фрагмента необходимо в дереве задач выбрать 3D фрагмент, затем при помощи контекстного меню вызвать диалог **Параметры 3D фрагмента**. В диалоге задать источник **Тело** и выбрать материал, затем нажать кнопку.

В появившемся диалоге **Свойства материала** выбрать вкладку **Физические свойства** и для параметра **Закон усталости** выбрать кривую усталости.

Шаг 2. Задача усталости

Задача создаётся при помощи команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Задача > Создать задачу > Конечно-элементный анализ
Клавиатура	Текстовое меню
<3MN>	Анализ > Новая задача > Конечно-элементный анализ

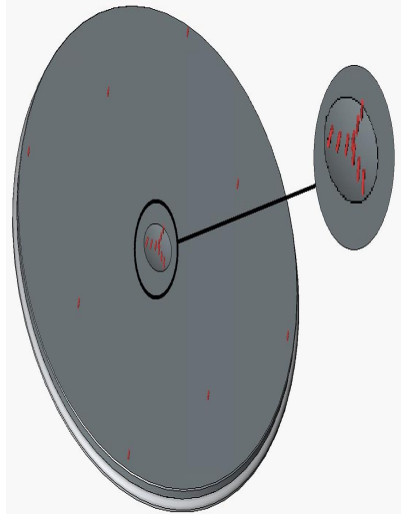
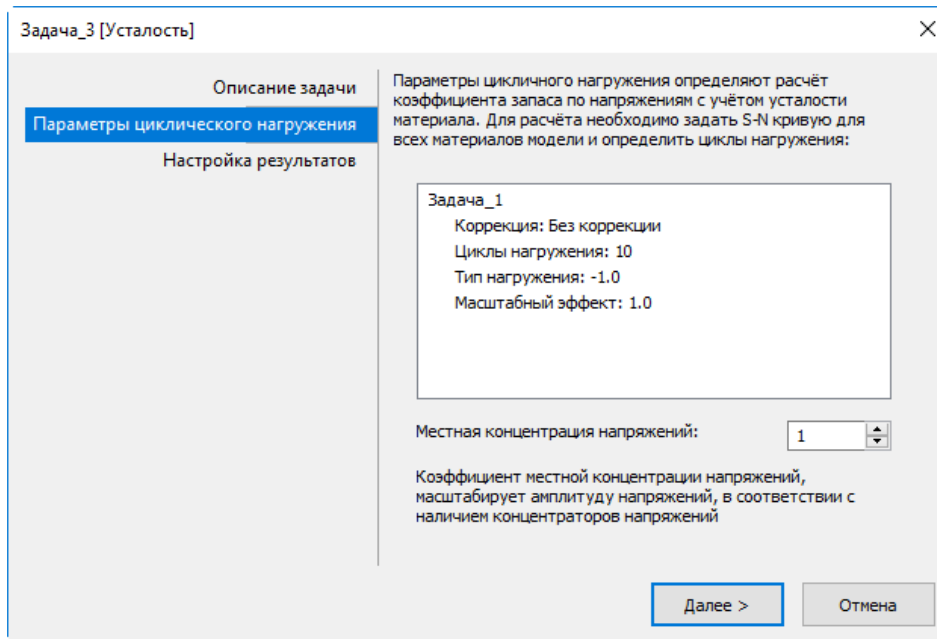
Для осуществления усталостного расчёта при создании задачи пользователь указывает её тип – «**Анализ усталости**» - в окне параметров команды.

После создания задачи типа «**Анализ усталости**» необходимо создать в ней одно или несколько событий при помощи команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Условия > Создать событие
Клавиатура	Текстовое меню
<3CE>	Анализ > Создать событие

В однособытийном расчете предполагается, что все нагрузки, приложенные к системе, циклически изменяются по одному закону (параметры количество циклов и тип циклического изменения для всех нагружений одинаковы). Многособытийный расчет позволяет оценить воздействие нескольких сил с разными параметрами циклического нагружения (разное количество циклов или несовпадающие типы изменения циклического нагружения). Каждое событие добавляется в папку «**События**» в дереве задачи.

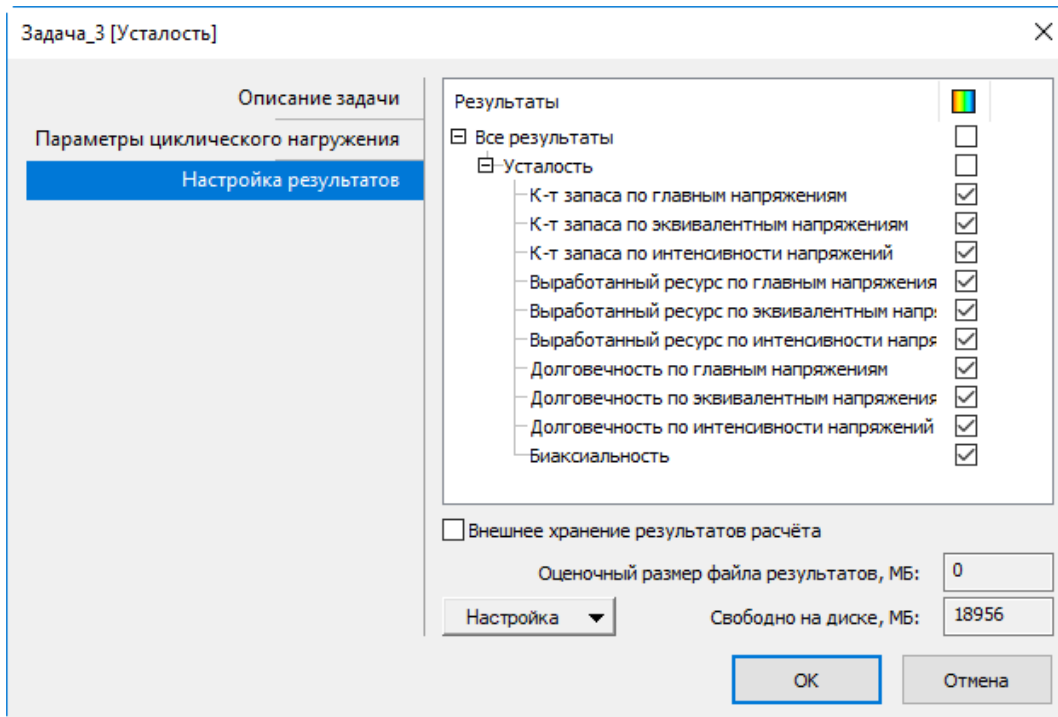
Отметим, что для возможности осуществить многособытийный расчёт усталости, необходимо, чтобы конечно-элементные сетки всех задач статики, входящих в усталостный расчёт, совпадали, и одно и то же тело каждой задачи статики состояло из одного и того же материала.



Затем необходимо добавить рассчитанную задачу статики и задать **параметры циклического нагружения**: количество циклов, тип нагружения, метод коррекции напряжений (задается в том случае, если коэффициент асимметрии цикла R не совпадает с коэффициентом заданной кривой усталости), коэффициент масштабного эффекта (коэффициент масштабирования напряжений). Также в диалоге параметров задачи на вкладке «Параметры» можно задать коэффициент местной концентрации напряжений (по умолчанию коэффициент равен 1).

4.2.3.2. ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

После выполнения расчёта, в дереве задач появляется новая папка «Результаты». Указать список отображаемых результатов можно на вкладке **Настройка результатов** диалога параметров задачи.



Всего по результатам анализа усталости пользователю доступны 10 результатов:

- Коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям (гипотеза 2).
- Коэффициент запаса по интенсивности напряжений (гипотеза 1).
- Коэффициент запаса по максимальным главным напряжениям (гипотеза 3).

Результаты на коэффициент запаса доступны только для однособытийного расчёта.

Коэффициент запаса усталостной прочности представляет собой отношение предела усталости σ_R определяемого по заданной кривой усталости при заданном числе циклов нагружения, к скорректированной амплитуде цикла σ^* , которая рассчитывается из вычисленных в задаче статического анализа напряжений

$$\sigma: K = \sigma_R / |\sigma^*| ..$$

Напряжения σ рассчитываются, исходя из соответствующих условий пластичности:

- гипотеза энергии формоизменения: $\sigma = (((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2) / 2)^{1/2}$;
- гипотеза максимальных касательных напряжений: $\sigma = \sigma_1 - \sigma_3, |\sigma_1| \geq |\sigma_2|, \geq |\sigma_3|$;
- гипотеза наибольших главных напряжений $\sigma = \sigma_1$.
- Выработанный ресурс по главным напряжениям (гипотеза 3).
- Выработанный ресурс по эквивалентным напряжениям (гипотеза 2).
- Выработанный ресурс по интенсивности напряжений (гипотеза 1).

Данный результат отображается в процентах и характеризует степень поврежденности конструкции под действием циклических напряжений при указанном в расчете количестве и характере циклов нагружения.

Если конструкция подвергнута воздействию n_1 циклов знакопеременного напряжения S_1 , n_2 циклов знакопеременного напряжения S_2 , n_3 циклов знакопеременного напряжения S_3 , n_k циклов знакопеременного напряжения S_k , то общая степень повреждения D подсчитывается как:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i},$$

где N_i равно количеству циклов, требуемых, чтобы вызвать разрушение под S_i .

- Долговечность по главным напряжениям.
- Долговечность по эквивалентным напряжениям.
- Долговечность по интенсивности напряжений.

Результаты на долговечность доступны только для однособытийного расчёта.

Результат «Долговечность» отображает минимальное количество циклов N_{min} , требуемых, чтобы вызвать разрушение от усталости.

- **Биаксиальность** - коэффициент отношения меньшего главного знакопеременного напряжения (отличного от 0) к большему главному знакопеременному напряжению:
 $b = \sigma_3 / \sigma_1, |\sigma_1| \geq |\sigma_2|, \geq |\sigma_3|.$

Биаксиальность характеризует неравенство амплитуд главных напряжений в точке и характеризует пространственную неравномерность распределения главных напряжений по объёму тела в каждой точке. Значение биаксиальности, равное 1, соответствует случаю равнонапряженного состояния в точке $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$.

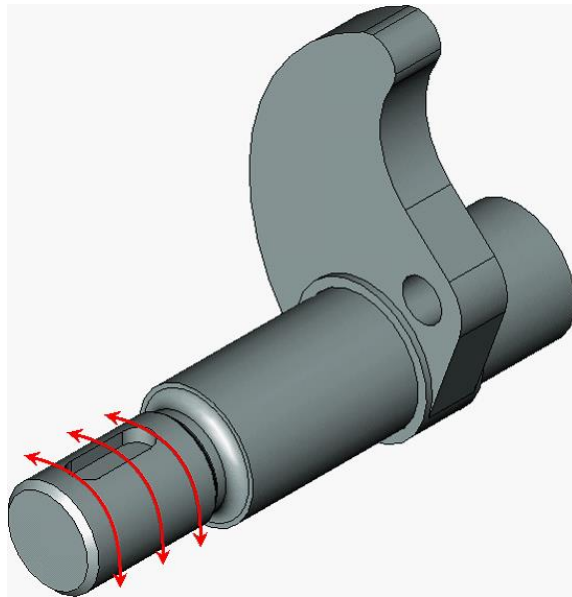
Результаты на биаксиальность доступны только для однособытийного расчёта

4.2.3.3. ОДНОСОБЫТИЙНЫЙ РАСЧЁТ

Чтобы выполнить расчёт на усталостную прочность, необходимо сначала исследовать действие статической нагрузки на изделие (т.е. выполнить статический анализ). Вычисленные в статическом анализе напряжения (эквивалентные или главные) будут использованы в расчёте усталости как амплитуды циклических напряжений.

Пусть на вал, изображенный на рисунке, действует нагрузка «Крутящий момент». Предполагаем, что при пуске вала или при его торможении возникает реверсивная нагрузка. Попытаемся определить, какое количество запусков и остановок выдержит вал при заданном крутящем моменте.

Итак, деталь находится под действием периодически изменяющейся со временем нагрузки, амплитудные значения которой симметричны относительно 0.



Сначала предполагаем, что нагрузка является статической (т.е. не изменяется во времени) и рассчитаем деталь, находящуюся под действием такой нагрузки на статическую прочность.

Статический Анализ

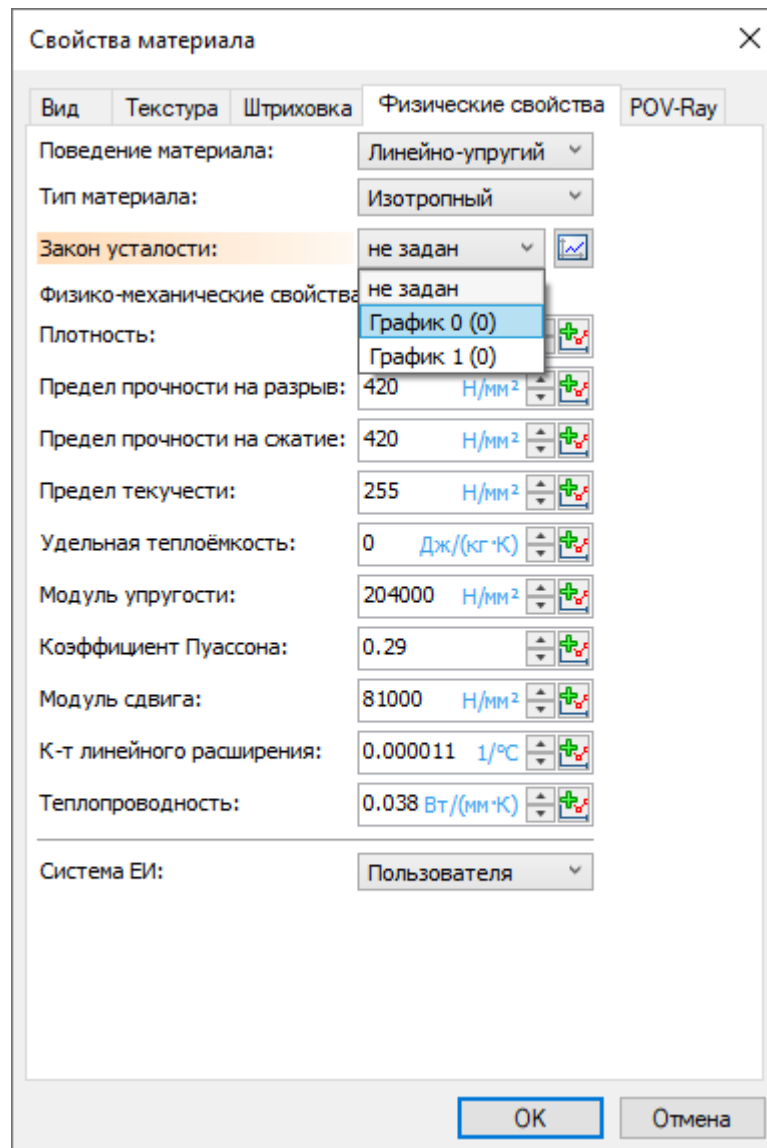
Для выполнения расчёта задачи Статического Анализа необходимо:

- Построить конечно-элементную сетку

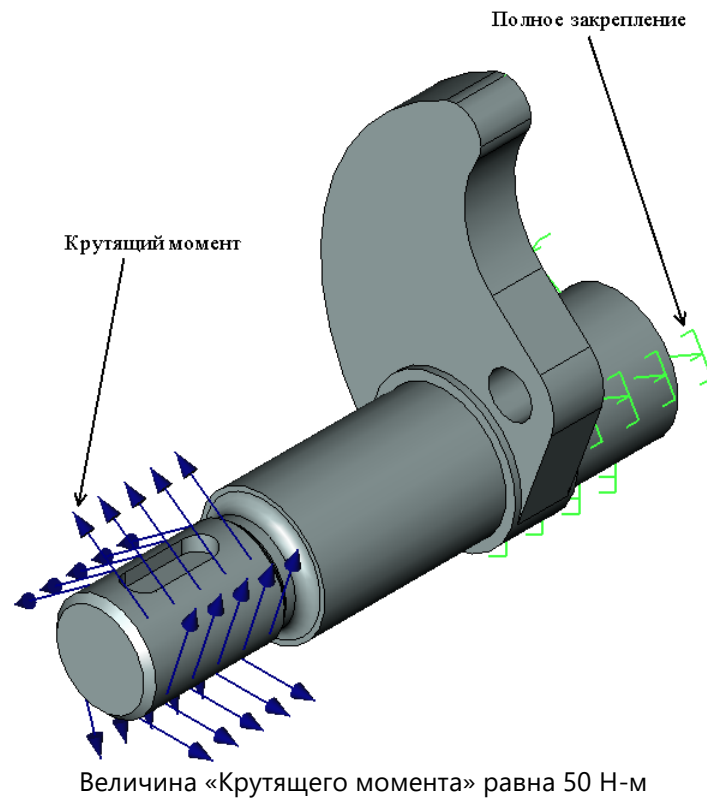


- Задать материал задачи

В дальнейшем, при выполнении расчёта на усталостную прочность, потребуется, чтобы для материала задачи была определена кривая усталости. Поэтому необходимо задать кривую усталости для материала.



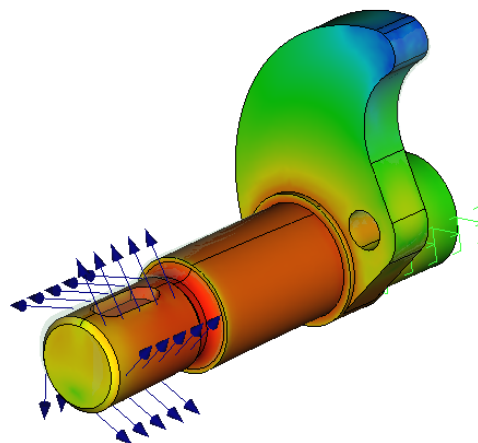
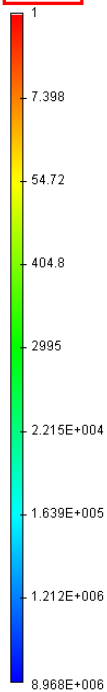
- Приложить нагрузки и задать ограничения



После выполнения расчёта необходимо проанализировать полученные результаты. Рассмотрим, например, «Коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям».

Задача: "Статический Анализ. Крутящий момент"
К-т запаса по эквивалентным напряжениям
Масштаб перемещений: 94.67

Min = 1.06



Минимальное значение коэффициента запаса больше 1, следовательно, при статическом нагружении деталь не разрушится. Тогда имеет смысл рассматривать действие циклически изменяющихся нагрузок на данное изделие.

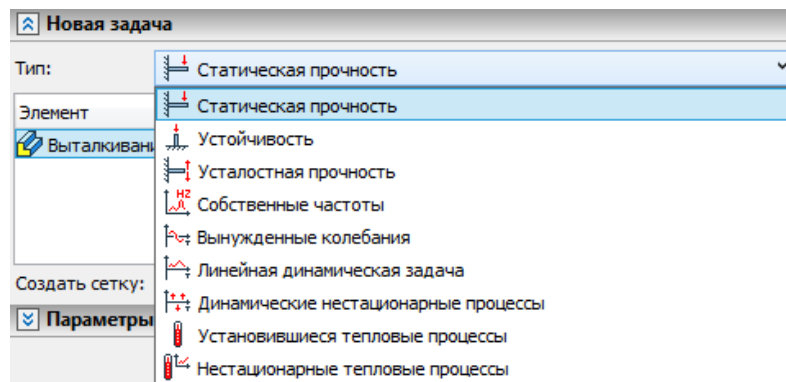
Анализ усталости

Теперь, выполнив анализ детали на статическую прочность и убедившись в том, что при однократном нагружении не происходит разрушения детали, можем перейти к расчёту усталостной прочности.

Пусть теперь на деталь действует циклически изменяющаяся нагрузка «Крутящий момент». Цикл нагружения в дальнейшем зададим как симметричный ($R = -1$). Амплитуда циклических напряжений будет определена из напряжений, рассчитанных в статическом анализе.

Заметим, что амплитуду нагрузки можно масштабировать (уменьшать или увеличивать в несколько раз) при помощи «Коэффициента масштабного эффекта» (см. далее).

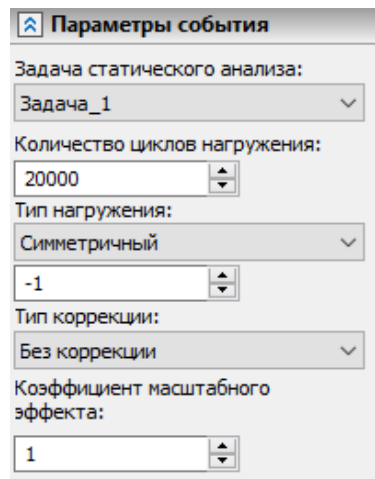
Создадим задачу Анализа усталости («Анализ > Новая задача > Конечно-элементный анализ > Усталостная прочность»).



Создадим событие («Анализ > Событие»).

На вкладке «Параметры события» выберем рассчитанную статическую задачу и зададим параметры циклического нагружения: количество циклов, тип нагружения, тип коррекции (задается в том случае, если коэффициент асимметрии цикла R не совпадает с коэффициентом заданной кривой усталости), коэффициент масштабного эффекта (коэффициент масштабирования напряжений).

Также на вкладке «Параметры события» можно задать коэффициент местной концентрации напряжений (по умолчанию, коэффициент равен 1).



Параметры события

Задача статического анализа:
Задача_1

Количество циклов нагружения:
20000

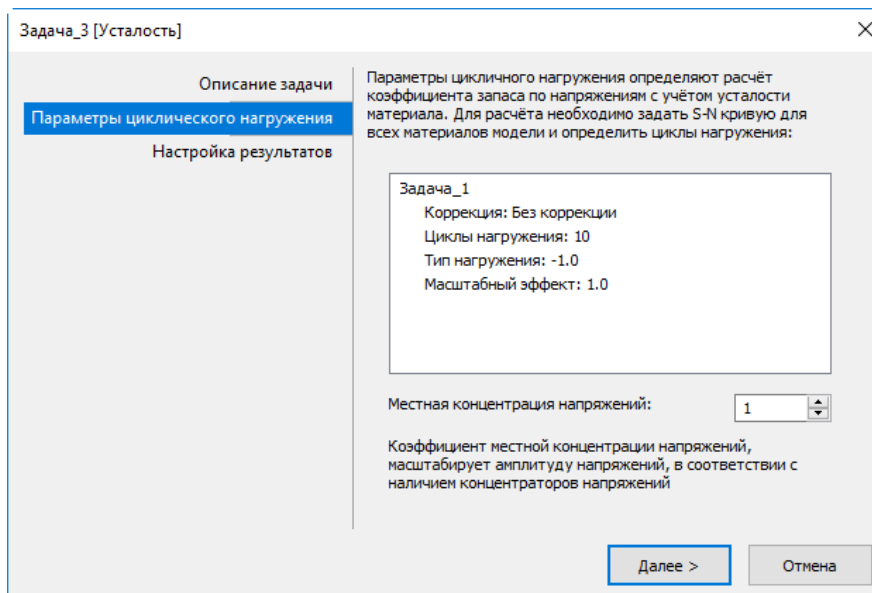
Тип нагружения:
Симметричный

-1

Тип коррекции:
Без коррекции

Коэффициент масштабного эффекта:
1

Перед расчетом задачи вы увидите информацию о заданных параметрах задачи усталости:



Задача_3 [Усталость]

Описание задачи
Параметры циклического нагружения
Настройка результатов

Параметры циклического нагружения определяют расчёт коэффициента запаса по напряжениям с учётом усталости материала. Для расчёта необходимо задать S-N кривую для всех материалов модели и определить циклы нагружения:

Задача_1
Коррекция: Без коррекции
Циклы нагружения: 10
Тип нагружения: -1.0
Масштабный эффект: 1.0

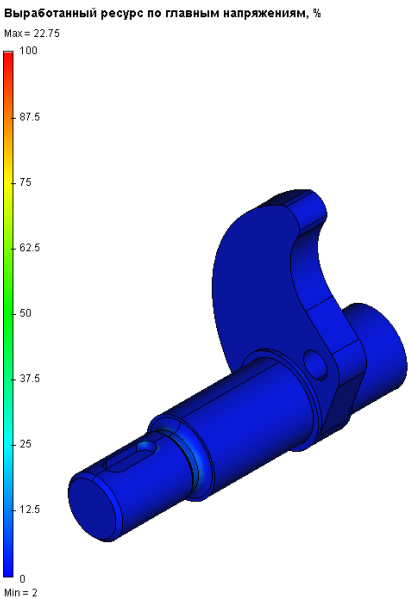
Местная концентрация напряжений: 1

Коэффициент местной концентрации напряжений, масштабирует амплитуду напряжений, в соответствии с наличием концентраторов напряжений

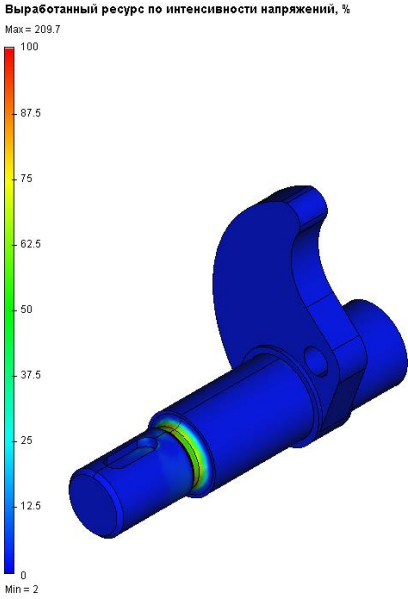
Далее > Отмена

Результаты расчёта

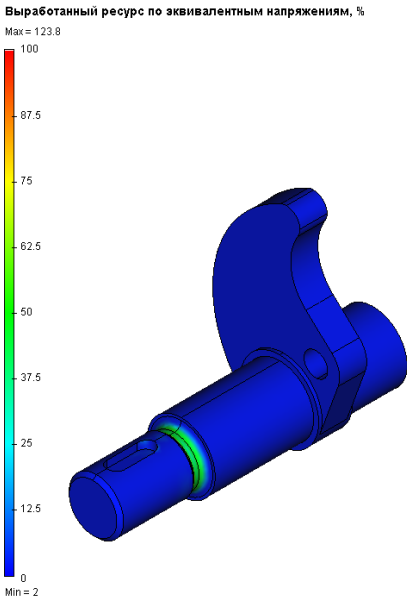
Выработанный ресурс. Красные зоны на модели соответствуют участкам с повреждением на 100% и свидетельствуют о недостаточной устойчивости к действию циклических нагрузок в этих участках конструкции. На рисунках показаны поля выработанного ресурса.



По главным напряжениям



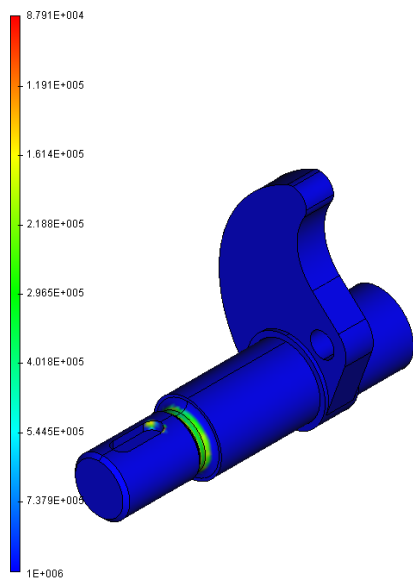
По интенсивности напряжений



По эквивалентным напряжениям

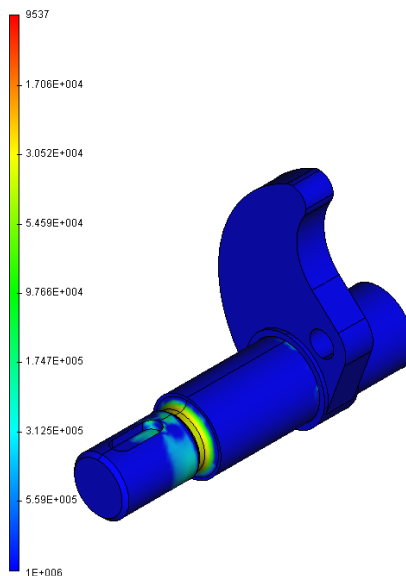
Долговечность. Зоны, отображаемые красным цветом, имеют наименьшую долговечность, а синим - наибольшую. На рисунках показаны поля долговечности.

Долговечность по главным напряжениям, циклы



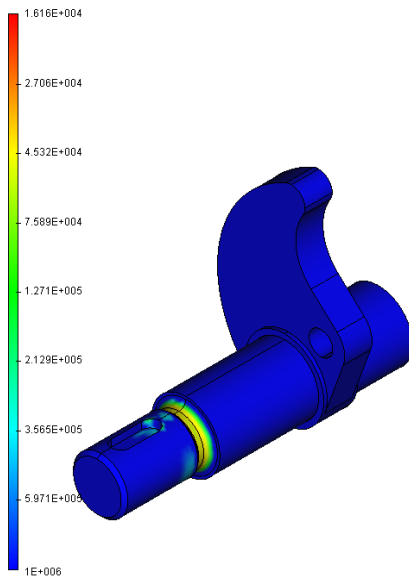
По главным напряжениям

Долговечность по интенсивности напряжений, циклы



По интенсивности напряжений

Долговечность по эквивалентным напряжениям, циклы



По эквивалентным напряжениям

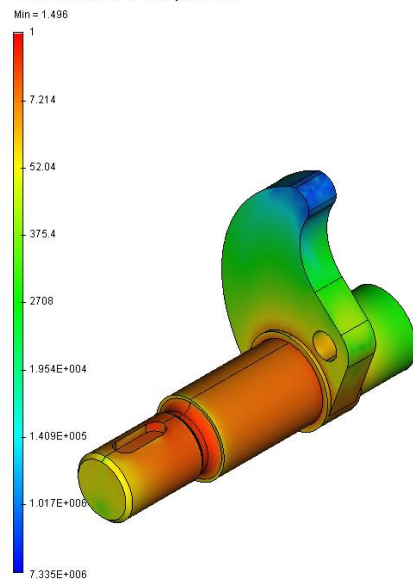
Данная группа результатов показывает, что деталь до разрушения выдержит следующее число циклов нагружения (т.е. количество запусков и остановок):

Тип результата «Долговечность»	Число циклов
По главным напряжениям	87910
По интенсивности напряжений	9537
По эквивалентным напряжениям	16160

Таким образом, ориентируясь на наиболее употребительный критерий (эквивалентные напряжения), можно сделать заключение о недостаточной надёжности детали из заявленного количества циклов нагружения (20000 циклов).

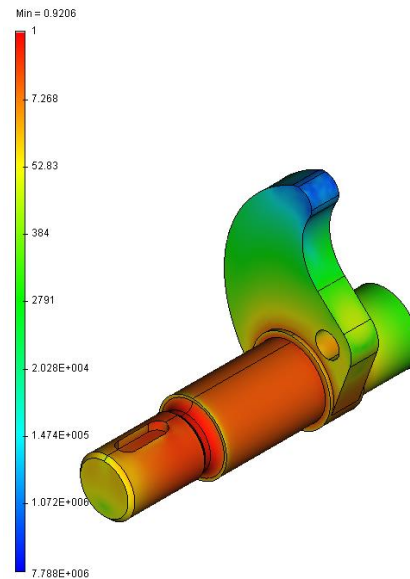
Коэффициент запаса показывает коэффициент запаса усталостной прочности при заданном циклическом нагружении (20000 циклов) и также говорит о возможных проблемах с усталостной прочностью данной детали как минимум по двум критериям. На рисунках показаны поля коэффициента запаса.

К-т запаса по главным напряжениям



По главным напряжениям

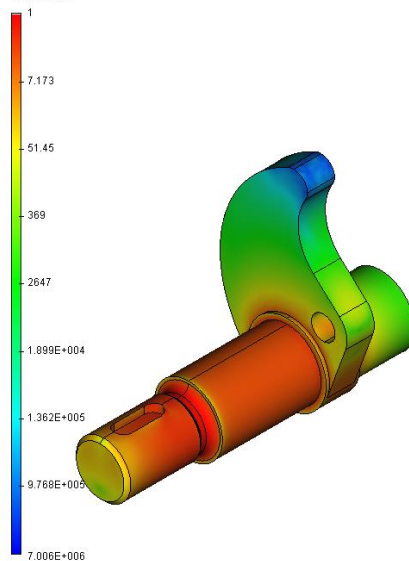
К-т запаса по эквивалентным напряжениям



по эквивалентным напряжениям

К-т запаса по интенсивности напряжений

Min = 0.7974

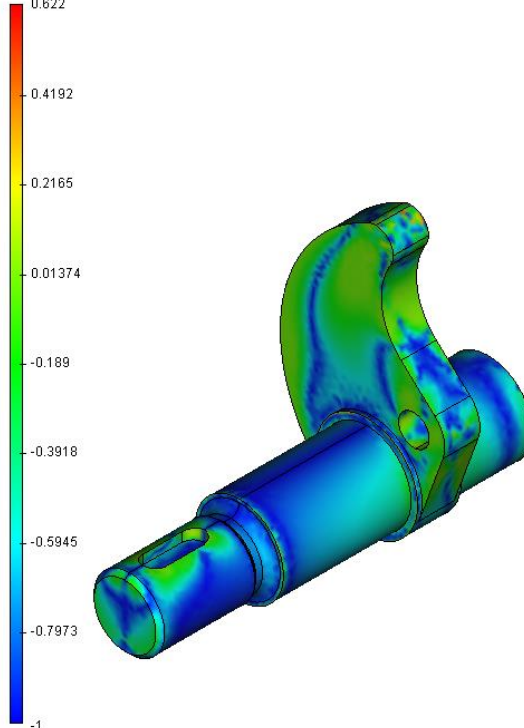


По интенсивности напряжений

Биаксиальность характеризует неравенство амплитуд главных напряжений.

Биаксиальность

0.622

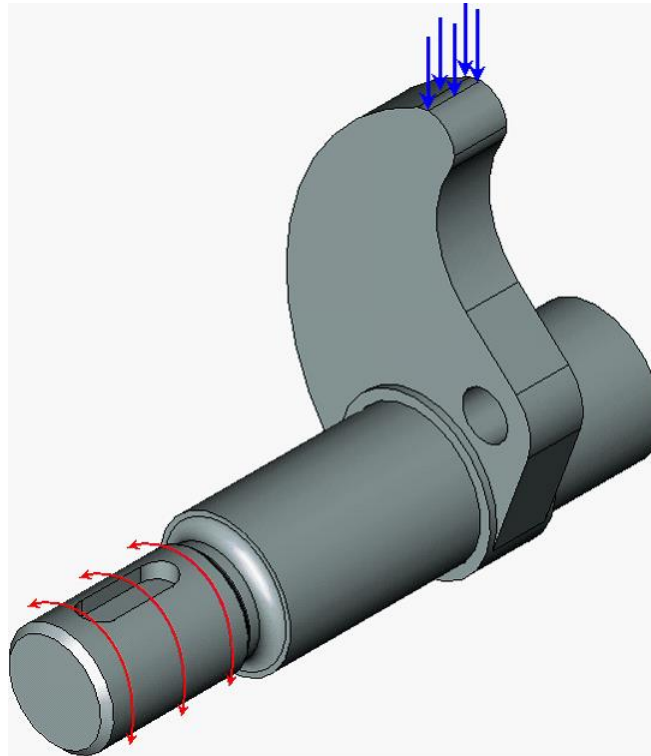


4.2.3.4. МНОГОСОБЫТИЙНЫЙ РАСЧЁТ

Чтобы выполнить расчёт на усталостную прочность, необходимо сначала исследовать действие статической нагрузки на изделие (т.е. выполнить статический анализ). Вычисленные в статическом анализе напряжения (эквивалентные или главные) будут использованы в расчёте усталости как амплитуды циклических напряжений.

Рассмотрим расчёт усталостной прочности детали, находящейся под действием нескольких циклически изменяющихся нагрузок. Все рассматриваемые циклы нагружения имеют отличные друг от друга характеристики, т.е. типы циклов нагружения не совпадают и количества циклов нагружений также могут быть различны.

Пусть на деталь, изображенную на рисунке, действует помимо реверсивной нагрузки «**Крутящий момент**», еще и пульсационная нагрузка «**Сила**».



Под пульсационной нагрузкой «Сила» в данной задаче понимается максимальное значение нагрузки, приходящееся на кулачок за один оборот вала.

Обе нагрузки («Крутящий момент», «Сила») независимы друг от друга. Поэтому усталостный расчёт будет **многособытийным**.

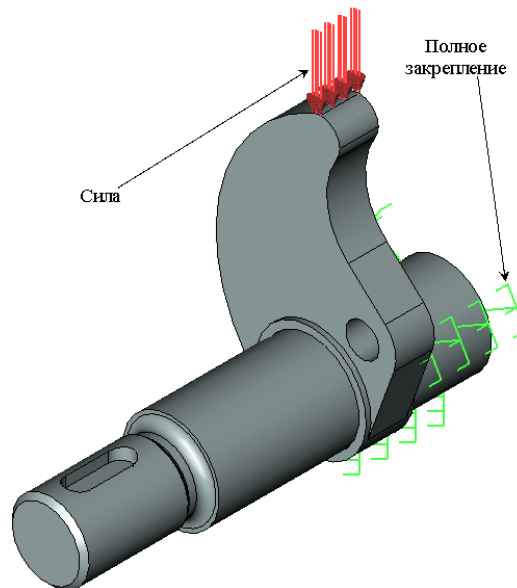
Статический расчёт

Сначала рассматриваем заданные нагрузки как статические (т.е. не изменяющиеся со временем) и рассчитываем деталь на статическую прочность по отдельности для каждой из нагрузок. Т.е. выполним расчёт задачи статического анализа с нагрузкой «Крутящий момент» и расчёт задачи статического анализа с нагрузкой «Сила».

Заметим, что для возможности осуществить многособытийный расчёт усталости, необходимо, чтобы конечно-элементные сетки обеих задач статики, входящих в усталостный расчёт, совпадали, и одно и то же тело каждой задачи статики состояло из одного и того же материала.

Для задачи статического анализа с нагрузкой «Крутящий момент» все входные данные остались неизменными (см. выше).

Для задачи статического анализа с нагрузкой «Сила» неизменными остались закрепление детали и характеристики материала, изменилась нагрузка. Параметры нагрузки приведены ниже:

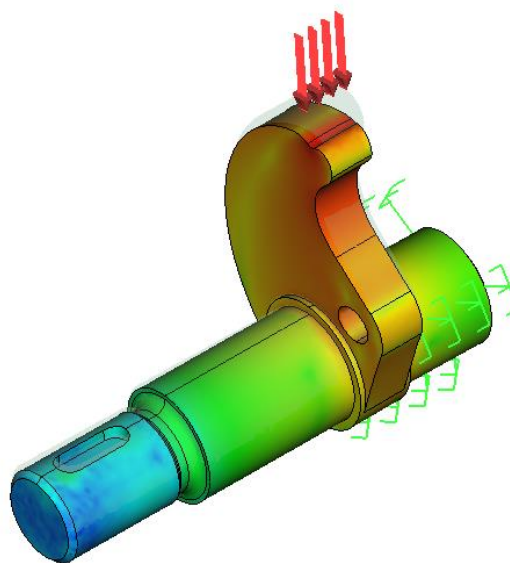
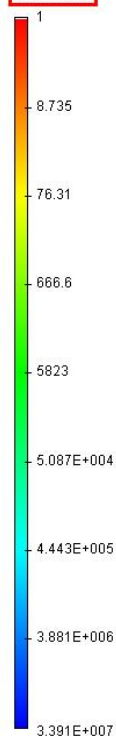


Величина нагрузки «Сила» равна 3000 Н

После выполнения расчёта необходимо проанализировать полученные результаты. Рассмотрим «Коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям».

К-т запаса по эквивалентным напряжениям
Масштаб перемещений: 369.11

Min = 1.162



Минимальное значение коэффициента запаса больше 1, следовательно, при статическом нагружении деталь не разрушится. Тогда имеет смысл рассматривать действие циклически изменяющихся нагрузок на данное изделие.

Анализ усталости

Теперь, выполнив анализ детали на статическую прочность, можем перейти к расчёту усталостной прочности.

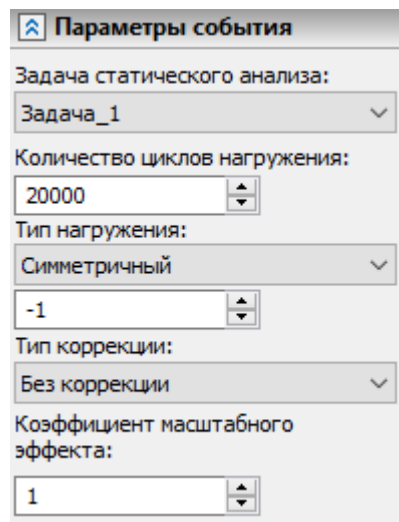
Пусть теперь на деталь действует циклически изменяющиеся нагрузки: «Крутящий момент» и «Сила». Циклы нагружения в дальнейшем зададим как симметричный ($R = -1$) и пульсационный ($R = 0$) соответственно. Амплитуды циклов нагружений будут определены из рассчитанных в статическом анализе напряжений.

Создадим задачу Анализа усталости.

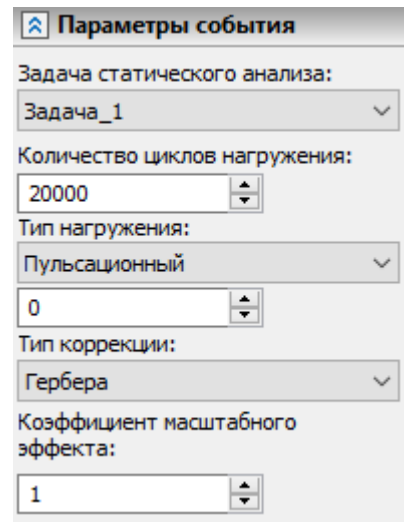
Создадим два события: для нагрузки «Крутящий момент» и «Сила».

Для нагрузки «Крутящий момент» задаем параметры такие же, как и при одно-событийном расчете.

Для нагрузки «Сила» на вкладке «Параметры события» выберем рассчитанную статическую задачу с соответствующей нагрузкой и зададим параметры циклического нагружения: количество циклов, тип нагружения, метод коррекции напряжений, коэффициент масштабного эффекта (коэффициент масштабирования напряжений). На рисунках показаны параметры циклических нагрузок.



Крутящий момент



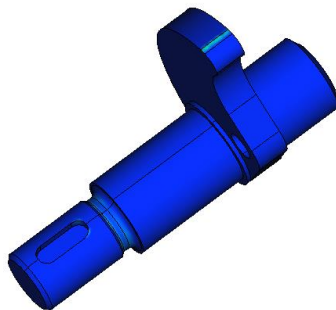
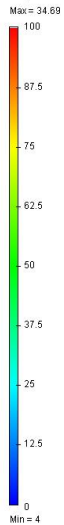
Сила

Результаты расчёта

Для многособытийного анализа усталости получаем только одну группу результатов расчёта: «Выработанный ресурс».

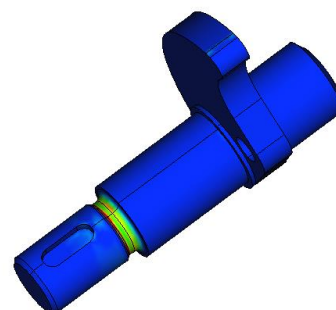
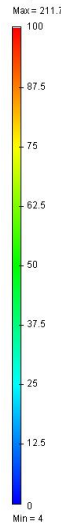
Красные зоны на модели соответствуют участкам с повреждением на 100% и свидетельствуют о недостаточной устойчивости к действию циклических нагрузок в этих участках конструкции. На рисунках показаны поля выработанного ресурса.

Выработанный ресурс по главным напряжениям, %



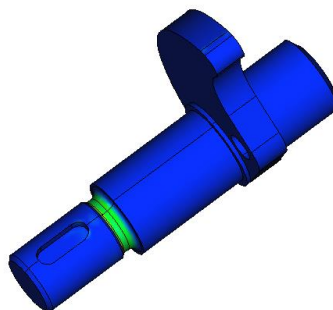
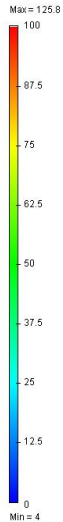
По главным напряжениям

Выработанный ресурс по интенсивности напряжений, %



По интенсивности напряжений

Выработанный ресурс по эквивалентным напряжениям, %



По эквивалентным напряжениям

4.3. ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ

Конфигурация **динамического анализа** системы конечно-элементного моделирования T-FLEX Анализ предназначен для расчёта, изменяющегося во времени напряжённого состояния объёмных конструкций в среде T-FLEX CAD. Конфигурация работает непосредственно с трёхмерными моделями T-FLEX CAD и обычно не требует отдельных дополнительных построений для расчёта трёхмерной модели.

4.3.1. СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ

Функционал частотного анализа предназначен для расчёта собственных (резонансных) частот колебаний конструкций и соответствующих им форм колебаний. Задача расчёта собственных частот и соответствующих им форм колебаний возникает во многих практических случаях анализа динамического поведения конструкции под действием переменных нагрузок. Наиболее распространена ситуация, когда при проектировании возникает необходимость убедиться в малой вероятности возникновения в условиях эксплуатации такого механического явления, как резонанс. Как известно, суть резонанса заключается в значительном (в десятки раз и более) усилении амплитуд вынужденных колебаний на определённых частотах внешних воздействий – т.н. резонансных частотах. В большинстве случаев возникновение резонанса является нежелательным явлением с точки зрения обеспечения надёжности изделия. Проверка спектральных свойств конструкции на возможность резонансов в рабочем диапазоне частот внешних воздействий на стадии проектирования позволяет внести в конструкцию изменения, способные изменить спектр собственных частот. Это позволит избежать или значительно уменьшить вероятность появления резонансов в процессе эксплуатации. Таким образом, условие виброустойчивости по критерию собственных частот может быть сформулировано так:

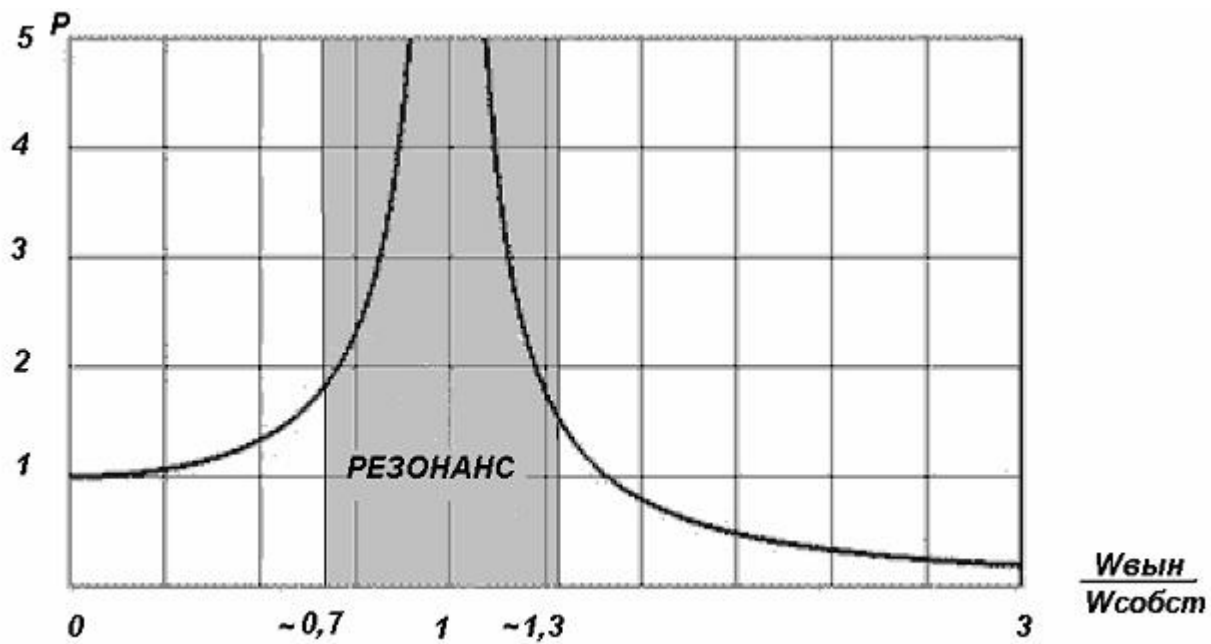
Собственные частоты конструкции должны лежать за пределами диапазона частот внешних воздействий:

$$f_i \notin [0.7f_{\min}^{\text{возд}}; 1.3f_{\max}^{\text{возд}}]$$

где

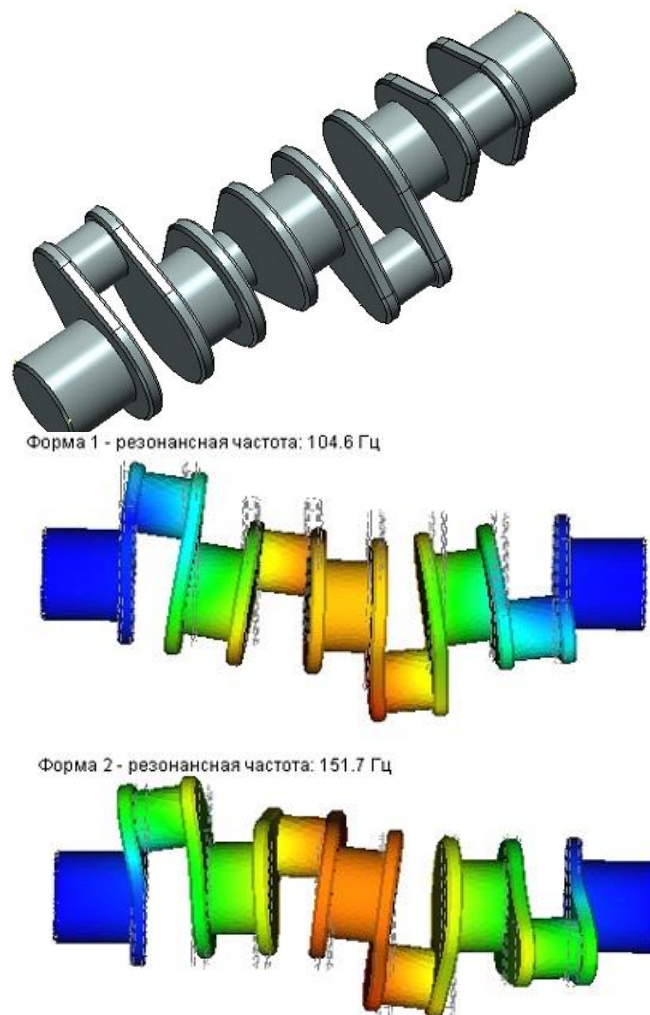
f_i – i -я собственная частота конструкции. Обычно, наибольшую опасность представляют резонансы на нижних собственных частотах ($i \leq \sim 5$), т.к. именно на них аккумулируется большая часть механической энергии;

$f_{\min}^{\text{возд}}$ – нижняя и верхняя частота известного диапазона внешних вибрационных воздействий.



Изменение коэффициента усиления амплитуд в зависимости от отношения частоты собственных колебаний и внешнего воздействия в системе с недостаточным демпфированием

Оценив спектр собственных частот колебаний конструкции на стадии проектирования, можно оптимизировать конструкцию с целью достижения условия частотной виброустойчивости. Для увеличения собственных частот необходимо придать конструкции больше жёсткости и (или) уменьшить её массу. Например, для протяжённого объекта можно повысить жёсткость, уменьшив длину или увеличив толщину объекта. Для уменьшения собственной частоты изделия необходимо, напротив, прибавить массу или уменьшить жёсткость объекта.



Таким образом, осуществляя с помощью конфигурации частотного анализа расчёт резонансных частот конструкции на этапе проектирования и оптимизируя массо-жесткостные свойства изделия, пользователь может повысить надёжность разрабатываемой конструкции с точки зрения её виброустойчивости и вибропрочности.

Подробнее о:

[Поступательные и вращательные компоненты. Доминирующие формы колебаний.](#)
[Особенности использования при анализе сейсмостойкости. Сумма модальных масс](#)

Основные темы в этом разделе:

[Этапы](#)

[Параметры расчёта](#)

4.3.1.1. ЭТАПЫ

Частотный анализ осуществляется в несколько этапов. Последовательность действий пользователя по подготовке задачи и выполнению частотного расчёта конструкции во многом схожа с алгоритмом, описанным для Статического анализа. Поэтому в данном разделе отметим только некоторые особенности, характерные для расчёта на устойчивость.

Шаг 1. Создание «Задачи»

При создании задачи нужно указать её тип - «**Собственные частоты**» в окне параметров команды.

Шаг 2. Наложение граничных условий

В задаче частотного анализа роль граничных условий выполняют только закрепления. Задание закреплений является обязательным условием выполнения корректного частотного расчёта. Суммарно наложенные на перемещение тела ограничения должны удовлетворять следующему условию.

Для обеспечения частотного анализа модель должна иметь закрепление, исключающее её свободное перемещение в пространстве, как твёрдого тела. Невыполнение этого условия приведёт к неверным результатам конечно-элементного моделирования или завершению вычислительного процесса.

У частичных закреплений можно задавать только нулевую величину, т.е. только фиксировать степени свободы. Задавать перемещения нельзя.

Шаг 3. Расчёт

Перед выполнением расчёта пользователь должен задать количество собственных частот и, если необходимо, уточнить алгоритмы расчёта.

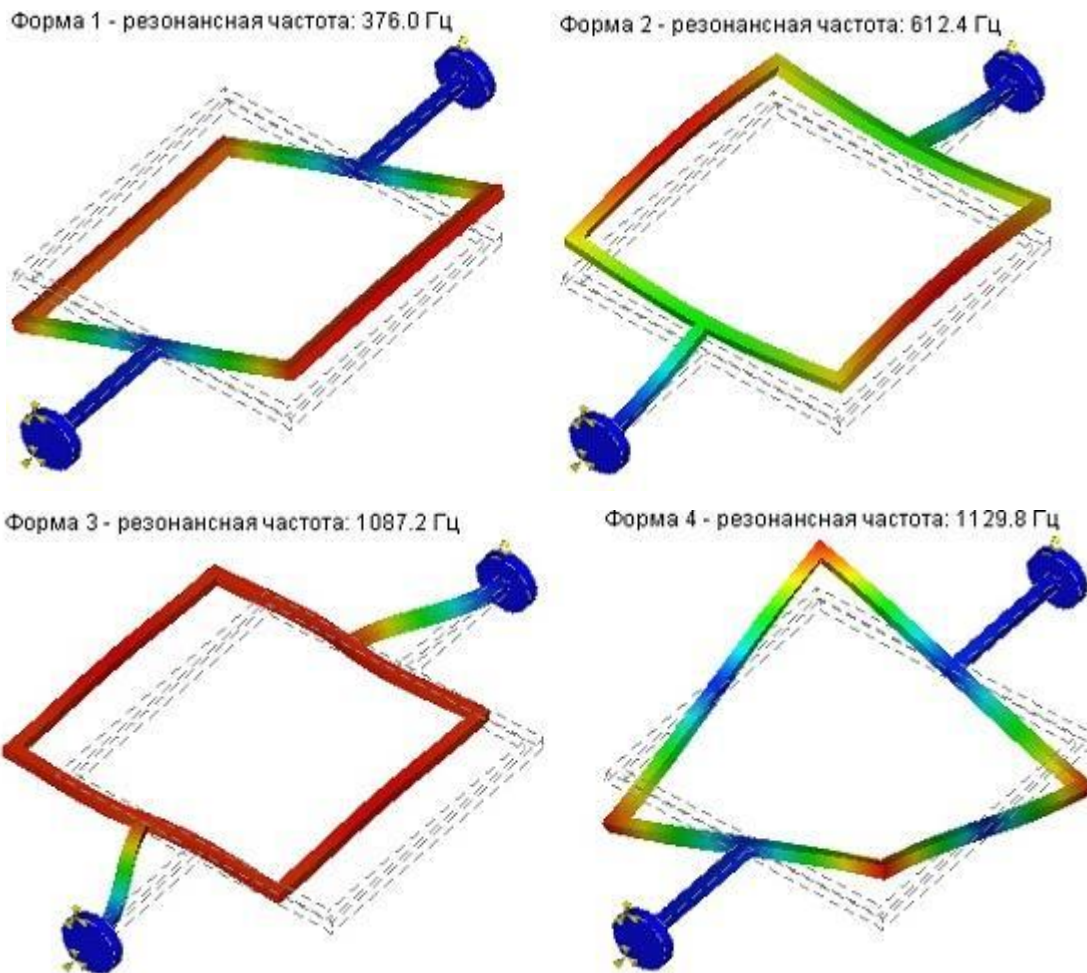
Шаг 4. Анализ результатов частотного расчёта

Результатами частотного анализа являются.

Частота собственных колебаний (Гц) - соответствует ожидаемой резонансной частоте конструкции. Теоретически количество собственных частот для любого тела бесконечно. В результатах отображаются только частоты для выбранных форм собственных колебаний.

Форма собственных колебаний, соответствующая данной частоте. Поясним физический смысл понятия «форма колебания». Форма колебаний показывает, какие относительные деформации (перемещения) будет испытывать конструкция, в случае возникновения резонанса на соответствующей собственной частоте. Обратим особое внимание, что формы колебаний, отображаемые в окне Постпроцессора после завершения расчёта, представляют собой относительные амплитуды колебаний. Анализируя эти формы, можно сделать заключения о характере резонансных перемещений, но не об их фактической амплитуде. Зная ожидаемую форму колебаний на некоторой собственной частоте, можно, например, задать дополнительное закрепление или опору в области конструкции, соответствующей максимуму данной формы колебаний, что приведёт к эффективному изменению спектральных свойств изделия.

По умолчанию формы колебаний отображаются в окне постпроцессора без цветовой окраски, которую можно включить в параметрах визуализатора.



Отметим, также, что при анализе характера движения, осуществляемого конструкцией на определённой частоте, удобно использовать анимацию. Напомним, что для запуска процесса анимации нужно в параметрах окна результатов расчёта (доступ по   в окне постпроцессора) активировать элемент управления «Фоновая анимация» и указать желаемые параметры анимации.

4.3.1.2. ПАРАМЕТРЫ РАСЧЁТА

Закладка "Описание задачи"

На закладке **Описание задачи** можно определить или изменить описательные параметры текущей задачи: имя, тип задачи, комментарий.

Закладка "Анализ собственных частот"

На закладке **Анализ собственных частот** можно задать свойства процессора для решения уравнений.

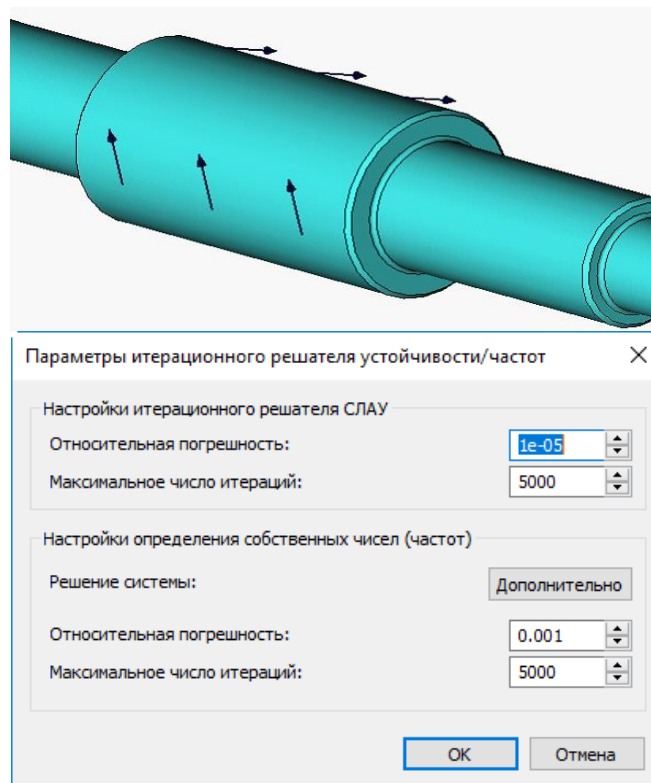
Группа «Метод расчёта»

Автоматический выбор. Метод решения уравнений выбирается системой автоматически исходя из общего количества уравнений. По умолчанию пороговое значение равно 100 000

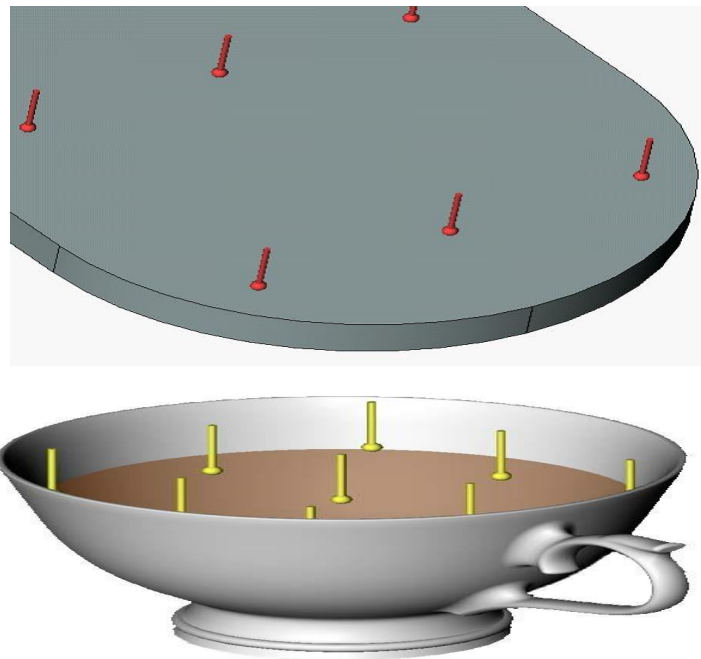
уравнений (степеней свободы) и задаётся на странице Установки > Препроцессор. Если общее число уравнений превышает заданное значение, для решения уравнений используется итерационный метод, в противном случае система решается прямыми методами.

Прямой. Система уравнений решается методом Гаусса, что занимает большее количество оперативной памяти в сравнении с итерационным методом. Если имеется достаточное количество оперативной памяти, то решение этим методом достигается быстрее, чем итерационным. Предпочтителен для небольших задач с числом степеней свободы менее 100 000, однако в зависимости от доступной оперативной памяти это число может быть увеличено. Также предпочтителен для решения линейным конечным элементом. Нажатие на кнопку **Настройка** приводит к открытию окна свойств прямого частотного решателя, в котором можно установить относительную погрешность нахождения критических нагрузок и число итераций Ланцоша (см ниже).

Итерационный. Система уравнений решается итерационными методами, не требующими полного обращения матрицы, что занимает меньше оперативной памяти. Время расчёта примерно пропорционально числу искомых собственных форм. Если сетка конечных элементов содержит много элементов, имеющих неоптимальную форму, т.е. вытянутых, то скорость схождения существенно замедляется. Нажатие на кнопку **Настройка** приводит к открытию окна свойств итерационного решателя устойчивости/частот, в котором можно установить относительную погрешность решения СЛАУ (невязку) и максимальное число итераций в группе настройки итерационного решателя СЛАУ; в группе настройки определения собственных чисел (частот) можно установить относительную погрешность нахождения собственных частот и максимальное число итераций определения собственных чисел (см ниже).



При нажатии на кнопку **Дополнительно** для любого из методов можно указать возможность использования дополнительной дисковой памяти: автоматически, запрещено, принудительно.



Группа "Спектр собственных частот"

Количество собственных частот. Пользователь может указать количество нижних собственных частот конструкции, подлежащих определению.

Диапазон поиска собственных частот. Если частоты ищутся в определённой области спектра: требуется указать верхнюю и нижнюю границы поиска (вычисления тем точнее, чем больше собственных частот оказываются в этом диапазоне).

Игнорировать механические нагрузки. Исключение нагрузок из расчёта, в противном случае собственные частоты будут искажаться для напряжённого состояния конструкции.

Незакреплённая система. Опция необходима в случае, если ограничений, приложенных к модели, не достаточно, чтобы исключить её свободное перемещение в пространстве.

Не рассчитывать собственные формы. Опция ускоряет расчёт и экономит память.

Группа "Метод конечных элементов"

Производить расчёт линейным элементом. Опцию можно использовать в том случае, если пользователь заинтересован в получении качественных результатов, т.е. его интересуют лишь относительные распределения амплитуд форм колебаний.

Обращаем внимание, что расчёт линейным элементом обеспечивает недостаточную точность определения значений собственных частот. Значения частот при расчёте линейным конечным элементом могут быть значительно больше значений, получаемых при расчёте более точными методами. Рекомендуется для количественной оценки собственных частот использовать расчёт только квадратичным элементом (режим по умолчанию).

Диагонализация матрицы масс. Данный режим позволяет уменьшить количество требуемой памяти для решения системы линейных алгебраических уравнений. При этом точность полученных результатов становится незначительно меньше.

Закладка "Термоэффекты"

На закладке **Термоэффекты** определяются параметры учета влияния изменения температуры конструкции на возникновение внутренних напряжений и изменение свойств материалов.

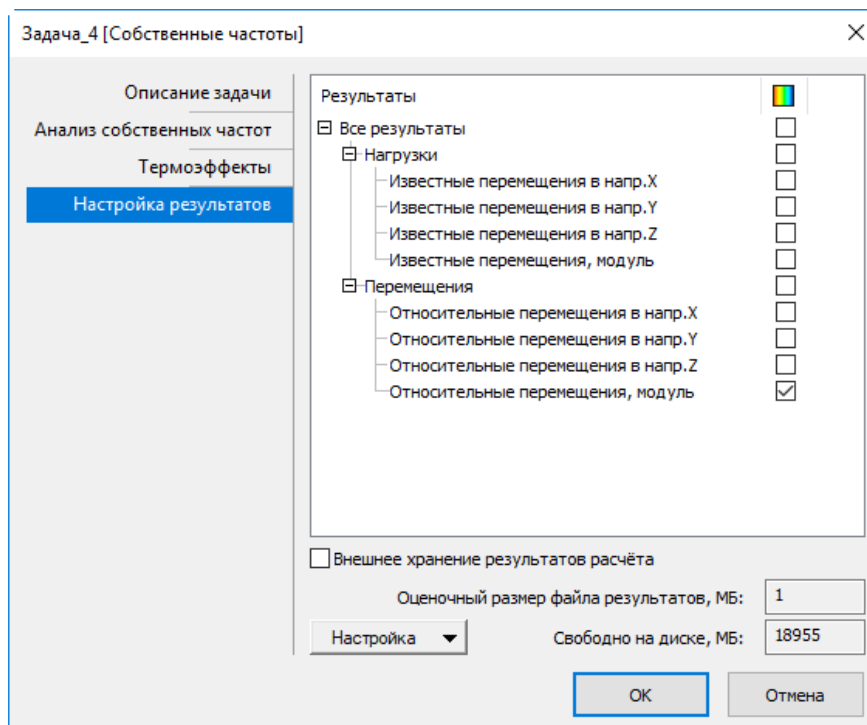
Учитывать термоупругость. Учёт влияния температурных напряжений на изменение жесткости конструкции и изменение величины собственных частот, в противном случае собственные частоты будут искажаться без учета тепловых напряжений

Учитывать изменение физических свойств от температуры. Свойства материала будут "считаны" с графиков зависимостей параметров материалов задачи от температуры, заданных в свойствах каждого материала.

Обе опции могут учитываться совместно или порознь. Остальные параметры на этой закладке работают также, как в задачах статического анализа.

Закладка "Настройка результатов"

На закладке **Настройка результатов** определяются типы результатов, отображаемых в дереве задач после завершения расчёта. В частотном расчете для пользователя доступны только относительные перемещения – либо модуль, либо в направлении соответствующих осей глобальной системы координат.



Анализ вынужденных колебаний проводится для предсказания поведения конструкции под действием внешних воздействий, изменяющихся по гармоническому закону. Внешние воздействия включают в себя силовое и/или кинематическое возбуждение. Кроме того, может учитываться влияние демпфирования системы.

Примером гармонической вынуждающей силы может служить вращение вала или шпинделя, имеющего дисбаланс, на упругих опорах. Кинематическое возбуждение применяется в тех случаях, когда не известны величины вынуждающих сил, но известны амплитуды колебаний некоторых элементов конструкции.

Целью анализа вынужденных колебаний является получение зависимости отклика системы от частоты вынуждающих воздействий.

Результатами расчета являются амплитуды перемещений, виброускорения и виброперегрузки на заданной вынуждающей частоте. По результатам расчета для диапазона частот могут быть получены зависимости амплитуд и виброускорений от частоты вынуждающих воздействий, что важно при оценке виброустойчивости системы в заданном диапазоне частот.

Конфигурация «**Вынужденные колебания**» системы конечно-элементного моделирования T-FLEX Анализ может использоваться для анализа установившихся вынужденных колебаний следующих типов:

- Вынужденные колебания системы без учета демпфирования под действием гармонической вынуждающей силы.
- Вынужденные колебания системы с учетом демпфирования под действием гармонической вынуждающей силы.
- Вынужденные колебания системы обоих указанных типов.

На систему может быть приложено несколько вынуждающих сил и/или перемещений опор, но при этом их частоты должны быть равны.

Результатами расчета в конфигурации «**Вынужденные колебания**» являются следующие величины:

- Амплитуды перемещения в узлах конечно-элементной сетки U_m .
- Виброускорения в узлах конечно-элементной сетки, выражающиеся через амплитуды U_m как $\ddot{U}_m = U_m \omega_{\text{вын}}^2$.
- Виброперегрузки, определяемые как отношение виброускорения к ускорению свободного падения $\ddot{U}_m/g$.

Подробнее о:

[Вынужденные колебания системы с учётом и без учёта демпфирования под действием гармонической вынуждающей силы. Влияние демпфирующих сил.](#)

Основные темы в этом разделе:

- [Этапы](#)
- [Параметры расчёта](#)
- [Оценка результатов](#)

Анализ вынужденных колебаний осуществляется в несколько этапов. Последовательность действий пользователя по подготовке задачи и выполнению данного типа анализа во многом схожа с алгоритмом, описанным для анализа прочности. Поэтому в данном разделе отметим только некоторые особенности, характерные для расчета вынужденных колебаний.

Шаг 1. Создание «Задачи».

При создании задачи нужно указать ее тип – «**Вынужденные колебания**» в окне параметров команды.

Шаг 2. Наложение граничных условий

В анализе вынужденных колебаний, как и в анализе прочности, роль граничных условий выполняют закрепления и нагрузки. В данном типе анализа могут использоваться все типы закреплений и все виды силовых нагрузок. Задание закреплений и силовых нагрузок является обязательным условием выполнения корректного расчёта. Суммарно наложенные на перемещение тела ограничения должны удовлетворять следующему условию:

Для обеспечения анализа прочности модель должна иметь закрепление, исключающее её свободное перемещение в пространстве как твёрдого тела. Невыполнение этого условия приведёт к неверным результатам конечно-элементного моделирования или завершению вычислительного процесса. Кроме того, кинематическая нагрузка «осциллятор» может заменять частичные или полные закрепления.

Шаг 3. Выполнение расчёта

Перед выполнением расчёта пользователь указывает в параметрах задачи значения частот воздействия нагрузок, для которых будет выполняться анализ вынужденных колебаний, а также величину демпфирования.

Шаг 4. Получение и анализ результатов

Результатами анализа вынужденных колебаний являются: амплитуды перемещений, виброускорения или виброперегрузки, фазы колебаний. Существует возможность визуализации деформированного состояния конструкции в различных фазах.

4.3.2.2. ПАРАМЕТРЫ РАСЧЁТА

Задание ограничений. Модель может быть ограничена как полными, так частичными ограничениями. При задании частичных ограничений не допускается задание перемещений, отличных от нулевых значений.

Задание силовых нагрузок. Для задания амплитуды силовых нагрузок можно приложить к граням, ребрам или вершинам модели (ускорение может быть приложено и к телам) следующие типы нагрузок:

- Сила,
- Давление,
- Ускорение,
- Цилиндрическая нагрузка,
- Момент.

На систему тел могут действовать одновременно несколько нагрузок, но все они будут иметь одинаковую частоту. Для всех типов разрешенных нагрузок может задаваться начальная фаза колебаний.

Задание кинематических нагрузок (осциллятор). Для задания амплитуды колебания основания необходимо приложить к элементам модели нагрузку осциллятор, которая может быть применена вместо полного или частичного закрепления. Нагрузка прикладывается к граням, ребрам, вершинам тел, а также может прикладываться к отдельным телам сборочной модели. Для указания направления колебаний в команде выбирается ЛСК, а само направление указывается установкой галочки, соответствующей оси ЛСК.

Тип кинематической нагрузки выбирается из выпадающего списка и может быть следующим:

- Амплитуда перемещений точек,
- Скорость,
- Ускорение,
- Перегрузка (g).

В отдельном поле можно задать сдвиг фазы, измеряемый в градусах либо радианах.

При сочетании нагрузки осциллятора с частичными закреплениями для одного и того же элемента модели направления колебаний и ограничений должны различаться.

Закладка «Описание задачи»

Можно определить или изменить описательные параметры текущей задачи: имя, тип задачи, комментарий.

Закладка «Здание частот колебаний»

На закладке производятся основные настройки анализа вынужденных колебаний.

Задача_4 [Вынужденные колебания]

Описание задачи

Задание частот колебаний

Анализ вынужденных колебаний

Термозффекты

Настройка результатов

Частота внешнего воздействия

☒ Значения частот, Гц:

13.51

4..20 (4)

Добавить

Изменить

Удалить

Очистить

Импорт

☐ Использовать результаты частотного анализа

Демпфирование

Коэффициент пропорциональности массы:

0.02

Коэффициент пропорциональности жёсткости:

0.003531

Далее >

Отмена

В группе параметров **Частота внешнего воздействия** устанавливаются значения частот воздействия внешних нагрузок. Добавить новые значения частот можно несколькими способами.

Кнопка **Добавить** позволяет добавлять как единичное значение частоты, так и диапазон частот, в котором указывается начальное значение, конечное значение и шаг приращения.

Кнопка **Импорт** вызывает диалоговое окно, в котором из результатов заранее выполненного частотного анализа можно импортировать значения резонансных частот.

В случае, когда необходимо выполнить расчет вынужденных колебаний только на всех резонансных частотах, определенных в предварительно выполненном частотном анализе, следует активировать элемент управления - **Использовать результаты частотного анализа**. Здесь поддерживается ассоциативная связь с результатами выбранного частотного анализа, т.е. при изменении результатов частотного анализа, значения обновленных собственных частот будут автоматически использованы при анализе вынужденных колебаний.

Над существующим списком значений частот доступны следующие операции редактирования. Кнопка **Изменить** позволяет переписать значение одной конкретной частоты. Кнопка **Удалить** удаляет выделенное значение частоты из списка. Кнопка **Очистить** очищает весь список значений частот.

В группе параметров **Демпфирование** устанавливается величина коэффициентов демпфирования конструкции.

Закладка «Анализ вынужденных колебаний»

Позволяет задать свойства процессора для решения системы уравнений. Параметры, определяющие настройки процессора, полностью аналогичны параметрам анализа прочности.

Закладка «Термоэффекты»

На этой закладке определяются параметры учета влияния изменения температуры конструкции на изменение свойств материалов.

The screenshot shows a software dialog box titled "Задача_4 [Вынужденные колебания]". On the left is a sidebar with five tabs: "Описание задачи", "Задание частот колебаний", "Анализ вынужденных колебаний", "Термоэффекты" (which is selected and highlighted in blue), and "Настройка результатов". The main area of the dialog is divided into two sections. The top section contains two checkboxes: "Учитывать термоупругость" (unchecked) and "Учитывать изменение физических свойств от температуры" (checked). Below these is a section titled "Ненапряженное состояние" with a label "Температура нулевых деформаций:" and a numeric input field set to "298". The bottom section is titled "Температурные поля" and contains three radio button options: "Равномерная температура:" (selected, with a value of "298"), "Использовать заданные температуры" (with a note "Температуры должны быть заданы с помощью команды 'Температура' тепловых нагрузок."), and "Использовать результаты теплового анализа:" (with a dropdown menu). Below these is a "Время:" label with another dropdown menu. At the bottom right are two buttons: "Далее >" and "Отмена".

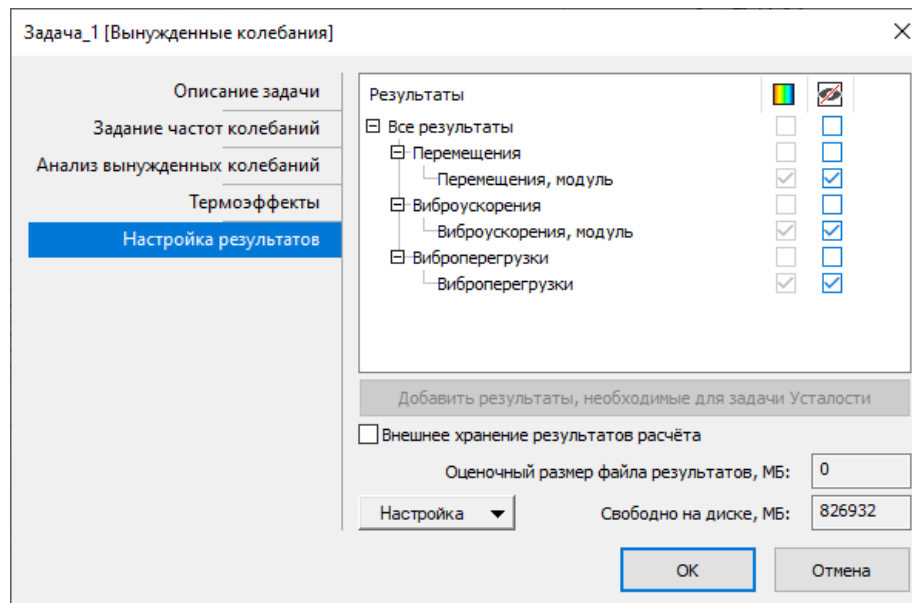
Если включена опция **Учитывать изменение физических свойств от температуры**, то свойства материала будут считаны с графиков зависимостей параметров материалов задачи от температуры, заданных в свойствах каждого материала.

Остальные параметры на этой закладке работают так же, как в задачах анализа прочности.

Закладка «Настройка результатов»

Позволяет определить типы результатов, отображаемых в дереве задач после завершения расчёта.

После выполнения расчёта, в дереве задач появляется новая папка «Результаты». Указать список отображаемых результатов можно на вкладке **Настройка результатов** диалога параметров задачи. Система выдает следующие типы результатов, сгруппированные в 4 группы:



Группа **Нагрузки** включает в себя следующие результаты.

- Приложенные к конечно-элементной модели компоненты.
- Модуль нагрузок, приведенных к узлам (этот тип результата представляет собой справочную информацию).

Группа **Перемещения** включает в себя.

- Перемещения точек конечно-элементной модели с учетом сдвига фазы относительно фазы возбудителя в направлении осей глобальной СК: $U_x = (ReU_x^2 + ImU_x^2)^{1/2}$, $U_y = (ReU_y^2 + ImU_y^2)^{1/2}$, $U_z = (ReU_z^2 + ImU_z^2)^{1/2}$, а также модуль перемещения $U = (U_x^2 + U_y^2 + U_z^2)^{1/2}$.
- Действительной части перемещений в направлении осей глобальной СК: $Re(U_x)$, $Re(U_y)$, $Re(U_z)$, а также модуль действительной части перемещений $ReU = (ReU_x^2 + ReU_y^2 + ReU_z^2)^{1/2}$.
- Мнимой части перемещений в направлении осей глобальной СК: $Im(U_x)$, $Im(U_y)$, $Im(U_z)$, а также модуль мнимой части перемещений $ImU = (ImU_x^2 + ImU_y^2 + ImU_z^2)^{1/2}$.
- Амплитуды перемещений точек конечно-элементной модели (без учета сдвига фазы относительно фазы возбудителя) в направлении осей глобальной СК: U_{xm} , U_{ym} , U_{zm} , а также модуль амплитуды $U_m = (U_{xm}^2 + U_{ym}^2 + U_{zm}^2)^{1/2}$.
- Углы фазы для компонентов перемещений точек конечно-элементной модели в направлении осей глобальной СК относительно фазы возбудителя

$$\varphi_{U_x} = \arctg\left(\frac{ImU_x}{ReU_x}\right), \quad \varphi_{U_y} = \arctg\left(\frac{ImU_y}{ReU_y}\right), \quad \varphi_{U_z} = \arctg\left(\frac{ImU_z}{ReU_z}\right), \quad \text{а также модуль фазового}$$

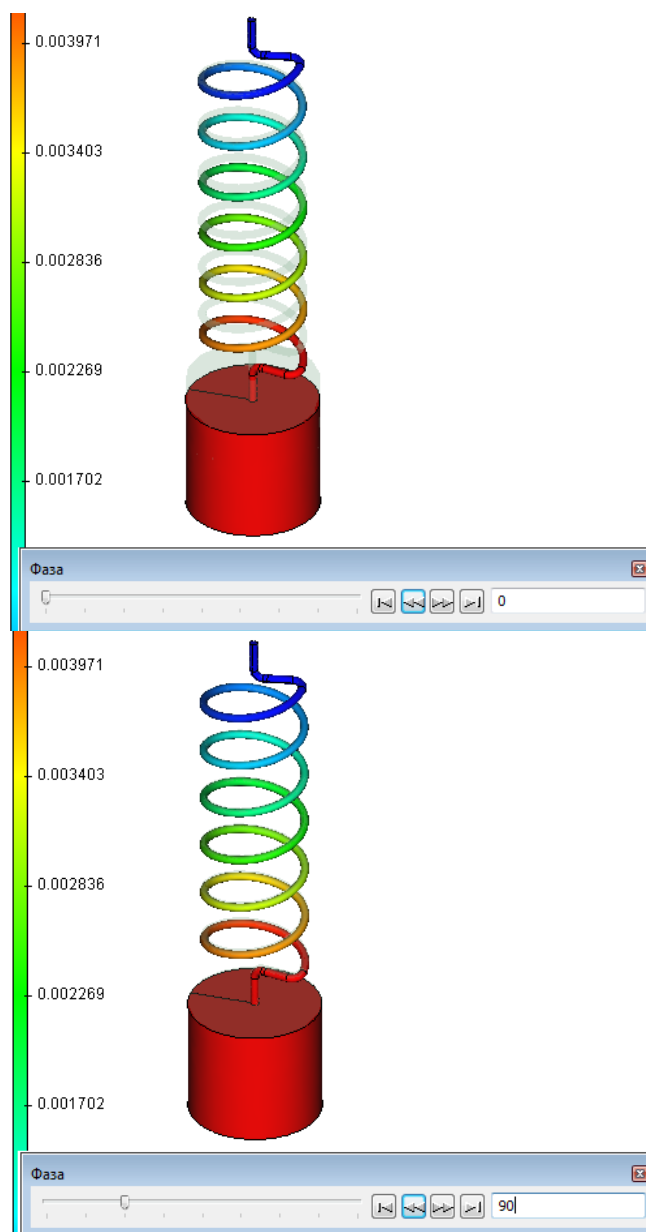
$$\text{угла } \varphi_U = \arctg\left(\frac{ImU}{ReU}\right).$$

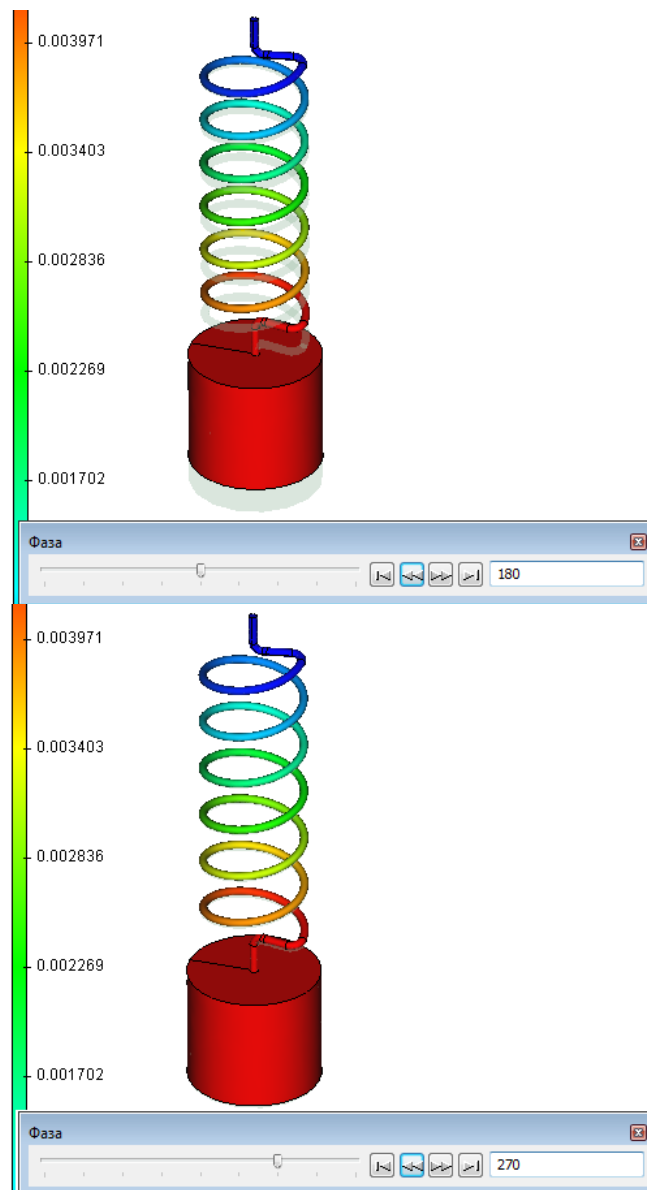
В случае если задан сдвиг фаз, можно вывести эпюры отдельно действительной и мнимой составляющей перемещений, а также абсолютное значение фазы в точках конечно-элементной модели.

Группа **Виброускорения**. Можно отметить вывод эпюр амплитуд вибрационных ускорений точек конечно-элементной модели $\ddot{U}_m = U_m \omega_{\text{вын}}^2$. Фаза виброускорений отличается на 180° (π рад) от фазы перемещений.

Группа **Виброперегрузки** можно отметить вывод эпюр вибрационных перегрузок $\ddot{U}_m/g$, измеряемых по отношению к ускорению свободного падения.

После открытия окна результатов в постпроцессоре становится доступным элемент управления фазой, который позволяет отслеживать изменение формы конструкции на разных фазах развития колебательного процесса.





Фаза регулируется перемещением ползунка или вводом значения в числовое поле. Для получения АЧХ необходимо создать как минимум один датчик (см. [Использование датчиков для анализа результатов](#)) и шаблон графика, содержащего один датчик. После этого можно создать АЧХ для точки, в которой определен датчик, выбрав в контекстном меню результатов анализа вынужденных частот (правой кнопкой мыши) пункт - **Показать график**. Будет показан график для выбранного в поле **Конфигурации датчиков** датчика. Таким образом, можно проследить изменение АЧХ при переходе от датчика к датчику. С другой стороны, если создано несколько датчиков, то можно отобразить одновременно на одном графике все кривые, показывающие изменение величины результата (например, перемещения или ускорения) на данной частоте при переходе от одного датчика к другому датчику – для всех частот. Чтобы это осуществить нужно подготовить шаблон графика, включающего в себя все датчики.

4.3.3. ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ

В динамическом анализе механическая система рассматривается под действием изменяющихся во времени внешних воздействий - приложенных к системе сил, давлений, ускорений и т.п. Примерами задач динамического анализа силы может служить раскрутка вала или шпинделя, проезд автомобиля по мосту, сейсмические колебания, насыпание бункера песком и т.д. При этом напряженное состояние механической системы также будет изменяться во времени и во многих практических случаях анализ таких ситуаций имеет важное значение, т.к. динамические напряжения и силы инерции могут оказывать значительное влияние на общую работоспособность механической системы. В результате решения динамической задачи мы получаем в основном те же самые результаты расчёта, как и в статическом анализе (перемещения, напряжения, коэффициент запаса), но каждый результат представлен для определенного момента времени, соответствующего заданному временному интервалу и конкретному временному шагу. У пользователя системы есть возможность увидеть изменение деформаций и напряжений системы во времени и предсказать поведение системы под действием сложной системы изменяющихся во времени внешних воздействий.

Условие динамической прочности в общем случае формулируется следующим образом.

Напряжения $\sigma_{дин}$, возникающие в конструкции под действием приложенных к ней внешних сил, должны быть меньше допускаемых напряжений $[\sigma]$ для данного конструкционного материала с учётом коэффициента запаса $K_{зап}$ по динамической прочности

$$\sigma_{дин} \cdot SF \leq [\sigma]$$

Т.е. как и в статическом анализе основными практическими результатами расчета являются перемещения, напряжения, коэффициент запаса в функции времени.

Математическая формулировка динамической задачи методом конечных элементов определяется системой, следующим образом:

$$[M][\ddot{U}] + [C][\dot{U}] + [K][U] = \{F(t)\},$$

где:

$[M]$ - матрица массы системы,

$[K]$ - матрица жёсткости системы,

$\{F(t)\}$ - вектор обобщенных сил, приложенных в узлах системы,

$[C]$ - матрица демпфирования,

U - вектор обобщенных перемещений в узлах системы,

$\ddot{U}, \dot{U}$ - векторы обобщенных скоростей и ускорений в узлах системы.

С точки зрения математической реализации есть два основных подхода к решению систем уравнений, возникающих при описании динамических задач: **метод суперпозиции мод** и **метод прямого интегрирования**.

В разделе приведены примеры решения задачи с одинаковой постановкой методом суперпозиции мод ([линейная динамическая задача](#)) и методом прямого интегрирования ([динамический нестационарный процесс](#)). По результатам, полученных при решении, можно сделать вывод, что оба метода решения динамической задачи приводят к одинаковому результату и могут использоваться для решения динамических задач.

Входные данные для динамического расчета отличаются в зависимости от типа задачи. Рассмотрим настройки каждого типа динамических задач отдельно.

Линейная динамическая задача

В методе **модальной суперпозиции** (в русскоязычной литературе этот метод также называется разложение по собственным формам колебаний) осуществляется преобразование системы, состоящей из N связанных дифференциальных уравнений движения в эквивалентную систему из n независимых обыкновенных дифференциальных уравнений. Для этого предварительно вычисляют собственные частоты и формы колебаний системы. Затем, используя основополагающие свойства форм колебаний, систему, состоящую из многих тысяч или миллионов уравнений, преобразуют в систему независимых дифференциальных уравнений размерностью, равной количеству форм колебаний, выбранных для разложения. Результирующее решение системы представляется в виде суммы форм колебаний, использованных для разложения, с вычисленными весовыми коэффициентами. Достоинством метода является его вычислительная эффективность на этапе решения динамической задачи, т.к. решение редуцированной системы уравнений значительно эффективнее, чем решение полной системы уравнений. Однако необходимо учитывать, что предварительное вычисление собственных частот и форм колебаний само по себе относится к ресурсоемким задачам, что нужно принимать во внимание при выборе метода решения динамической задачи. Еще одним важным ограничением метода суперпозиции мод является невозможность его использования для решения нелинейных задач.

Точность метода в общем случае зависит от выбранных для разложения форм колебаний и их количества. Количество собственных форм, минимально необходимых для точного расчета находится в пределах 10-15 в зависимости от сложности модели и характера моделируемого воздействия. Чем больше их количество, тем точнее результат, но, соответственно, увеличивается время расчета.

В целом этот тип задач можно рекомендовать для моделирования линейных динамических процессов длительных во времени. При правильно выбранных типах и количестве форм колебаний метод обеспечивает удовлетворительную точность и эффективность решения.

Перед расчетом линейной динамической задачи пользователь должен определить **собственные формы колебаний**, по которым будет осуществляться разложение. Это можно сделать двумя способами:

- На закладке **Расчёт** в пункте **"Использовать результаты частотного анализа"** подключить заранее рассчитанную задачу частотного анализа (тип задачи: **«Собственные частоты»**). Все собственные формы из подключенной задачи будут использоваться для нахождения решения методом суперпозиции мод.
- Включить режим расчета собственных форм непосредственно в динамической задаче. При этом нужно указать количество собственных форм. Остальные элементы управления в основном совпадают с соответствующими настройками частотного анализа.

Задача_4 [Суперпозиция мод]

Описание задачи

Свойства динамического анализа

Свойства расчёта частот

Параметры демпфирования

Настройка результатов

Метод расчёта

- ☒ Автоматический выбор
- ☐ Прямой
- ☐ Итерационный

Настройка

Настройка

Спектр собственных частот

Количество нижних собственных частот: 1

☐ Незакреплённая система

Метод конечных элементов

Тип элемента: Квадратичная интерполяция

Рекомендуется для осуществления расчёта без использования количественных данных для оценки собственных частот

☐ Диагонализация матрицы масс

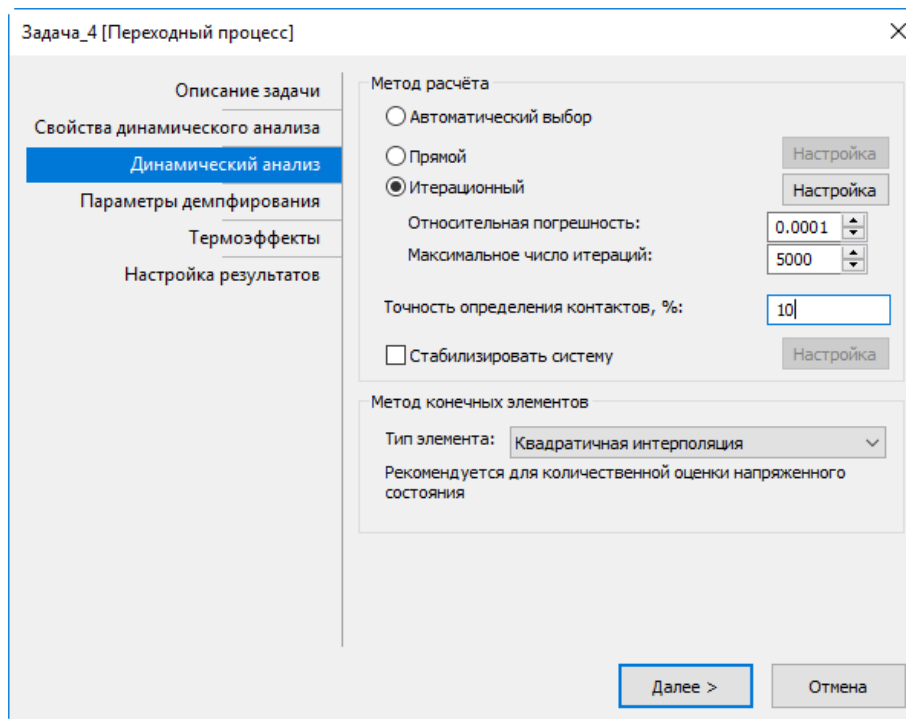
Далее >

Отмена

Динамический нестационарный процесс

В методе прямого численного интегрирования решение системы ищут, численно интегрируя уравнения по времени. На каждом временном шаге решается полная система уравнений, поэтому метод достаточно ресурсоёмкий.

Этот тип задач можно рекомендовать для расчета короткопериодических динамических процессов. Решение получается точным, но требует повышенных вычислительных ресурсов. Настройки решения систем уравнений на закладке **Динамический анализ** в целом повторяют такие же настройки для статического анализа.



Основные темы в этом разделе:

- [Этапы](#)
- [Параметры расчёта](#)
- [Оценка результатов](#)
- [Линейная динамическая задача](#)
- [Динамические нестационарные процессы](#)

4.3.3.1. ЭТАПЫ

Анализ осуществляется в несколько этапов. Последовательность действий пользователя по подготовке задачи и выполнению динамического расчёта конструкции во многом схожа с алгоритмом, описанным для прочностного анализа. Поэтому в данной главе отметим только некоторые особенности, характерные для динамического расчёта:

Шаг 1. Создание задачи.

При создании задачи нужно указать её тип – «**Линейная динамическая задача**» или «**Динамические нестационарные процессы**».

Шаг 2. Наложение граничных условий.

В динамическом анализе, как и в статическом анализе, роль граничных условий выполняют закрепления и нагрузки. Могут использоваться все типы закреплений и все виды силовых нагрузок, применяемые в анализе статической прочности, а кроме того начальные условия «Начальная скорость», «Начальное ускорение», нагрузка «Осциллятор». Все нагрузки могут задаваться переменными во времени.

Температурные воздействия задаются также, как и в прочностном анализе, но при этом не учитываются температурные напряжения, а только изменение физических свойств материалов с температурой.

Задание закреплений, кинематических или силовых нагрузок является обязательным условием выполнения корректного расчёта. При этом в отличие от статического анализа, нет обязательного условия, необходимости исключения перемещения модели как целого тела, т.е. для осуществления расчета достаточно приложения одной силы при не слишком большом времени расчета, за которое модель сдвинется на конечное расстояние.

Шаг 3. Выполнение расчёта.

Перед выполнением расчёта пользователь указывает в параметрах задачи временной шаг интегрирования, выбранный на основании приведенных выше условий, метод временного интегрирования и, при необходимости, один из способов получения начальных условий: перемещения из статической задачи, перемещения, скорости или ускорения из другой динамической задачи с указанием шага.

В информационное окно при выполнении расчёта выводится справочная и диагностическая информация.

Количество узлов – количество узлов расчётной конечно-элементной сетки.

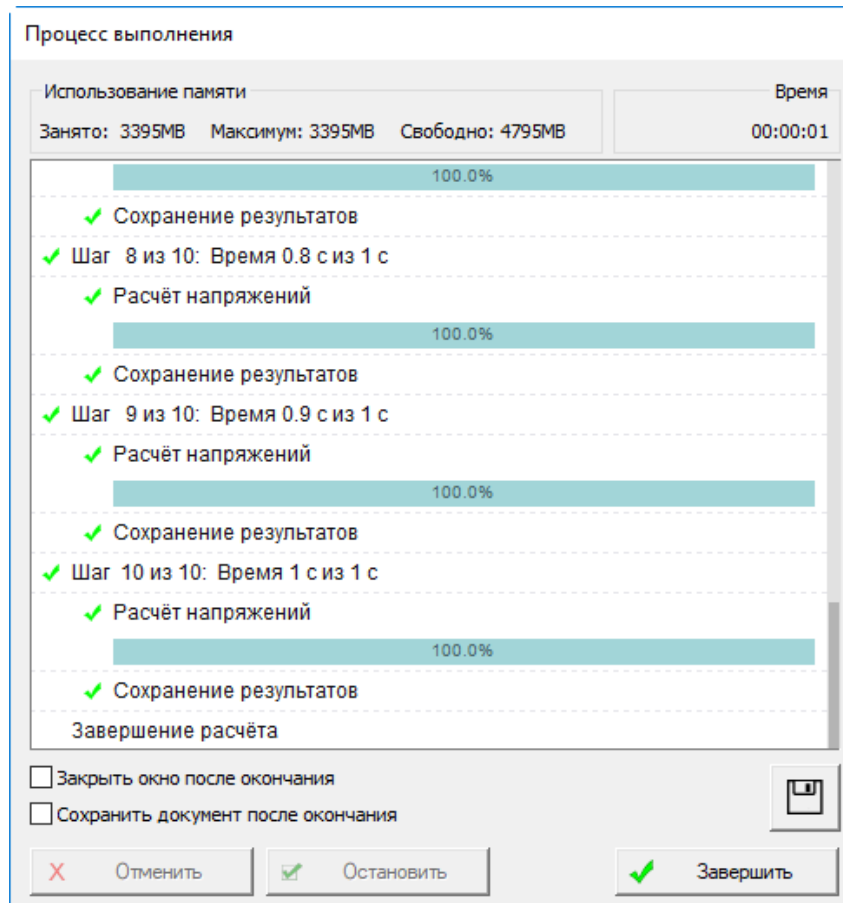
Количество элементов – количество тетраэдров / треугольников в конечно-элементной сетке.

Введено аргументов – количество уравнений, участвующих в решении.

Метод расчета – прямой или итерационный.

Шаг ... из ... – текущий шаг и общее число шагов.

Расчёт закончен – сигнализирует о том, что процесс решения завершился успешно.



Шаг 4. Анализ результатов расчёта

После выполнения расчёта, в дереве задач появляется новая папка «**Результаты**». По умолчанию в ней отображаются результаты, определённые в закладке «**Настройка результатов**» диалога «**Параметры задачи**». Всего по результатам динамического анализа пользователю доступны до 49 результатов, сгруппированные в 8 групп.

4.3.3.2. ПАРАМЕТРЫ РАСЧЁТА

Перед выполнением расчёта пользователь должен задать параметры задачи: временной шаг интегрирования, метод временного интегрирования и при необходимости, один из способов получения начальных условий: перемещения из статической задачи, перемещения, скорости или ускорения из другой динамической задачи с указанием шага.

Закладка "Описание задачи"

На закладке **Описание задачи** можно определить параметры текущей задачи: имя, тип и добавить комментарий.

Закладка «Свойства динамического анализа»

Группа «Временные параметры»

Перед запуском динамического расчёта пользователь должен задать **временной шаг** и **конечное время моделирования**.

К выбору **временного шага** нужно подходить внимательно, т.к. временной шаг критически влияет на точность численного интегрирования и, соответственно, получаемого решения. Для многих практических расчётов рекомендуемое значение максимального временного шага Δt можно оценить по формуле:

$$\Delta t \leq T_{min} / 20,$$

где

T_{min} - наименьший период собственных колебаний системы и (или) период изменения внешней переменной нагрузки.

Следует учесть, что это только максимальная оценка, и иногда шаг надо выбирать намного меньше, чем эта оценка. Максимальное количество временных шагов в текущей версии составляет 65535.

Конечное время моделирования задаётся исходя из условий решаемой задачи. Нужно учитывать, что слишком большое число шагов может привести к длительному времени расчета и заполнению дисковой памяти, необходимой для хранения результатов.

Задача_4 [Суперпозиция мод]

Описание задачи

Свойства динамического анализа

Свойства расчёта частот

Параметры демпфирования

Настройка результатов

Информация о расчёте

Временные параметры

Конечное время моделирования: 1

Временной шаг: 0.1

Метод временного интегрирования

Ньюмарк

Вилсон

Начальные условия

Применить перемещения из статического анализа

Применить результаты динамического анализа

Время:

Получить начальные перемещения

Получить начальные скорости

Получить начальные ускорения

Далее >

Отмена

Группа «Метод временного интегрирования»

Для интегрирования уравнений в обеих динамических задачах используются разностные схемы: метод Ньюмарка или Вильсона.

В методе Ньюмарка исходят из следующей аппроксимации скоростей и перемещений:

$$\begin{aligned} \{U(t + \tau)\} &= \{U(t)\} + [(1 - \delta)\{U(t)\} + \delta\{U(t + \tau)\}]\tau, \\ \{U(t + \tau)\} &= \{U(t)\} + \{U(t)\}\tau + [(0.5 - \alpha)\{U(t)\} + \alpha\{U(t + \tau)\}]\tau^2, \end{aligned}$$

где α , δ - параметры, определяющие точность и устойчивость интегрирования.

При $\alpha=1/6$, $\delta=1/2$ ускорения меняются линейно в пределах шага интегрирования; предпочтителен для линейных задач;

При $\alpha=1/4$, $\delta=1/2$ ускорения остаются постоянными в пределах шага интегрирования. В этом случае метод безусловно сходится; применяется для нелинейных задач. Условие сходимости метода при условии правильного выбора временного шага: $\alpha > 1/8$.

В методе Вильсона исходят из того, что вектор ускорений и нагрузок меняется линейно на интервале $(t+\theta\tau)$, где $\theta \geq 1$, при этом исходят из следующей аппроксимации ускорений:

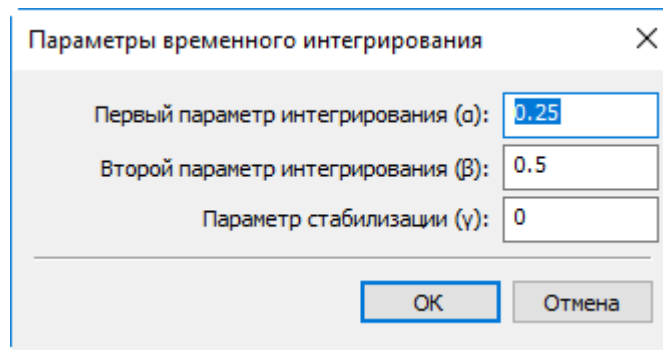
$$\{U(t + \Delta t)\} = \{U(t)\} + \Delta t(\{U(t + \theta\tau)\} - \{U(t)\})/\theta\tau,$$

Интегрированием этого уравнения получают выражения для скоростей и перемещений:

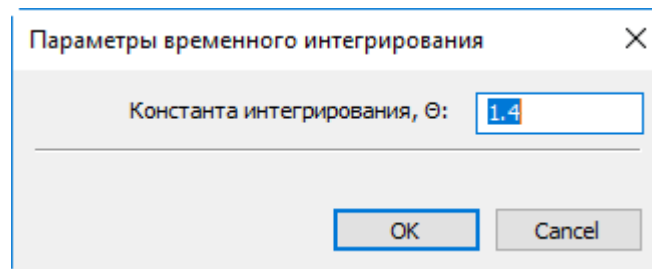
$$\begin{aligned} \{U(t + \theta\tau)\} &= 6(\{U(t + \theta\tau)\} - \{U(t)\})/\theta^2\tau^2 - 6(\{U(t)\} - 2\{U(t)\})/\theta\tau, \\ \{U(t + \theta\tau)\} &= 3(\{U(t + \theta\tau)\} - \{U(t)\} - 2\{U(t)\} - 0.5\theta\tau\{U(t)\})/\theta\tau, \end{aligned}$$

Минимальное значение $\theta=1,37$, при котором метод устойчиво сходится, обычно принимают $\theta=1,4$.

Эти настройки можно выполнить на закладке Параметры. Для метода Ньюмарка настройки параметров временного интегрирования выполняются нажатием на кнопку Настройка рядом с переключателем метода, при этом открывается диалог настройки. По умолчанию эти параметры настроены на безусловную сходимость метода.



Для метода Вильсона настройки также выполняются нажатием на кнопку Настройка рядом с переключателем метода. По умолчанию параметр интегрирования настроен на безусловную сходимость метода.

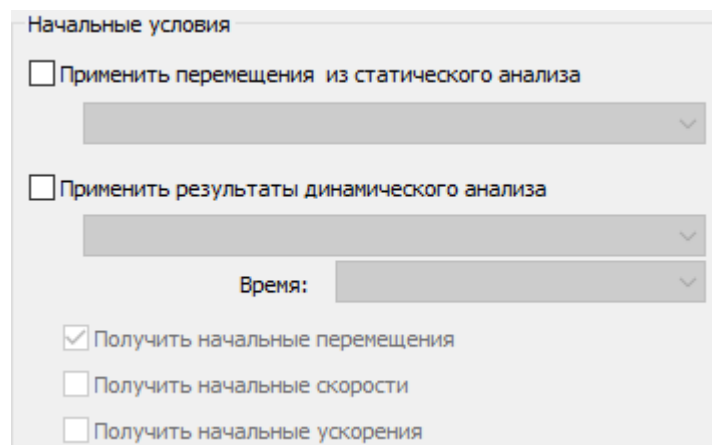


Группа «Начальные условия»

Помимо задания начальных скоростей и ускорений с помощью специальных команд, пользователь может также определить начальные условия, заимствуя результаты из ранее решенных задач статики или динамики. Важным условием возможности такого заимствования является требование идентичности конечно-элементных сеток обеих задач. Эти настройки производятся на закладке **Свойства динамического анализа** в разделе **Начальные условия**. Можно воспользоваться одним из двух способов:

- Применить перемещения из статического анализа.
- Применить результаты ранее решенной динамической задачи.

В последнем случае можно передать на начальный шаг кроме перемещений, еще узловые скорости и ускорения, взятые с указанного временного шага другой задачи.



Закладка «Параметры демпфирования»

В системе используется демпфирование по Рэлею, т.е. матрица демпфирования считается пропорциональной матрицам жесткости и масс и определяется выражением:

$$[C] = a[M] + b[K],$$

где

a – коэффициент пропорциональности масс;

b – коэффициент пропорциональности жёсткости (оба коэффициента скаляры).

Эти настройки можно выполнить на закладке **Параметры демпфирования**. Параметры на этой закладке повторяют такие же настройки для анализа вынужденных колебаний. Отличие только в том, что для задач типа «**Линейная динамическая задача**» коэффициент пропорциональности жесткости не задается.

The screenshot shows a software window titled 'Задача_4 [Суперпозиция мод]' with a close button (X) in the top right corner. On the left is a vertical menu with the following items: 'Описание задачи', 'Свойства динамического анализа', 'Свойства расчёта частот', 'Параметры демпфирования' (highlighted in blue), 'Настройка результатов', and 'Информация о расчёте'. The main area of the window is titled 'Коэффициенты пропорциональности' and contains two input fields: 'Массы:' with a value of '0' and 'Жёсткости:' with a value of '0'. At the bottom right are two buttons: 'Далее >' and 'Отмена'.

Закладка «Термоэффекты»

Закладка «**Термоэффекты**» позволяет включить режим учёта изменения свойств материалов от температуры.

Учитывать изменение физических свойств от температуры. При включенном режиме свойства материалов будут считываться с графиков температурных зависимостей, заданных в свойствах материалов задачи.

В разделе «**Температурные поля**» определяется способ задания тепловой нагрузки для расчета физических свойств материалов по графикам температурных зависимостей, заданных в их свойствах. Элементы управления на этой закладке повторяют соответствующие настройки для статического анализа.

4.3.3.3. ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

После успешного расчёта задачи необходимо проанализировать полученные результаты, чтобы сделать заключение о вероятной динамической прочности конструкции. Во многих случаях достаточно трёх типов результатов – перемещений, напряжений и коэффициента запаса по напряжениям. По умолчанию каждый результат открывается на последнем временном шаге, чего может быть недостаточно для получения динамической картины изменения деформаций и напряжений. Поэтому при анализе результатов следует пользоваться временной шкалой и графиками, построенными по данным датчиков.

Включение/отключение панели временного процесса. Для задач динамики имеет значение, в какой момент времени рассматривается состояние деформации, т.к. пик напряжений или перемещений может появиться на любом временном шаге. Для отображения всех ре-

зультатов по временным шагам надо включить временной процесс кнопкой  или включить фоновую анимацию кнопкой  на панели ленты.

Использование графиков для анализа результатов описано в соответствующем разделе главы Постпроцессор T-FLEX Анализ.

Основными результатами динамических расчётов являются (с временным шагом):

- поля перемещений конструкции в расчётных точках конечно-элементной сетки;
- поля относительных деформаций;
- поля компонентов напряжений;
- энергия деформаций;
- узловые усилия;
- поля распределения коэффициента запаса по напряжениям по объёму конструкции;

- поле скорости в расчётных точках конечно-элементной сетки;
- поле ускорения в расчётных точках конечно-элементной сетки.

Этих данных обычно достаточно для прогнозирования поведения конструкции и принятия решений для оптимизации геометрической формы изделия с целью обеспечения основных условий динамической прочности изделий.

4.3.3.4. ЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА

Пример расчёта. Динамический анализ консольной балки с переменной нагрузкой

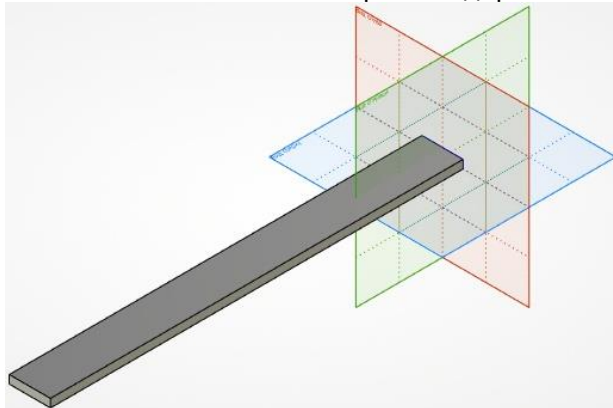
Для иллюстрации работы с конфигурацией динамического анализа, рассмотрим пример расчета консольно закрепленной прямоугольной балки размерами 1000x100x20, на свободный конец которой действует сила, возрастающая от 0 до 500 Н за время 2 с, после чего действие силы остается. Необходимо определить максимальные перемещения конца балки, а также динамические напряжения в заделке.

Рассчитаем задачу методом суперпозиции мод (тип: **линейная динамическая задача**).

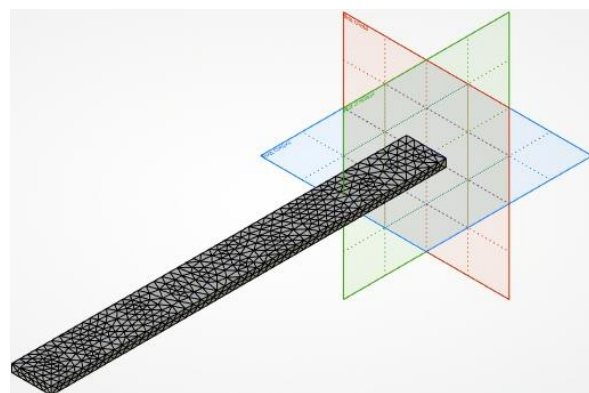
Шаг 1. Создание «Задачи», сетки, назначение материала

Используя команду «Анализ > Новая задача» создадим задачу типа «**Линейная динамическая задача**».

На основе тела – балки с размерами 1000x100x20. Построим конечно-элементную сетку. Также необходимо определить параметры материала модели. По умолчанию, в расчёте используются характеристики материала «**С Тела/Операции**», т.е. свойства материала автоматически берутся из твердотельной модели детали изделия. Этот режим особенно удобно использовать, если в расчёте участвуют тела из разных материалов в составе сборочных моделей. В нашем случае, при создании 3D модели был определен материал «Сталь», физико-химические свойства которого содержатся в базе T-FLEX CAD.



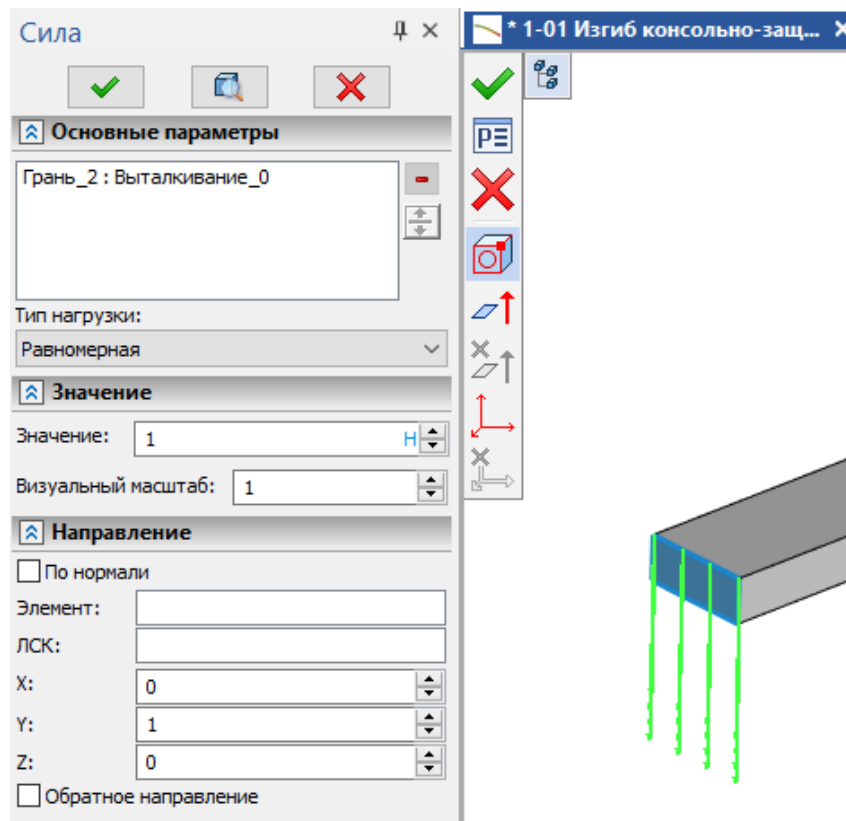
Трёхмерная модель



Конечно-элементная модель

Шаг 2. Наложение начальных и граничных условий

Зададим для нашей модели начальные условия и нагружения. Начальными условиями будут нулевые скорости и ускорения, которые нет необходимости задавать отдельно. Приложим к одному торцу полное закрепление, а к другому вертикальную силу, изменяющуюся по гра-
фику.



Переменная нагрузка на грань

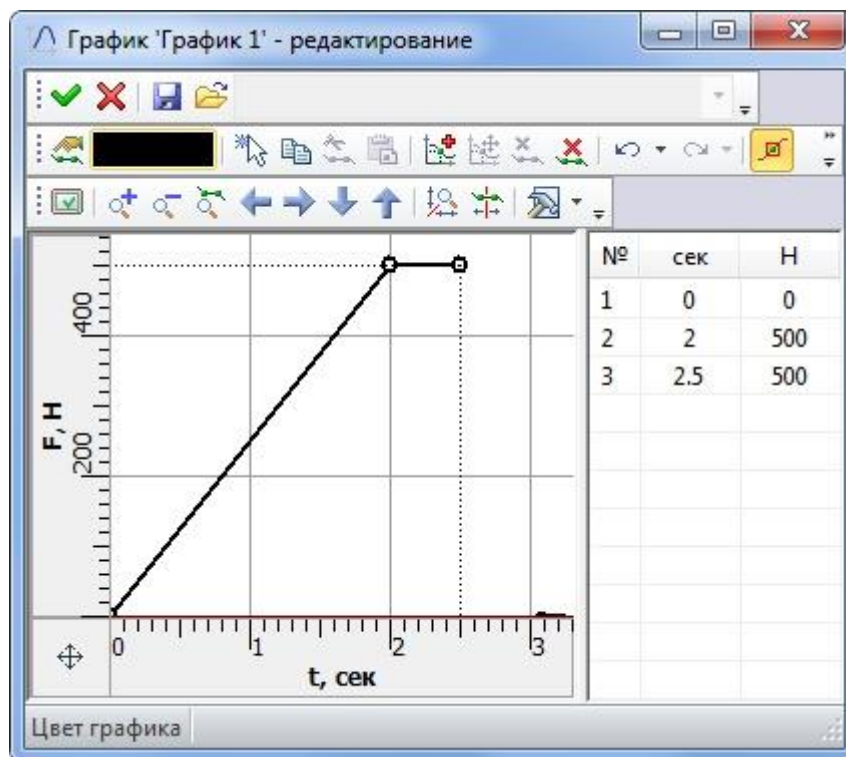
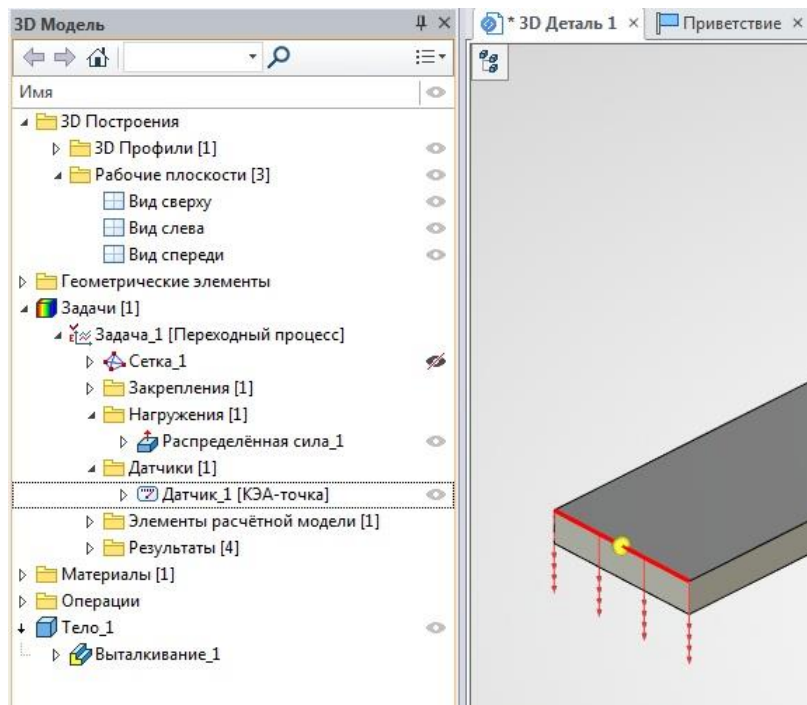


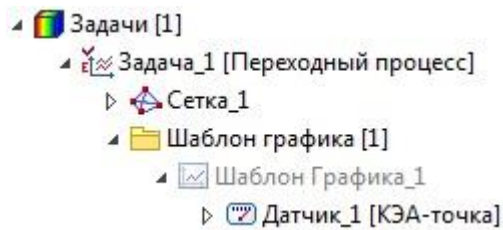
График переменной нагрузки

Шаг 3. Создание датчиков и шаблонов графиков

Для определения максимального прогиба и скорости конца балки создадим датчик, по которому создадим шаблон графика.



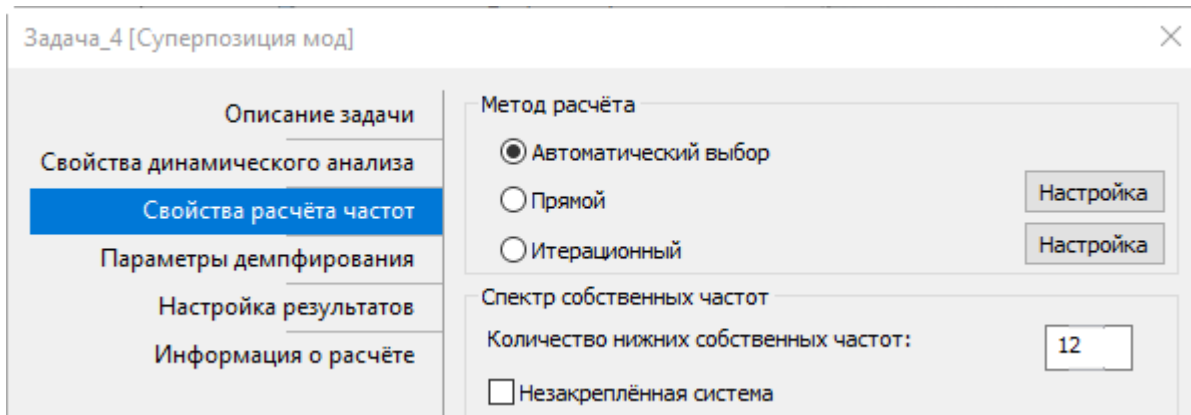
Датчик установлен посередине ребра



Шаблон графика по датчику в дереве задачи

Шаг 4. Выполнение расчёта.

В Параметрах задачи на закладке **Свойства расчёта частот** система предлагает использовать для расчета 12 собственных форм колебания.

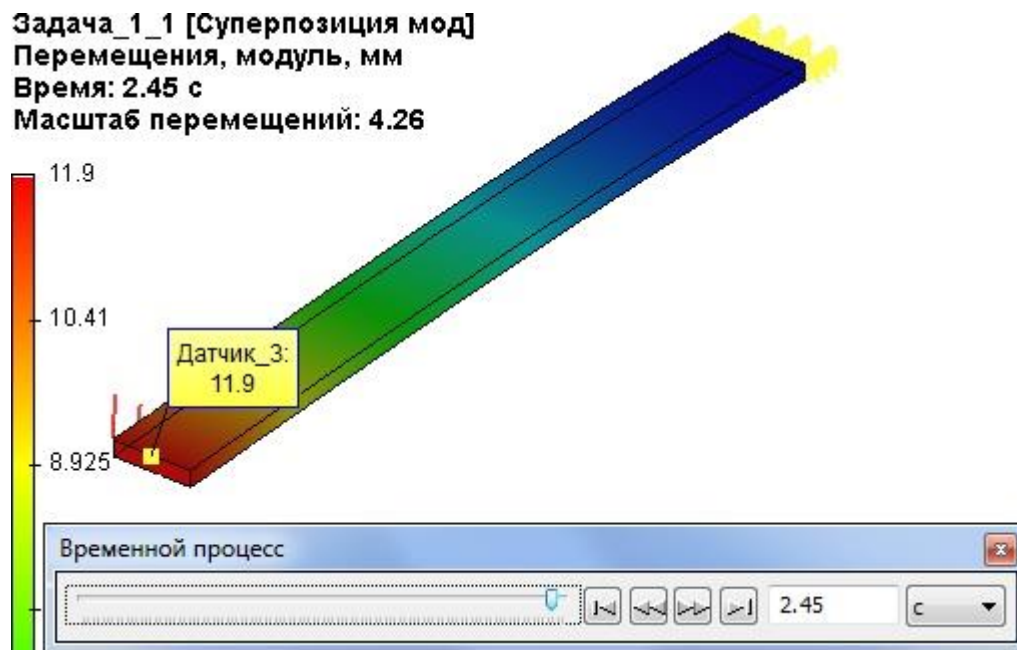


Свойства расчёта частот

Далее на закладке **Свойства динамического анализа** задаем настройки временного шага и конечного времени расчёта.

Шаг 5. Анализ полученных результатов.

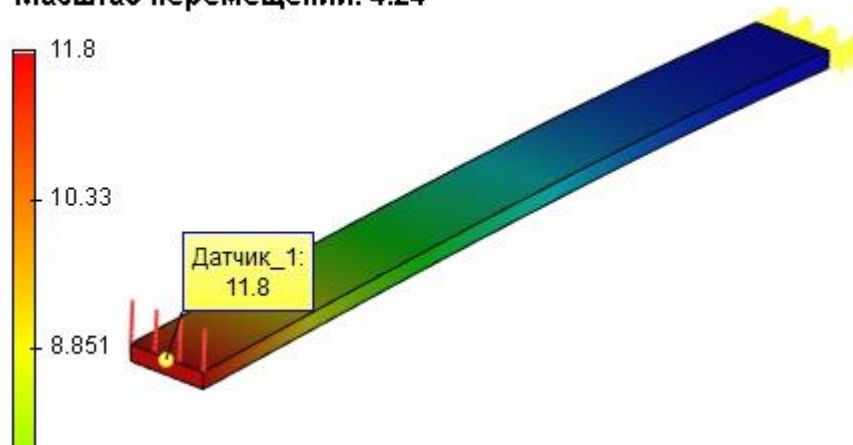
После расчета открываем **результат - перемещения**, активируем панель управления "**Временной процесс**" и можем наблюдать процесс деформирования балки по шагам. Можно видеть, что под действием нагрузки балка сначала деформируется до максимального значения, а затем продолжает колебаться по инерции с малой амплитудой около значения максимального прогиба. Также определили амплитуду прогиба



Перемещение балки - временной процесс

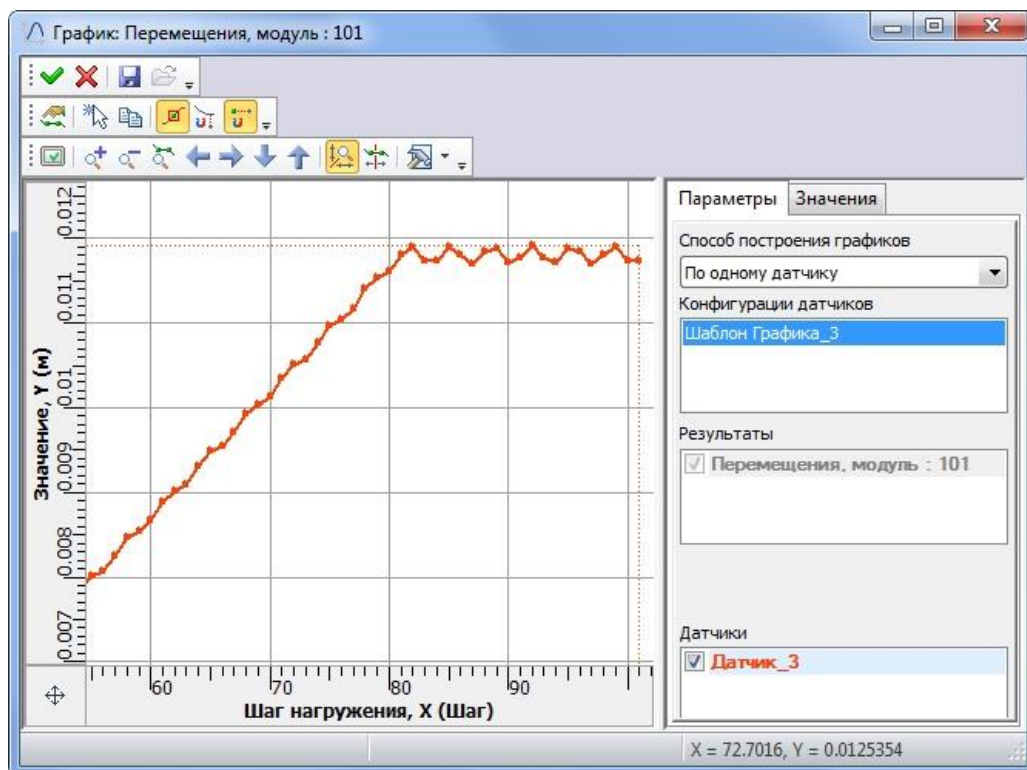
На рисунке представлен прогиб этой же балки под действием постоянной силы, полученный по результатам решения задачи типа "Статическая прочность". Результаты практически совпадают.

Задача_1 [Прочность]
Перемещения, модуль, мм
Масштаб перемещений: 4.24



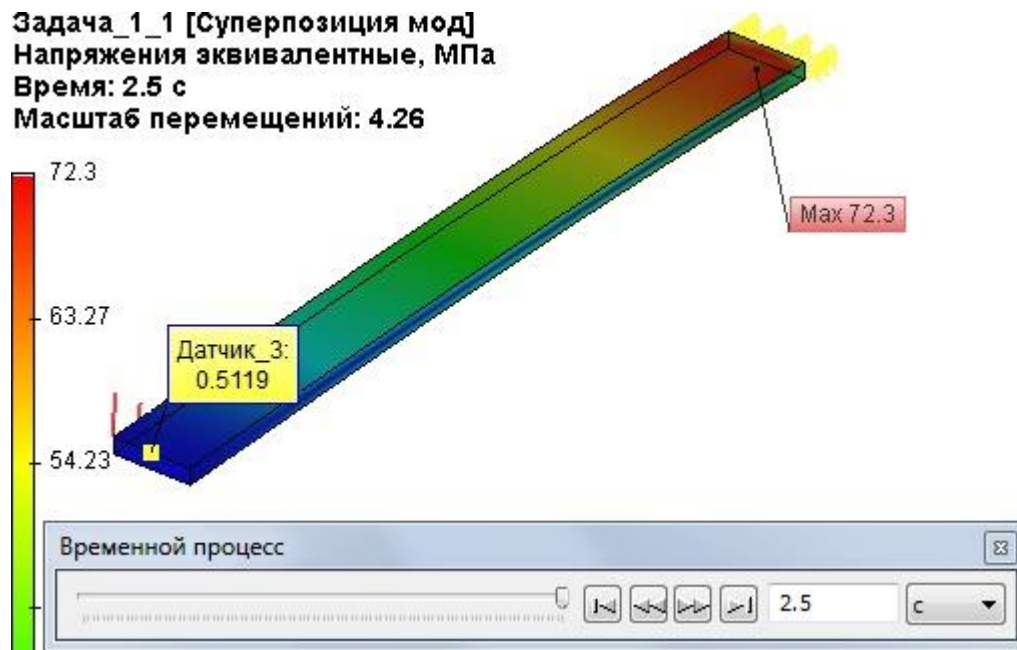
Перемещение балки –статический процесс

На графике перемещений, построенному по Датчику_3 видно, что конец балки перемещается с малой амплитудой относительно максимального прогиба. Колебания незатухающие потому что в задаче не использовалось демпфирование.



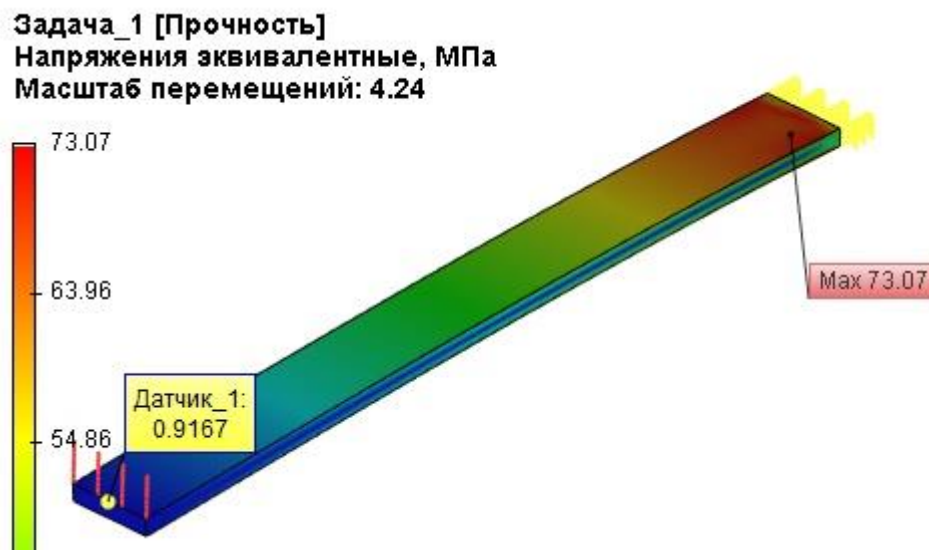
Перемещения - временной процесс

На рисунке показаны распределение максимальных эквивалентных напряжений, метками указаны максимальные эквивалентные напряжения.



Эквивалентные напряжения в "Линейной динамической задаче"

На рисунке показаны распределение эквивалентных напряжений балки (стационарного процесса), метками указаны максимальные эквивалентные напряжения. Результаты практически совпадают.



Распределение эквивалентных напряжений (статический процесс)

4.3.3.5. ДИНАМИЧЕСКИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Пример расчёта. Динамический анализ консольной балки с переменной нагрузкой

Для иллюстрации работы с конфигурацией динамического анализа, рассмотрим пример расчета консольно заземленной прямоугольной балки размерами 1000x100x20, на свободный конец которой действует сила, возрастающая от 0 до 500 Н за время 2 с, после чего

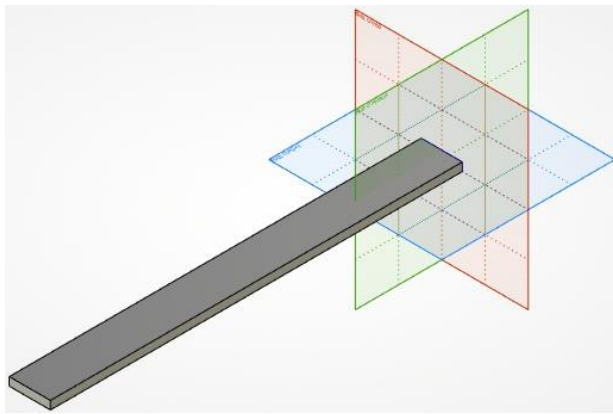
действие силы остается. Необходимо определить максимальные перемещения конца балки, а также динамические напряжения в заделке.

Рассчитаем задачу методом прямого интегрирования (тип **Динамические нестационарные процессы**).

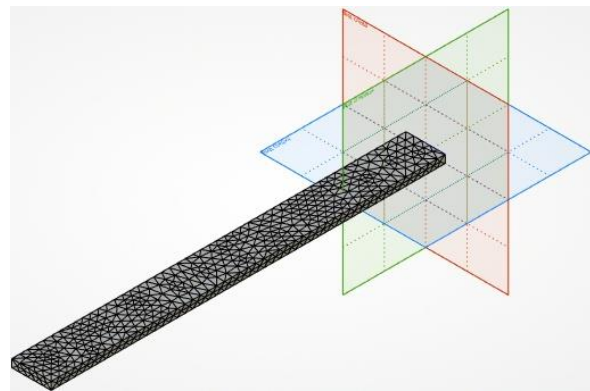
Шаг 1. Создание «Задачи», сетки, назначение материала

Используя команду «Анализ > Новая задача» создадим задачу типа «**Динамические нестационарные процессы**».

На основе тела – балки с размерами 1000x100x20. Построим конечно-элементную сетку. Также необходимо определить параметры материала модели. По умолчанию, в расчёте используются характеристики материала «**С Тела/Операции**», т.е. свойства материала автоматически берутся из твердотельной модели детали изделия. Этот режим особенно удобно использовать, если в расчёте участвуют тела из разных материалов в составе сборочных моделей. В нашем случае, при создании 3D модели был определен материал «Сталь», физико-химические свойства которого содержатся в базе T-FLEX CAD.



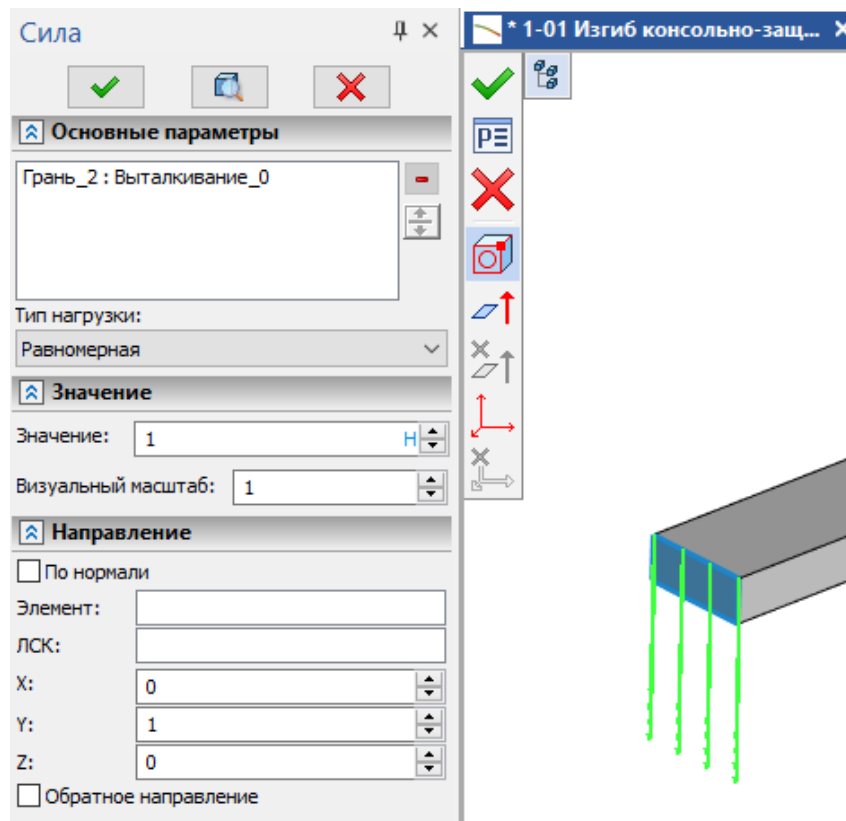
Трёхмерная модель



Конечно-элементная модель

Шаг 2. Наложение начальных и граничных условий

Зададим для нашей модели начальные условия и нагрузки. Начальными условиями будут нулевые скорости и ускорения, которые нет необходимости задавать отдельно. Приложим к одному торцу полное закрепление, а к другому вертикальную силу, изменяющуюся по графику.



Переменная нагрузка приложенная на грань

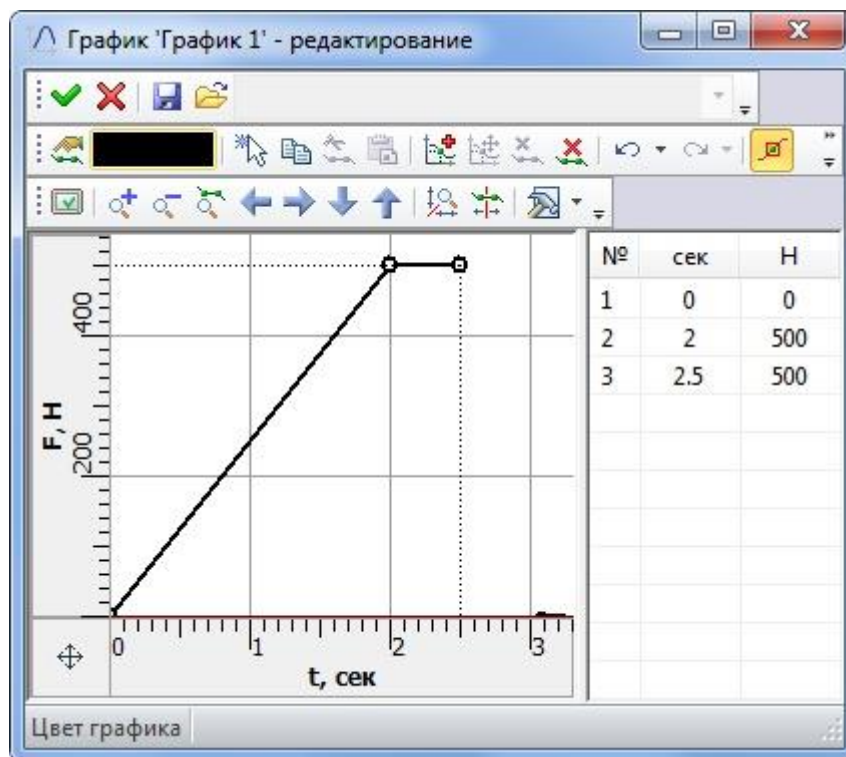
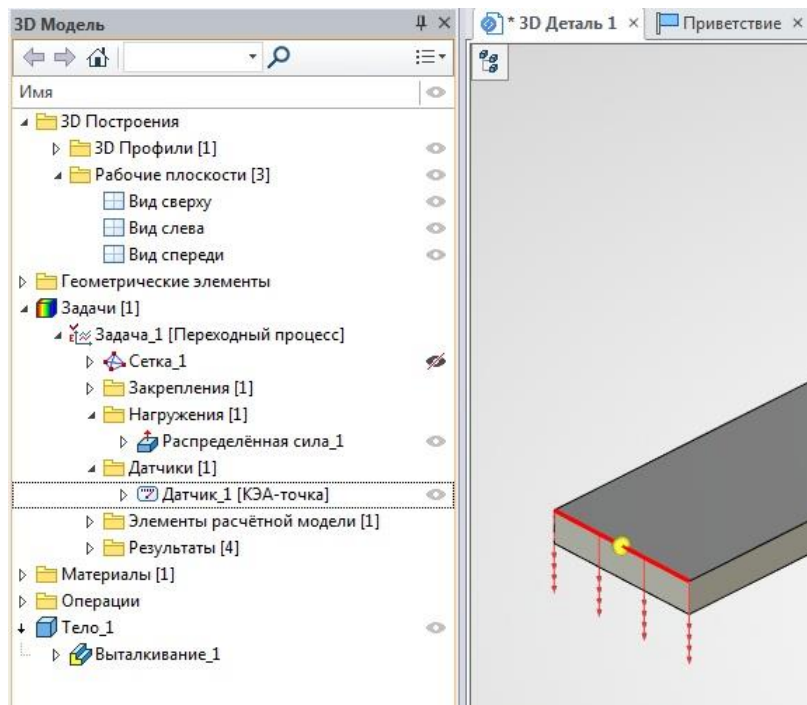


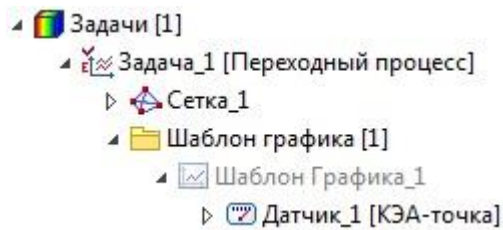
График переменной нагрузки

Шаг 3. Создание датчиков и шаблонов графиков

Для определения максимального прогиба и скорости конца балки создадим датчик, по которому создадим шаблон графика.



Датчик установлен посередине ребра

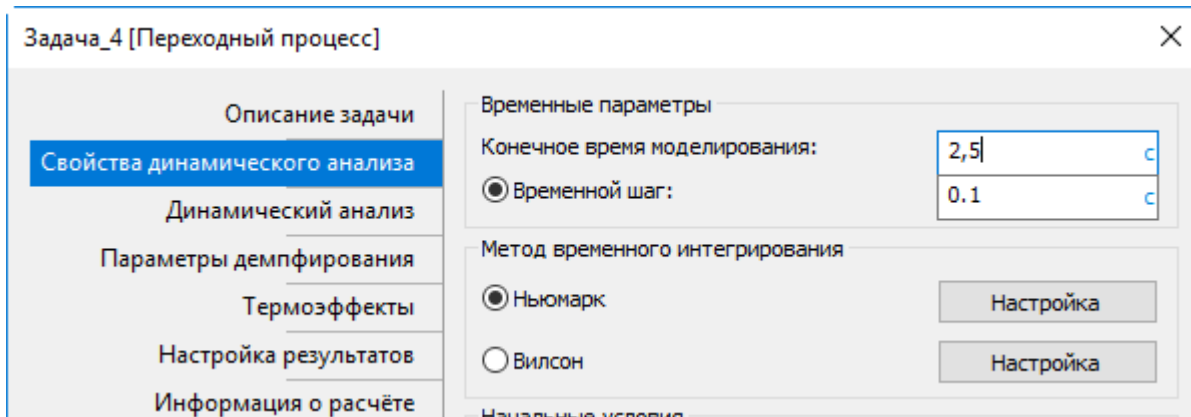


Шаблон графика по датчику в дереве задачи

Шаг 4. Выполнение расчета

После задания закреплений и нагрузок запускаем задачу на расчет.

В **Параметрах** задачи задаем настройки временного шага и конечного времени расчета.

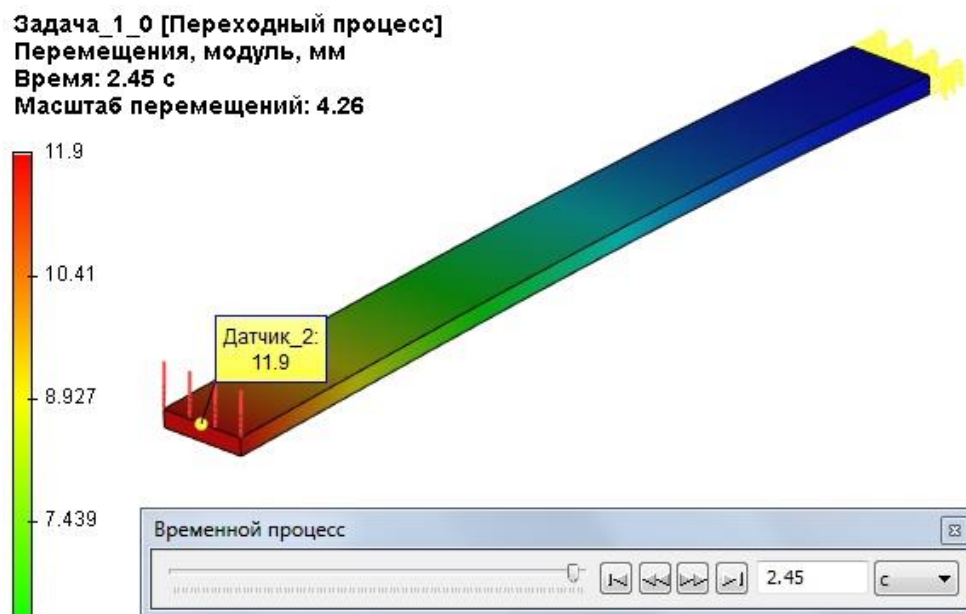


Задание параметров для динамического нестационарного процесса

Шаг 5. Анализ полученных результатов

После расчета открываем результат - перемещения.

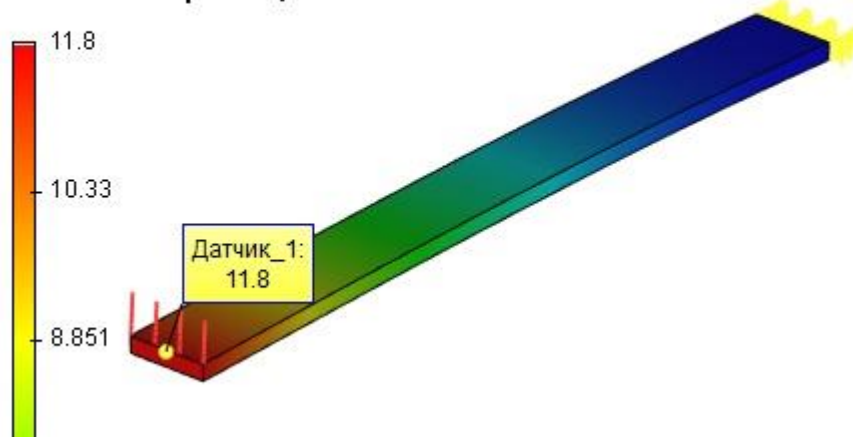
Активировав панель управления **"Временной процесс"** мы можем наблюдать процесс деформирования балки по шагам. Под действием нагрузки балка сначала деформируется до максимального значения, а затем продолжает колебаться по инерции оставаясь нагруженной приложенной силой. Колебания незатухающие потому что в задаче не использовалось демпфирование.



Перемещение балки - переходный процесс

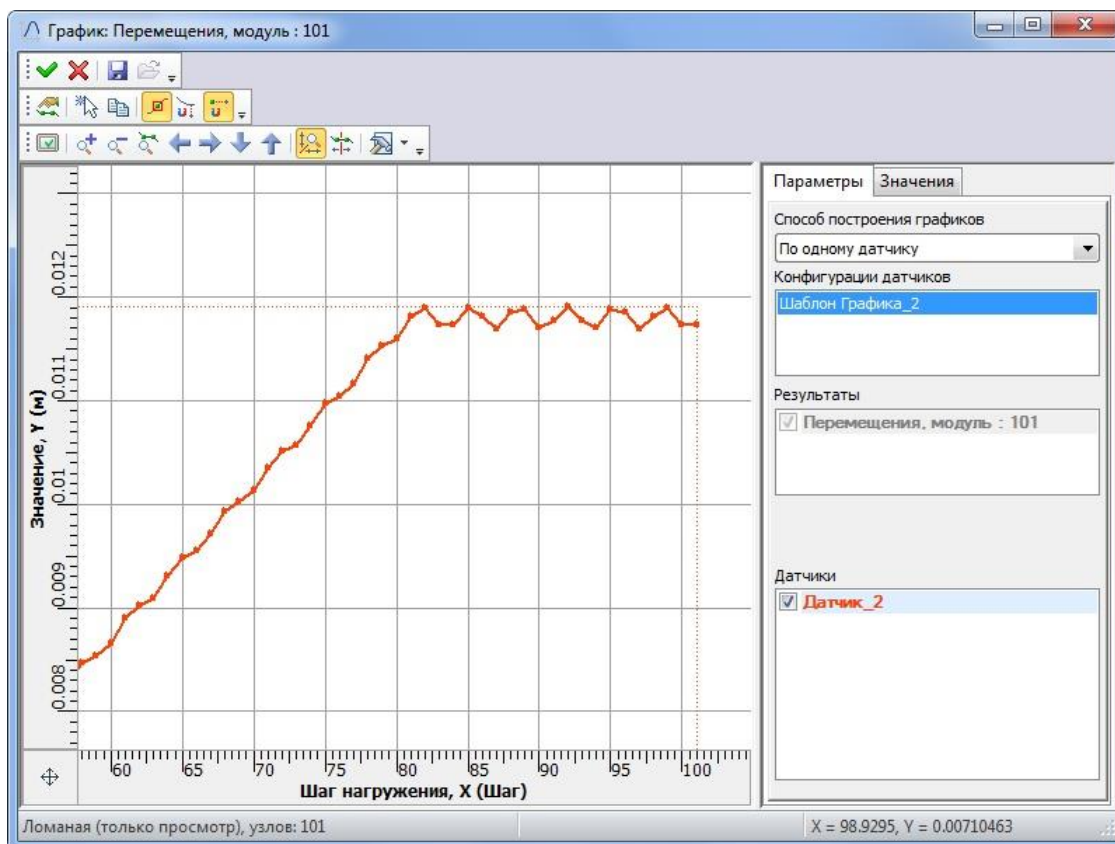
На рисунке представлен прогиб этой же балки под действием постоянной силы, полученный по результатам решения задачи типа "Статическая прочность". Результаты практически совпадают.

Задача_1 [Прочность]
Перемещения, модуль, мм
Масштаб перемещений: 4.24



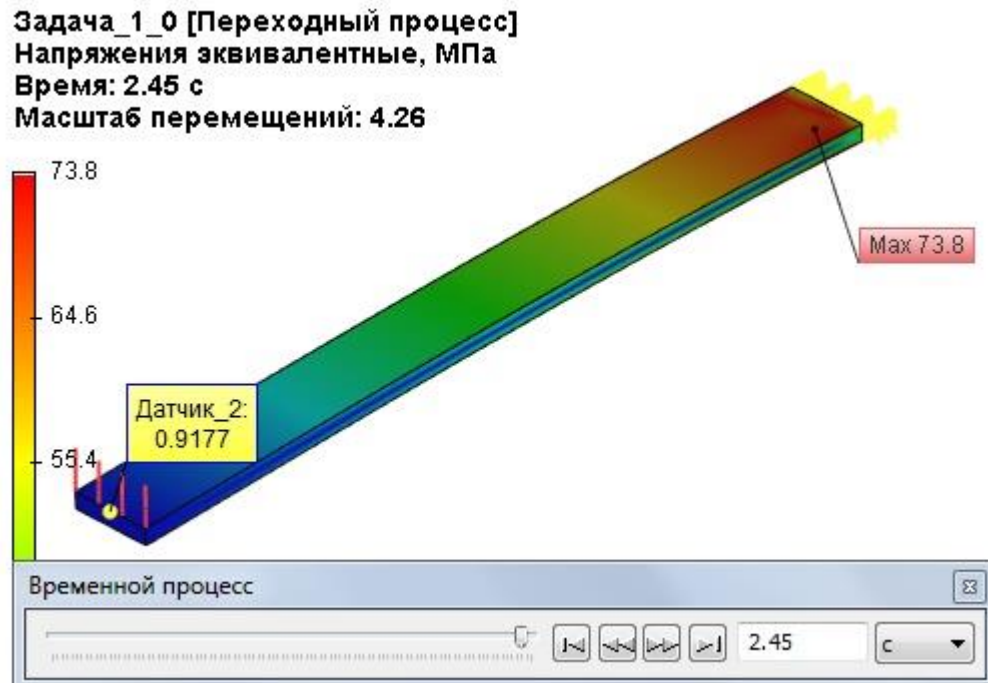
Перемещение балки –статический процесс

На графике перемещений, построенному по Датчику_2 видно, что конец балки продолжает колебаться с малой амплитудой относительно максимального прогиба.



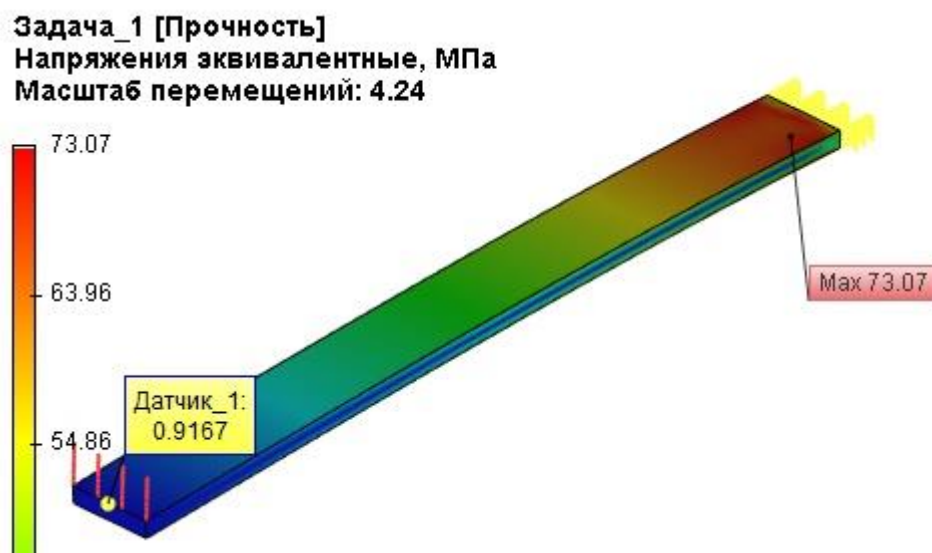
Перемещения - временной процесс

На рисунке показаны распределение эквивалентных напряжений балки (динамического не-стационарного процесса), метками указаны максимальные эквивалентные напряжения.



Распределение эквивалентных напряжений (динамический нестационарный процесс)

На рисунке показаны распределение эквивалентных напряжений балки (стационарного процесса), метками указаны максимальные эквивалентные напряжения. Результаты практически совпадают.



Распределение эквивалентных напряжений (статический процесс)

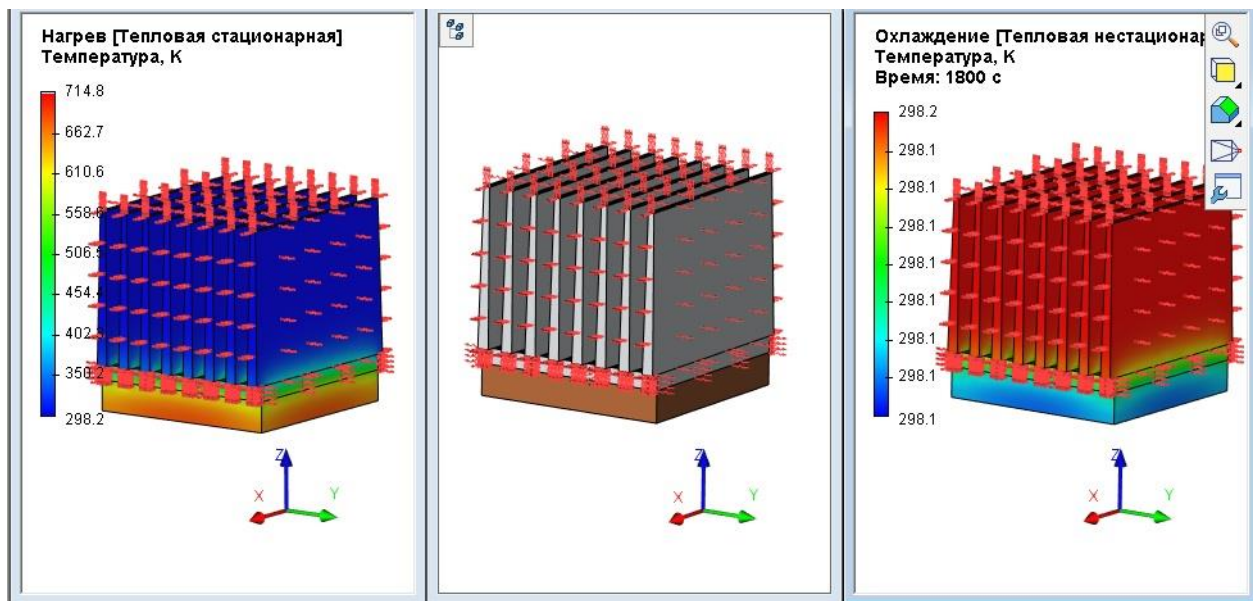
4.4. ТЕПЛОВЫЕ ЗАДАЧИ

Конфигурация теплового анализа предназначена для решения задач теплопроводности и теплопередачи. Целью осуществления тепловых расчётов обычно является определение температурных полей, а также тепловых потоков в объёме изделия.

4.4.1. ТЕПЛОВОЙ АНАЛИЗ

В T-FLEX Анализ возможны две постановки задачи теплового анализа:

- **Установившиеся тепловые процессы** – расчёт распределения температурных полей и тепловых потоков в предположении бесконечно-длительного периода времени, прошедшего после приложения тепловых нагрузок. В установившемся режиме температура тела не изменяется с течением времени, и в каждую единицу времени элементарный объём тела отдаёт в окружающую среду столько же энергии, сколько получает извне или от внутренних источников тепла.
- **Нестационарные тепловые процессы** – расчёт температурных полей осуществляется в функции времени. Источники тепловой энергии, температуры, а также термодинамические свойства системы могут изменяться во времени. В анализируемой физической системе происходит изменение распределения температурных полей с течением времени и в результате расчёта мы получаем поля температур в каждый момент времени некоторого заранее определенного пользователем временного интервала.



Примеры установившегося (слева) и нестационарного тепловых процессов

Основные темы в этом разделе:

- [Этапы](#)
- [Параметры расчёта](#)
- [Установившиеся тепловые процессы](#)
- [Нестационарные тепловые процессы](#)

4.4.1.1. ЭТАПЫ

Тепловой анализ осуществляется в несколько этапов. Последовательность действий пользователя по подготовке задачи и выполнению теплового расчёта конструкции во многом схожа с алгоритмом работы с другими расчётными конфигурациями T-FLEX Анализа. Поэтому в данном разделе отметим только некоторые особенности, характерные для осуществления тепловых расчётов.

Шаг 1. Создание задачи

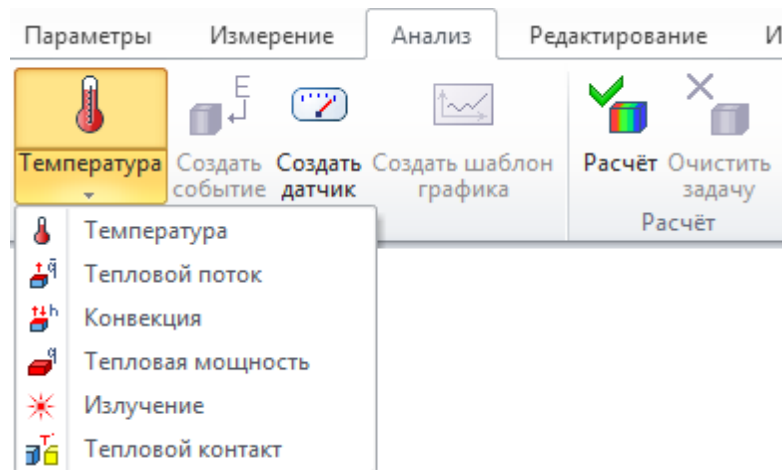
При создании задачи нужно выбрать её тип – «Установившиеся тепловые процессы» или «Нестационарные тепловые процессы».

Шаг 2. Создание сетки

Для осуществления конечно-элементного моделирования необходимо построение конечно-элементной сетки. По умолчанию, команда построения такой сетки инициируется автоматически при создании задачи. Пользователь может также создать сетку, используя команду T-FLEX Анализа [Анализ > Сетка](#).

Шаг 3. Наложение граничных условий

В тепловом анализе роль граничных условий выполняют конвекция и излучение. В качестве нагрузки - к модели прикладывают: температуру, начальные температуры, тепловой_мощности, тепловые_потоки.



Команды задания граничных условий теплового анализа.

При задании температурных нагрузок необходимо отличать и правильно использовать два варианта задания нагрузки – «[Начальная температура](#)» и «[Температура](#)». Начальная температура используется для задания температурных нагрузок в начальный (нулевой) момент времени только для нестационарного теплового расчёта. Все температурные нагрузки, заданные без флага «начальная» считаются постоянными (константами) как в установившемся тепловом процессе, так и в нестационарном тепловом процессе.

Шаг 4. Расчёт

Перед выполнением расчёта пользователь может уточнить алгоритмы решения систем уравнений на закладке **Тепловой анализ**.

Шаг 5. Анализ результатов теплового расчёта

Результатами теплового анализа являются:

- **Температурные поля** – распределение температуры по объёму модели.
- **Градиенты температуры по осям X,Y,Z**, а также модуль градиента температуры – отображают степень изменения температуры по соответствующим осям системы координат.
- **Результирующие тепловые потоки по осям X,Y,Z**, а также модуль результирующего теплового потока – показывают интенсивность передачи тепловой энергии, определённую по результатам решения задачи теплового анализа.

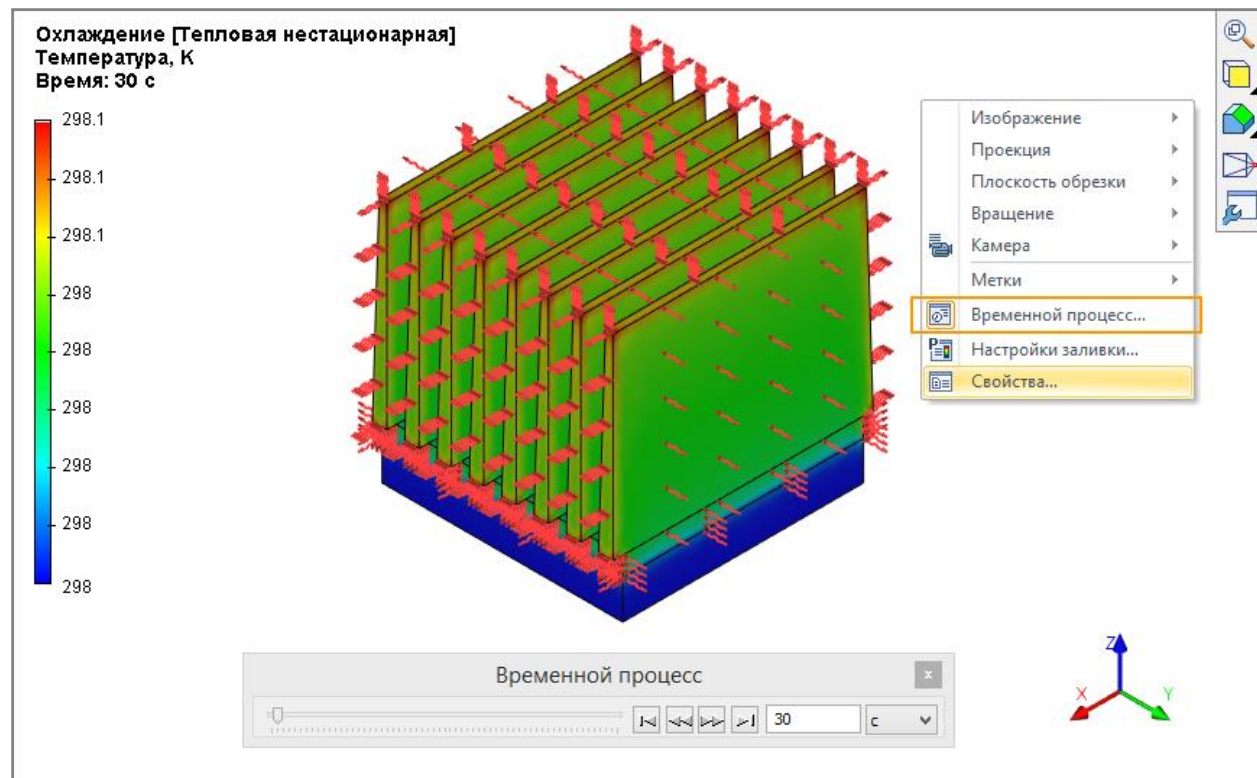
Модули градиента температуры и результирующего теплового потока определяются как корень квадратный из суммы квадратов соответствующих координатных компонентов.

Кроме указанных результатов, в качестве справочных данных в окне постпроцессора можно отобразить:

- **Приложенный тепловой поток** соответствует заданным исходным параметрам тепловых нагружений.
- **Известные температуры** – приложенные к модели неизменные температурные нагрузки.
- **Начальные температуры** – приложенные к модели начальные температуры (для нестационарного теплового анализа).

Методы анализа результатов теплового расчёта в Постпроцессоре T-FLEX Анализа, в целом, аналогичны способам исследования результатов в других расчётных конфигурациях. Отметим некоторые специфические инструменты Постпроцессора, которые можно использовать для анализа результатов **Нестационарный тепловой процесс**.

В результате решения задачи **Нестационарный тепловой процесс** получается большой набор результатов, общее количество которых равно количеству определённых пользователем временных шагов. В T-FLEX Анализ пользователю предоставляется удобный визуальный интерфейс для управления всем массивом полученных в результате расчёта данных. Для этого из контекстного меню в окне визуализатора результатов вызывается диалоговая панель «Временной процесс», с помощью которой пользователь может осуществлять быстрый переход к нужному результату по временной шкале.



Использования окна «Временной процесс»

4.4.1.2. ПАРАМЕТРЫ РАСЧЁТА

1) Установившиеся тепловые процессы

Закладки «Описание задачи», «Тепловой анализ» и «Настройка результатов» являются одинаковыми для обоих типов тепловых задач.

Закладка «Описание задачи»

Можно определить или изменить описательные параметры текущей задачи: имя, тип задачи, комментарий.

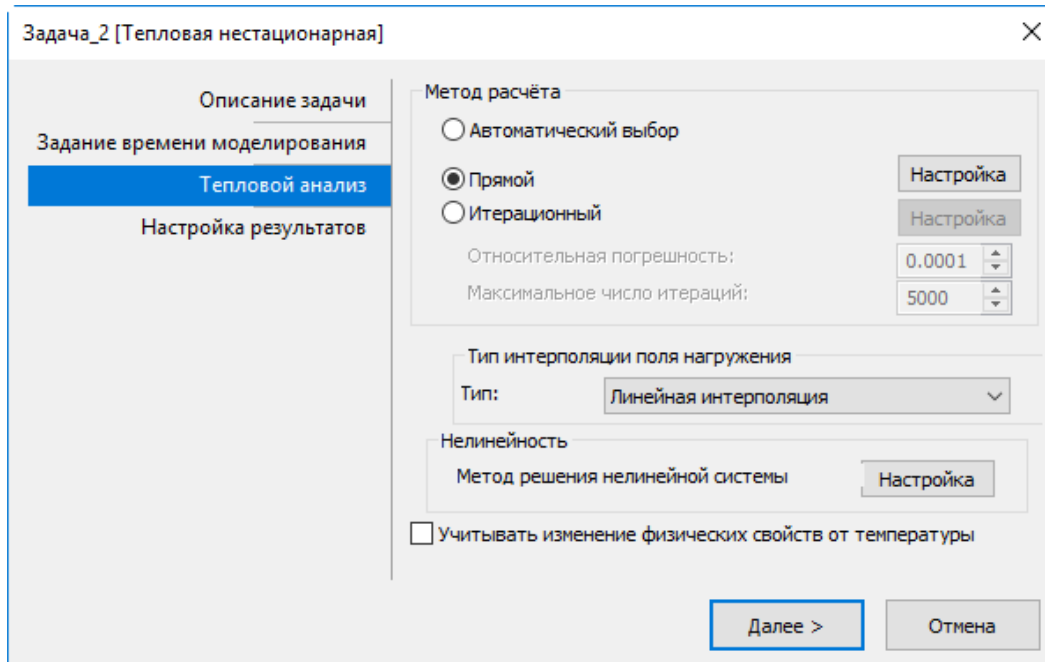
Закладка «Тепловой анализ»

Содержит настройки для решения систем алгебраических уравнений, близкие по смыслу настройкам задачи «Статический анализ». Отметим, что в большинстве случаев при осуществлении тепловых расчётов можно использовать режим **Линейная интерполяция**, что позволяет осуществить расчёт значительно быстрее. Этот конечный элемент используется по умолчанию, так как, в отличие от задач статики, частотного анализа и анализа устойчивости, результаты расчётов в предположении линейной интерполяции полей температур по объёму модели решаются достаточно точно.

Группа «Метод расчёта»

Решение тепловой задачи квадратичным конечным элементом может потребоваться, если необходимо передать результаты теплового анализа (распределение температур) в механическую задачу для учета термоэффектов. При проведении расчёта задачи квадратичным элементом становятся доступны методы: **Автоматический выбор**, **Прямой** и **Итерационный**

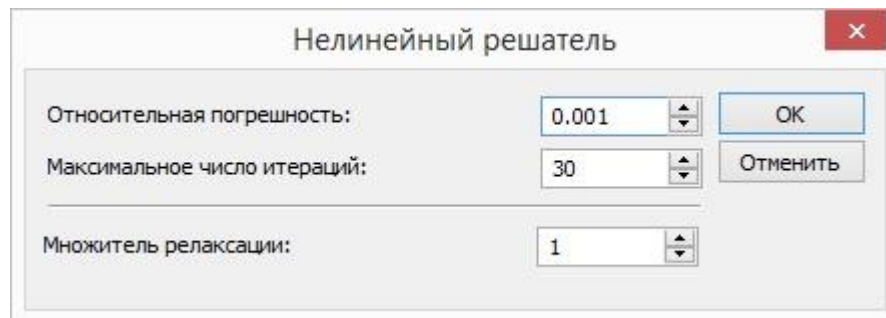
метод. При автоматическом выборе метод решения назначается системой исходя из общего количества уравнений.



Параметры расчёта тепловых задач

Группа «Нелинейность»

По кнопке **Настройка** открывается диалог с настройками решателей нелинейных систем уравнений. Нелинейные процессы возникают, когда коэффициенты уравнений зависят от результата



2) Нестационарные тепловые процессы

Закладка «Задание времени моделирования»

Для нестационарной теплопроводности на перед выполнением расчёта пользователь должен задать конечное время моделирования, временной шаг и начальную температуру.

Также на закладке доступен тип решаемой задачи **Задача на установление равновесия температур**, при этом нужно указать временной интервал начальной итерации (параметр **Начальный временной шаг**), на последующих итерациях он будет подбираться автоматически, и относительную погрешность определения температур. Результат расчета с этой оп-

цией содержит температуру, установившуюся в равновесии и время, за которое установились равновесные температуры. Этот режим расчёта, в частности, рекомендуется использовать для решения тепловых задач с учётом излучения между гранями.

Задача_2 [Тепловая нестационарная]

Описание задачи

Задание времени моделирования

Тепловой анализ

Настройка результатов

Конечное время моделирования: 1 с

Временной шаг: 0.1 с

☐ Задача на установление равновесия температур

Начальный временной шаг: 1 с

Относительная погрешность: 0.01

Начальная температура

☒ Использовать заданные начальные температуры

Значение по умолчанию: 298 К

☐ Использовать результаты теплового анализа:

Время:

Далее > Отмена

Опция **Использовать заданные начальные температуры** в тепловом расчёте позволяет определить в качестве начальной температуры:

- заданную при помощи команды Анализ > Тепловые нагрузки > Температура начальную температуру;
- температуру, заданную по умолчанию в тех узлах конечно-элементной сетки, где начальная температура не определена пользователем.

Опция **Использовать результаты теплового анализа** позволяет определить в качестве начальной температуры результаты выполненного ранее теплового расчёта. Этот пункт диалога доступен пользователю, если в модели присутствуют выполненные ранее тепловые расчёты. В выпадающем списке нужно выбрать имя рассчитанной задачи теплового анализа и, если необходимо, время, которому должен соответствовать результат. Необходимо учитывать, что для использования в качестве начальной температуры результатов теплового расчёта нужно соблюсти определённые условия.

Условие идентичности конечно-элементных сеток обоих тепловых расчётов. Наиболее простым способом достижения такой идентичности является использование команды **Копировать задачу**, доступной из контекстного меню задачи. Последовательность действий может быть, например, следующей:

- 1) создаём задачу типа **Тепловой анализ**, генерируем сетку, определяем граничные условия, выполняем расчёт. Предполагаем, что температуры, полученные в результате решения, будут использоваться для задания начальных температур в другой задаче нестационарного теплового анализа;
- 2) используя команду **Копировать задачу**, создаём копию задачи;

- 3) если создана копия задачи **Установившиеся тепловые процессы**, то с помощью опции **Изменить** изменяем тип задачи на **Нестационарные тепловые процессы**;
- 4) определяем граничные условия нестационарной задачи теплового анализа. В параметрах задачи устанавливаем временной шаг.

В результате получаем две задачи с одинаковыми конечно-элементными сетками.

Условие одинаковых установок. В обеих задачах режим **Производить расчёт линейным элементом** на закладке **Тепловой анализ** диалога параметров задачи должен иметь одинаковую установку. Например, если первый тепловой расчёт осуществлялся линейным элементом, то и второй тепловой расчёт с использованием результатов теплового расчёта, можно осуществить только линейным элементом.

Отметим также, что решение задачи нестационарной теплопроводности требует больше машинного времени по сравнению со стационарной теплопроводностью, так как в этом случае системы алгебраических уравнений решаются на каждом временном шаге, определённом пользователем.

4.4.1.3. УСТАНОВИВШИЕСЯ ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

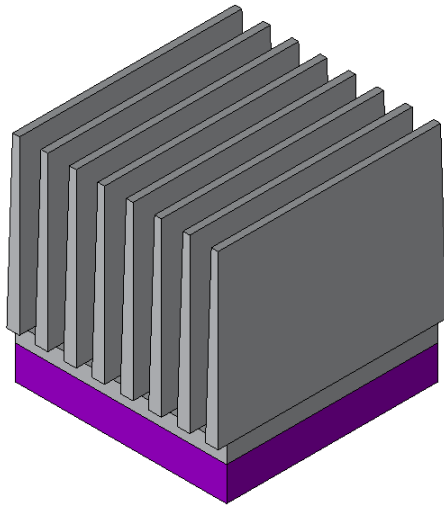
Тепловой расчёт радиатора охлаждения. Установившийся режим

Необходимо оценить эффективность пассивного радиатора охлаждения полупроводникового электронного устройства с максимальной рассеиваемой мощностью 15 Ватт. Допустимая температура корпуса микросхемы составляет 75°C в диапазоне температур эксплуатации окружающей среды от 25°C до 55°C. Для охлаждения устройства используется радиатор из алюминиевого сплава, закрепляемый на верхней части корпуса микросхемы. Корпус микросхемы для улучшения теплоотвода выполнен из меди.

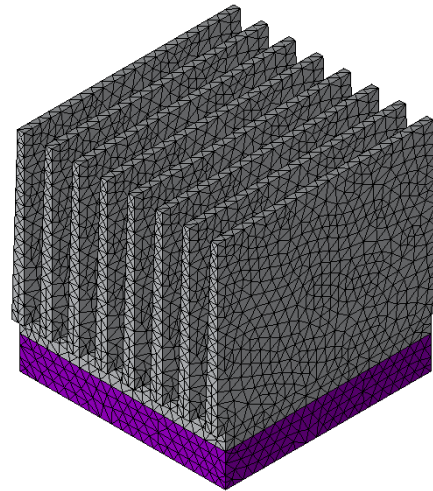
Шаг 1. Создание «Задачи», сетки, назначение материала

Используя команду **«Анализ > Новая задача»** создадим задачу и выберем тип - **«Установившиеся тепловые процессы»**.

На основе двух тел – микросхемы и радиатора строим конечно-элементную сетку. Также необходимо определить параметры материала изделия. По умолчанию, в расчёте используются характеристики материала **«С тела/операции»**, т.е. свойства материала автоматически берутся из твердотельной модели детали изделия. Этот режим особенно удобно использовать, если в расчёте участвуют тела из разных материалов в составе сборочных моделей. В нашем случае, при создании 3D модели радиатора был определён материал **«Алюминий»**, физико-химические свойства которого содержатся в базе T-FLEX CAD 3D, а микросхемы - **«Медь»**. На рисунках показана трёхмерная модель микросхемы с пассивным радиатором охлаждения и созданная конечно-элементная сетка.



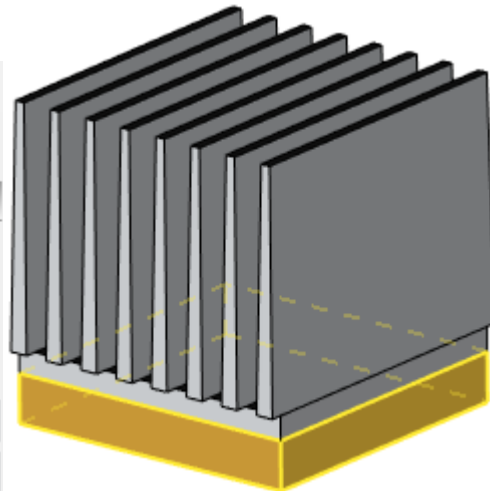
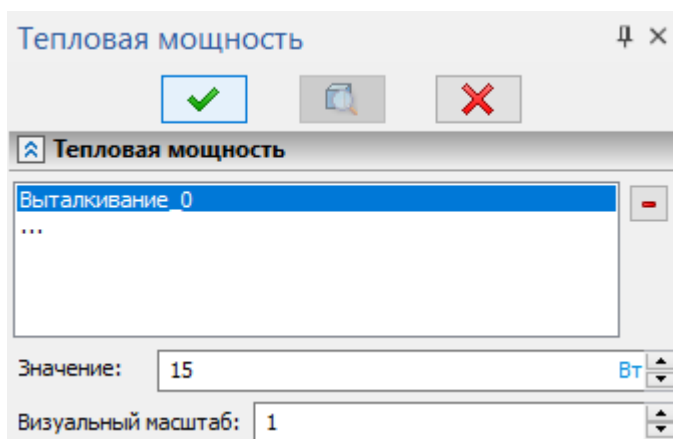
Модель микросхемы



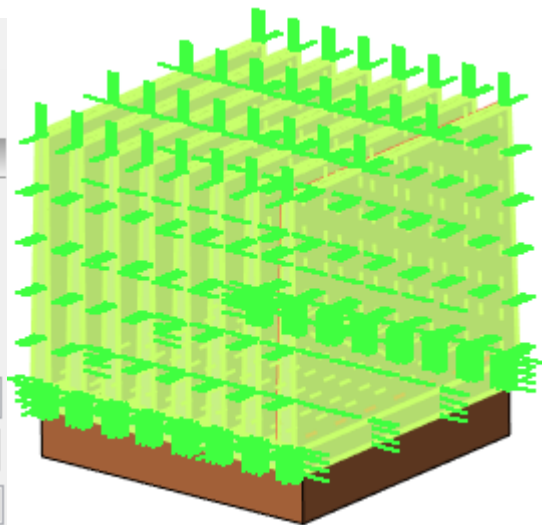
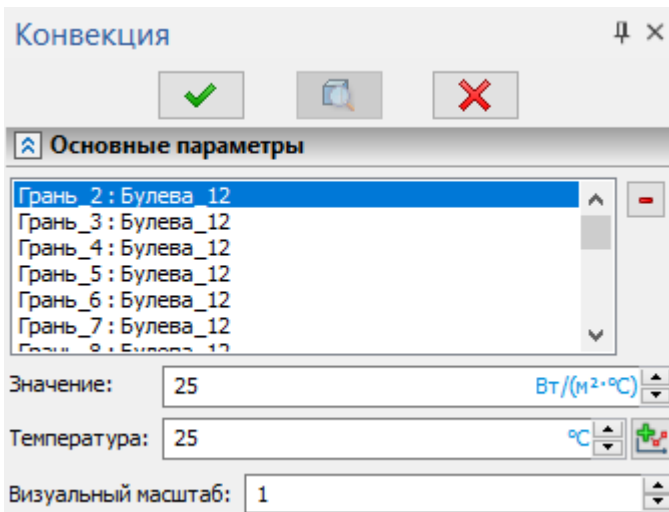
Конечно-элементная модель

Шаг 2. Наложение граничных условий

Зададим для нашей модели тепловые нагрузки. К объёму микросхемы приложим нагрузку «[Тепловая мощность](#)» 15 Вт, а на внешних теплоотводящих поверхностях радиатора определим граничное условие «[Конвекция](#)» с параметром конвекции $25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ и температурой окружающей среды (25°C). Учёт теплообмена за счёт взаимного и окружающего излучения в данной задаче можно пренебречь, т.к. вклад от излучения на ожидаемых температурах (десятки градусов) пренебрежимо мал. Выполнив команды построения конечно-элементной сетки и задания тепловых нагрузок, мы получаем готовую к расчёту конечно-элементную модель.



Задание нагрузки «Тепловая мощность»

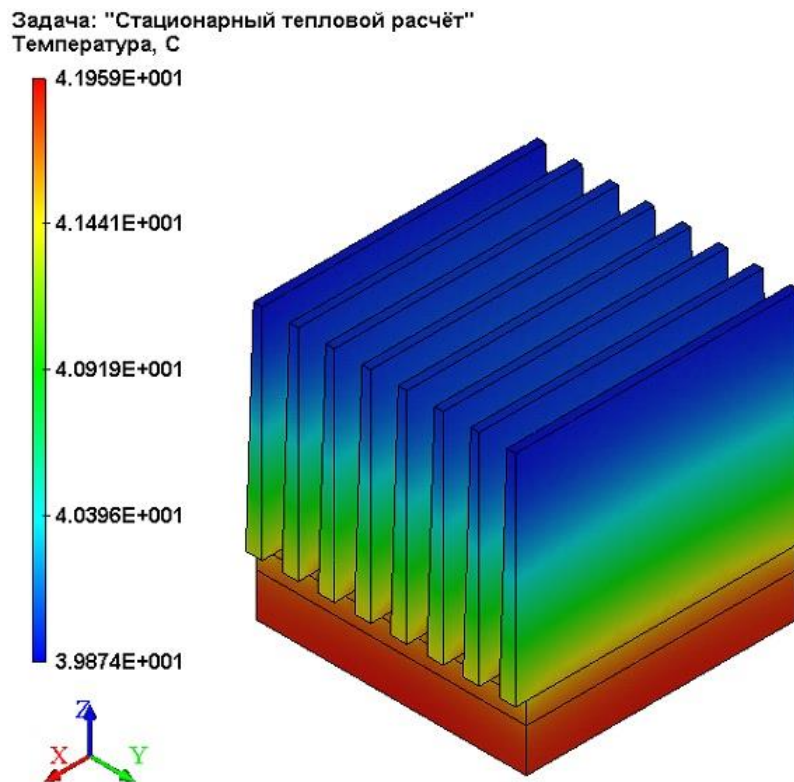


Задание граничных условий «Конвекция»

Шаг 3. Выполнение расчёта и анализ результатов

С помощью команды «Анализ > Расчёт» запустим тепловой расчёт. Для ускорения расчёта включаем режим **Линейная интерполяция** на закладке **Тепловой анализ**.

Список результатов расчёта отображается в окне «Задачи», и открывается с помощью контекстного меню в окне результатов расчёта. Максимальная температура по результатам теплового расчёта составляет 42,46 °С при температуре конвекции 25 °С. Используя команду «Изменить» контекстного меню дерева задач, отредактируем температуру конвективного теплообмена, установив для окружающей среды верхний предел, заданный рабочей температуры (55°С), и осуществим повторный расчёт. Получим максимальную температуру микросхемы 72,46 °С. Таким образом, радиатор обеспечивает требуемый температурный режим устройства во всем заданном режиме температур эксплуатации устройства.



Распределение температурных полей радиатора

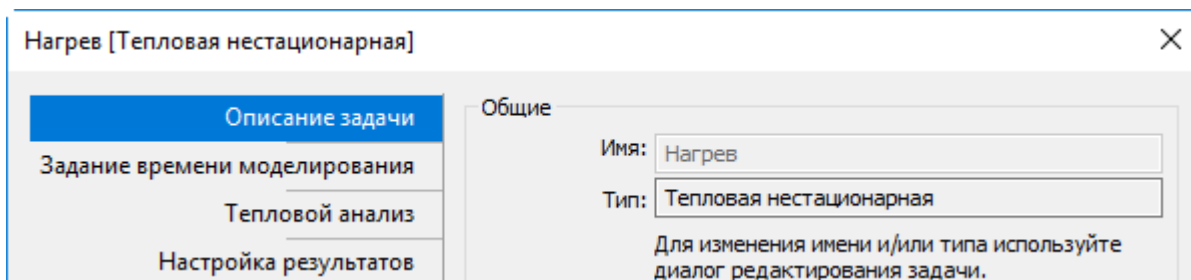
4.4.1.4. НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

1) Расчёт времени нагрева радиатора охлаждения. Нестационарный режим

Оценим время, необходимое для выхода устройства на установившийся тепловой режим. Для этого осуществим нестационарный тепловой расчёт системы «микросхема+радиатор».

Шаг 1. Создание копии задачи

Используя команду контекстного меню дерева задач «Копия», создадим копию исходной задачи стационарного теплового расчёта. На закладке **Описание задачи** параметров задачи изменим наименование задачи на «**Время нагрева**».



Шаг 2. Задание параметров нестационарного расчёта

Используя команду контекстного меню дерева задач **Изменить**, изменим тип задачи на «**Нестационарные тепловые процессы**». На закладке «**Задание времени моделирования**» параметров теплового расчёта зададим конечное время моделирования 30 мин, временной шаг 0.5 минуты. Для задания начальной температуры модели используем опцию - **Использовать заданные начальные температуры** и введём температуру окружающей среды 25°C.

Нагрев [Тепловая нестационарная]

Описание задачи

Задание времени моделирования

Тепловой анализ

Настройка результатов

Конечное время моделирования: 30 мин

Временной шаг: 0.5 мин

☐ Задача на установление равновесия температур

Начальный временной шаг: 1 с

Относительная погрешность: 0.01

Начальная температура

☒ Использовать заданные начальные температуры

Значение по умолчанию: 25 °C

☐ Использовать результаты теплового анализа:

Время:

Далее > Отмена

Задание расчётных параметров нестационарного теплового расчёта

Шаг 3. Выполнение расчёта и анализ результатов

После завершения расчёта для анализа доступны результаты на каждом временном шаге. Для просмотра таких результатов используем плавающую панель «**Временной процесс**», позволяющую при помощи ползунка быстро переключаться в интересующий момент времени. Используя эти инструменты, определяем, что нагревание микросхемы до температуры 42,46°C произойдет через 29 минут.

Окно с результатом теплового расчёта в момент времени 1740 с (29 мин)

Точно также, изменив температуру окружающей среды в параметрах задачи и нагрузки Конвекция на 55°C, определяем, что нагревание микросхемы до температуры 72,46°C произойдет через те же 29 минут.

2) Расчёт времени остывания радиатора охлаждения. Нестационарный режим

Оценим теперь время, необходимое для остывания радиатора охлаждения устройства после длительной работы.

Шаг 1. Создание копии задачи

Создадим копию задачи нестационарных тепловых процессов. При создании копии задачи появляется диалог «Копия задачи». Снятие флажка «**Копировать сетку**» приведёт к тому, что в разных задачах будут использоваться *одна и та же* сетка. Такой режим копирования обеспечивает *идентичность* конечно-элементных сеток двух или нескольких задач. Назовём новую задачу «**Время охлаждения**».

Откорректируем граничные условия задачи «**Время охлаждения**». Для этого из контекстного меню дерева задач командой «**Удалить**» удаляем из задачи «**Время охлаждения**», нагрузку «**Тепловая мощность**». Теперь задача «**Время охлаждения**» готова к заданию параметров расчёта.

Шаг 2. Задание параметров нестационарного расчёта

На закладке параметров теплового расчёта параметры временного анализа оставим без изменения – время моделирования 30 мин, шаг моделирования 0.5 минуты. В качестве начальной температуры модели установим результат предварительно рассчитанной задачи установившихся тепловых процессов - в нашем случае выберем из выпадающего списка задачу «Нагрев».

Охлаждение [Тепловая нестационарная]

Описание задачи

Задание времени моделирования

Тепловой анализ

Настройка результатов

Конечное время моделирования: 30 м

Временной шаг: 0.5 м

☐ Задача на установление равновесия температур

Начальный временной шаг: 1 с

Относительная погрешность: 0.01

Начальная температура

☐ Использовать заданные начальные температуры

Значение по умолчанию: 298 К

☒ Использовать результаты теплового анализа:

Нагрев

Время:

Далее >

Отмена

Настройка параметров задачи при расчёте процесса охлаждения

Шаг 3. Анализ результатов расчёта

Используя панель «Временной процесс» определяем, что практически полное остывание радиатора произойдет примерно через 24,5 минуты, после выключения устройства, работавшего в стационарном режиме, при этом температура платы будет отличаться от температуры окружающей среды на 0,1°C.

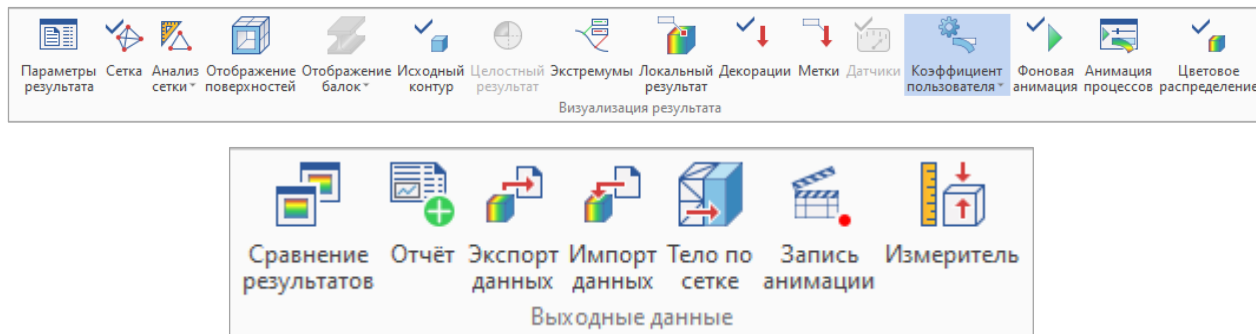
Расчёт охлаждения устройства. Поле температур на 1470 секунде расчётного времени

5. ПОСТПРОЦЕССИНГ: АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТА

Постпроцессор T-FLEX Анализа предназначен для всестороннего изучения результатов конечно-элементного моделирования. Особенностью постпроцессора T-FLEX Анализа является его глубокая интеграция с T-FLEX CAD. Работа с результатами расчёта производится из ленты **Результаты анализа**. Вкладка **Результаты анализа** является динамической, т. е. появляется автоматически при открытии любого результата см. п. [Открытие результатов](#). На ленте **Результаты анализа** расположены как сервисные команды, служащие для

для обеспечения быстрой и удобной работы с результатами, визуального представления см. п. [Сервисы постпроцессинга](#), так и команды по настройке и управлению результатами, такие как [Параметры результата](#), [Локальный результат](#), [Тело по сетке](#).

Команды, расположенные в группе «Визуализация расчёта»:



Основные темы в этом разделе:

- [Открытие результатов](#)
- [Работа с результатами](#)
- [Параметры результата](#)
- [Настройка цветовой шкалы](#)
- [Выбор областей сетки](#)
- [Локальный результат](#)
- [Анимация процессов](#)
- [Сравнение результатов](#)
- [Использование графиков для анализа результатов](#)
- [Измеритель](#)
- [Отчёт](#)
- [Сервисы постпроцессинга](#)
- [Специальные расчётные возможности](#)

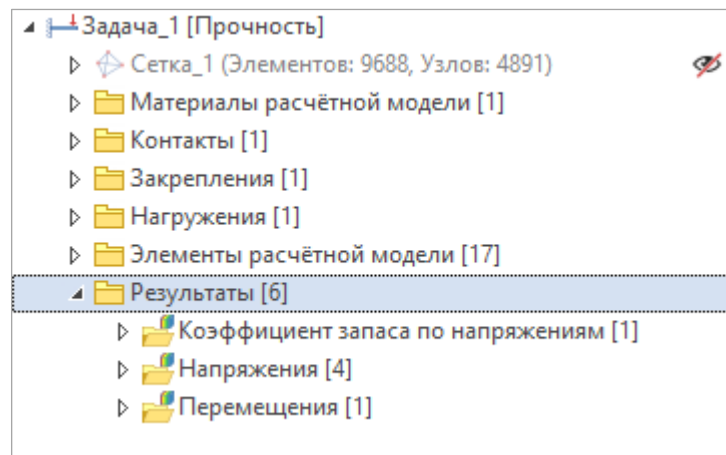
5.1. ОТКРЫТИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

После успешного завершения расчёта, можно просмотреть результаты расчёта. Они отображаются в дереве задачи окна **Задачи** или окна **3D Модель** в папке **Результаты**, цифра, стоящая в скобках, указывает на количество результатов, полученных для данной задачи. Результаты расчёта группируются по типам результатов в свои папки.

Постпроцессор T-FLEX Анализа поддерживает работу в многооконном режиме. Одновременно может быть открыто несколько окон: с разными результатами, объединёнными результатами в рамках одной задачи или разных задач.

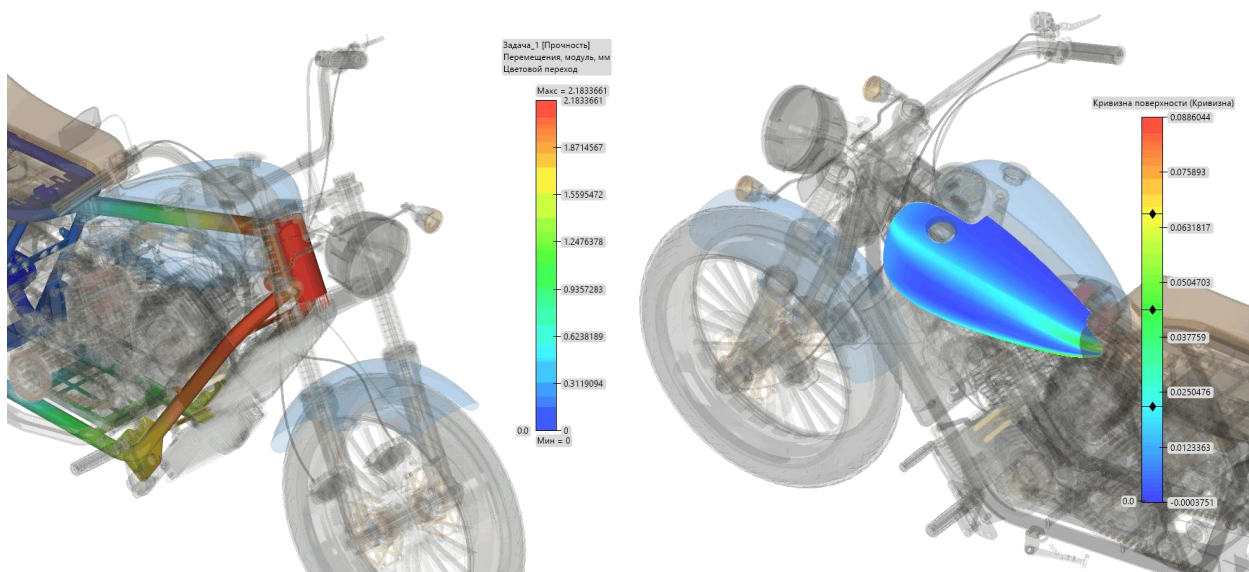
При просмотре любого результата, автоматически появляется вкладка **Результаты анализа**, на ленте которой, размещены команды по работе с результатами см. р. [Постпроцессинг: Анализ результатов расчёта](#).

Для удаления всех результатов расчёта используется команда **Очистить задачу** см. п. [Очистить задачу](#).



Просмотр одиночного результата

При открытии одного результата расчёта необходимо активировать команду **Видимость** в дереве задачи или окна **3D Модель**. Состояние видимости результатов отображается иконкой  (элемент погашен) или  (элемент видим) в дереве модели. В основной 3D сцене отображается эпюра результата расчёта с окружением (элементами не вошедшие в состав задачи).

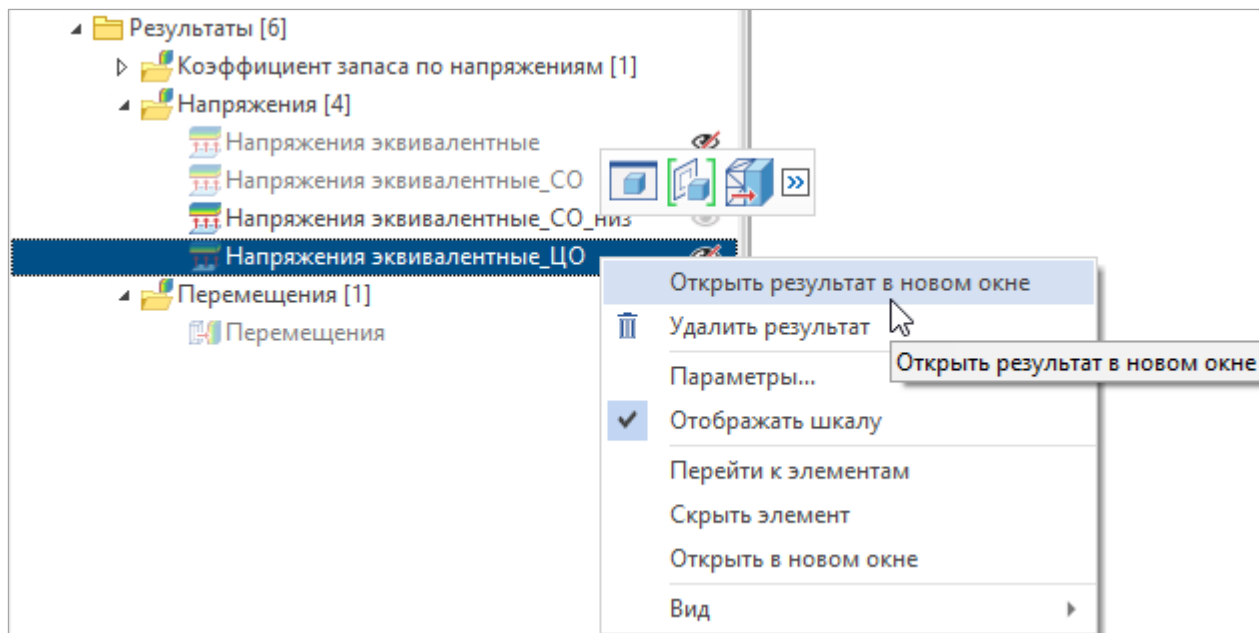


Пример отображения результата

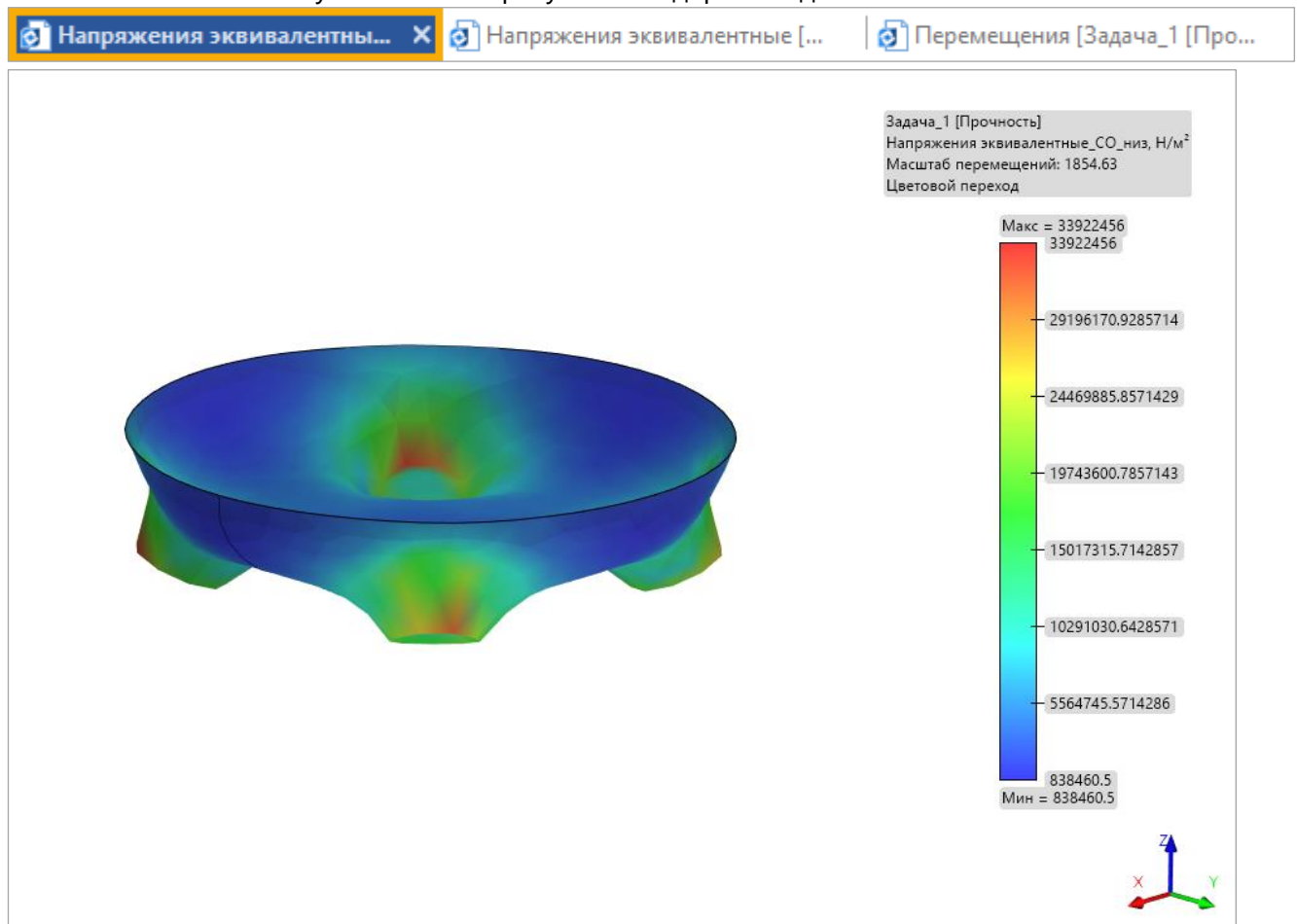
Просмотр одиночного результата расчёта в новом окне

Просмотреть результат расчёта можно в новом окне. Это можно сделать двумя способами:

- при выборе типа результата через контекстное меню  по команде **Открыть результат в новом окне** в дереве задачи окна **Задачи** или окна **3D Модель**,
- по   на название результата в дереве задачи окна **Задачи** или окна **3D Модель**.



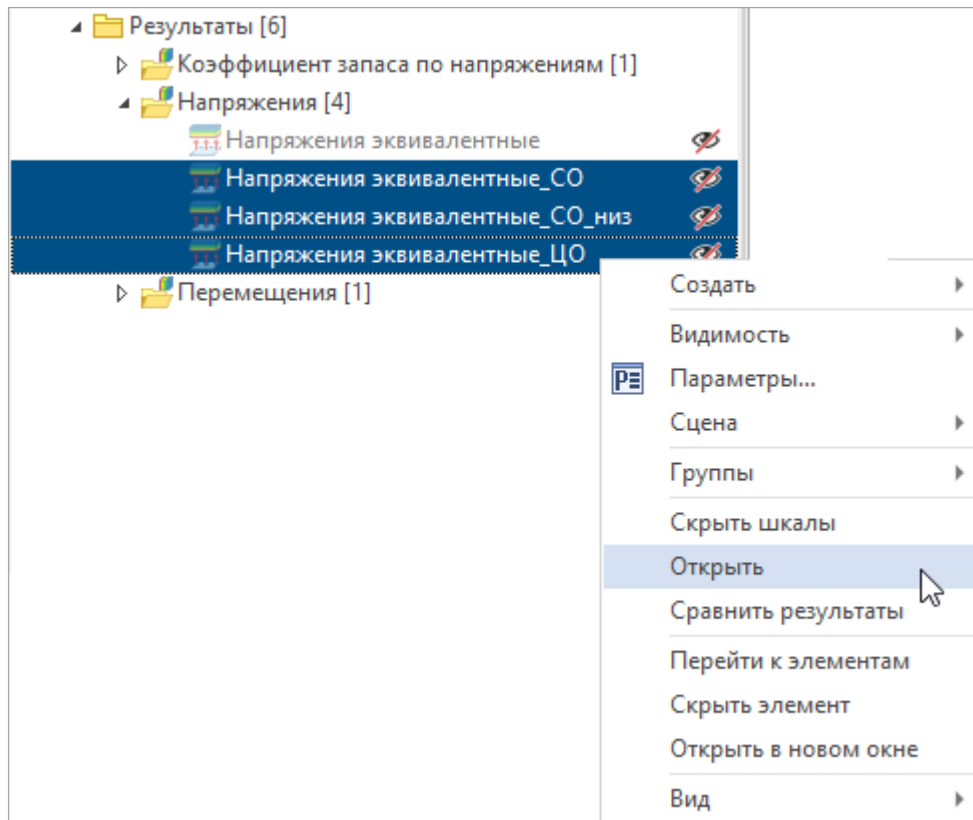
Откроется новое окно, в котором будет отображаться эпюра результата расчёта без окружения и диалоговое окно «Параметры результата» см п. [Параметры результата](#). Название нового окна соответствует названию результата в дереве задачи.



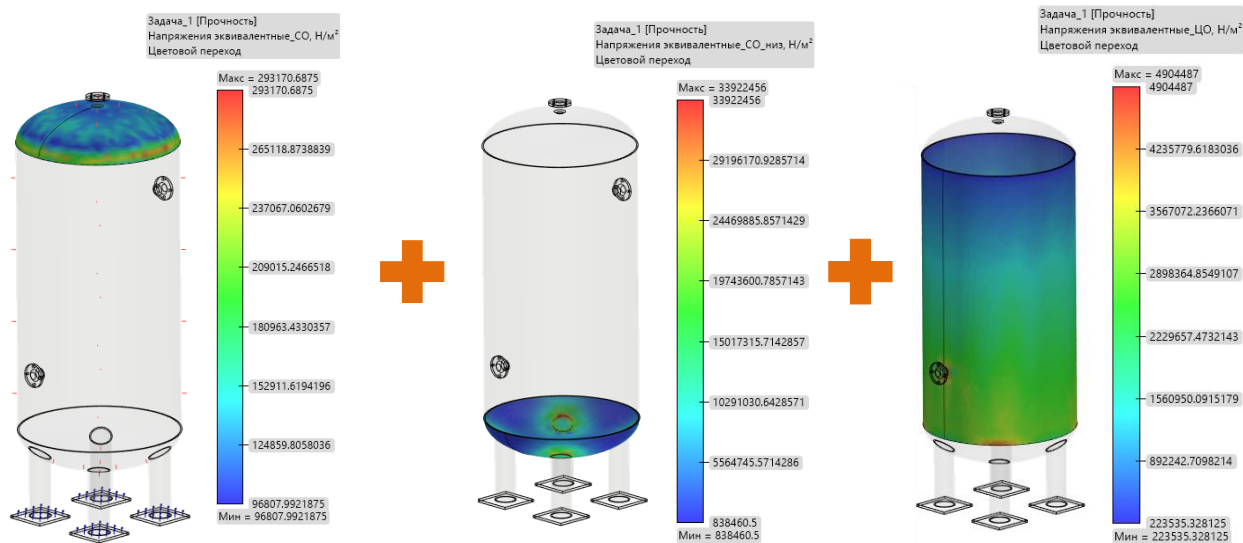
Пример отображения результата в новом окне

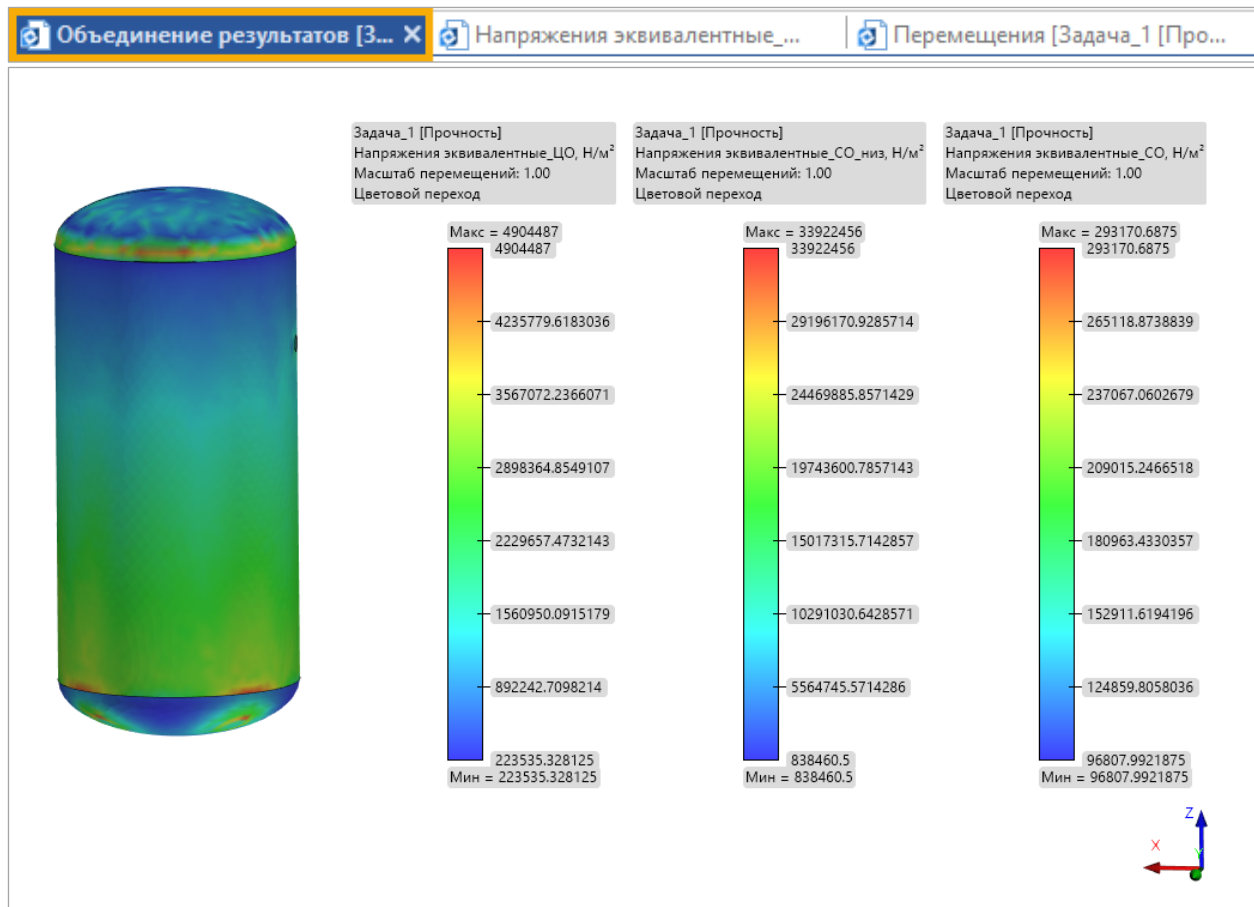
Просмотр нескольких результатов расчёта в рамках одной задачи.

Просмотр нескольких результатов возможен только в рамках активной задачи. В дереве задачи окна **Задачи** или окна **3D Модель** необходимо выбрать интересующие результаты (режимом мультиселекта) и вызвать команду **Открыть** из контекстного меню.



Откроется новое окно, в котором будут отображаться эпюры выбранных результата расчёта со шкалами соответственно. Новое окно будет иметь название **Объединение результатов**.

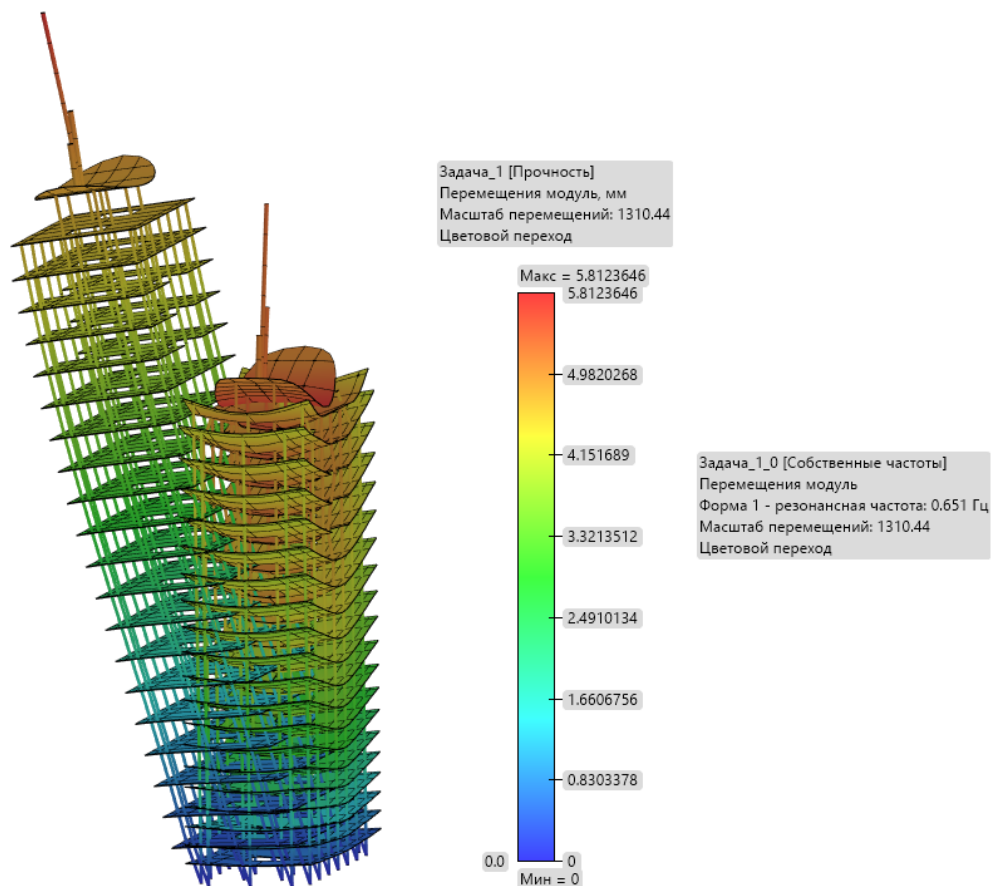




Пример открытия нескольких результатов

Просмотр результатов расчёта разных задач

Открыть результаты из разных задач возможно только при ручном создании новой сцены. Для этого необходимо вызвать команду **Сцена** из ленты **Вид**. В блоке «Показать элементы» пользователь должен указать результаты из задач окна **3D Модель**, которые хочет отобразить.

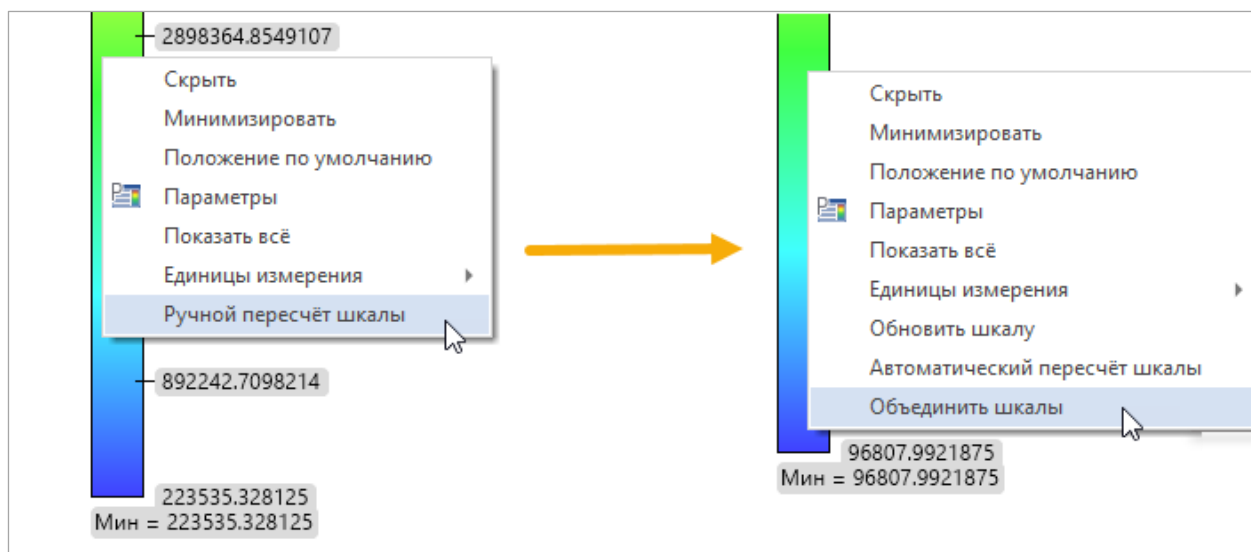


Пример открытия результата с размещением на нём нескольких типов результата из разных задач

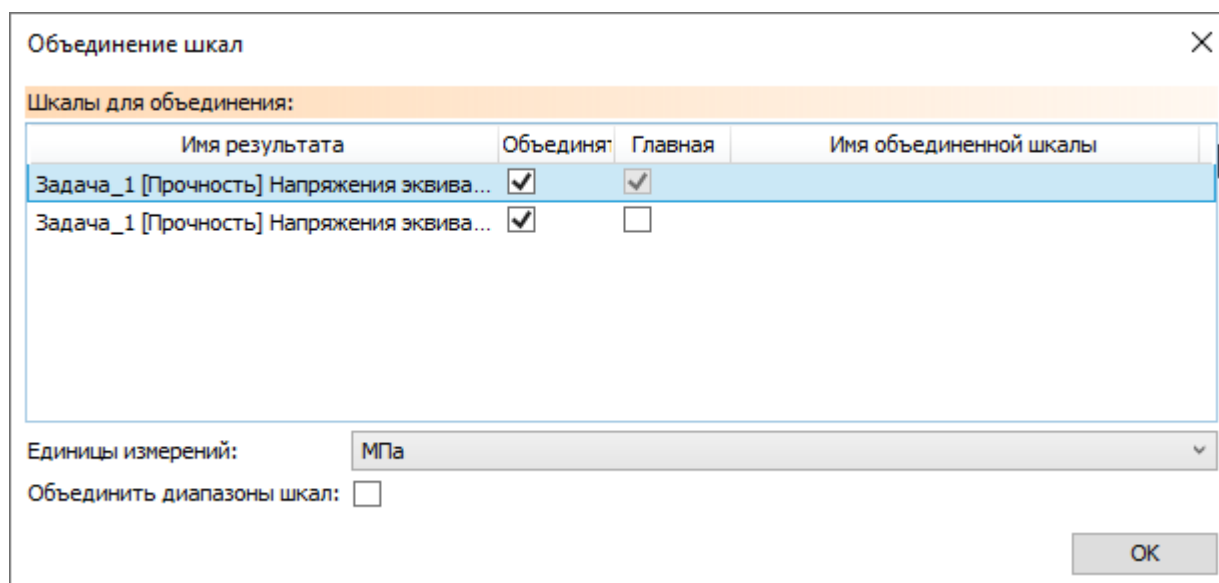
Принцип работы команды объединение шкал

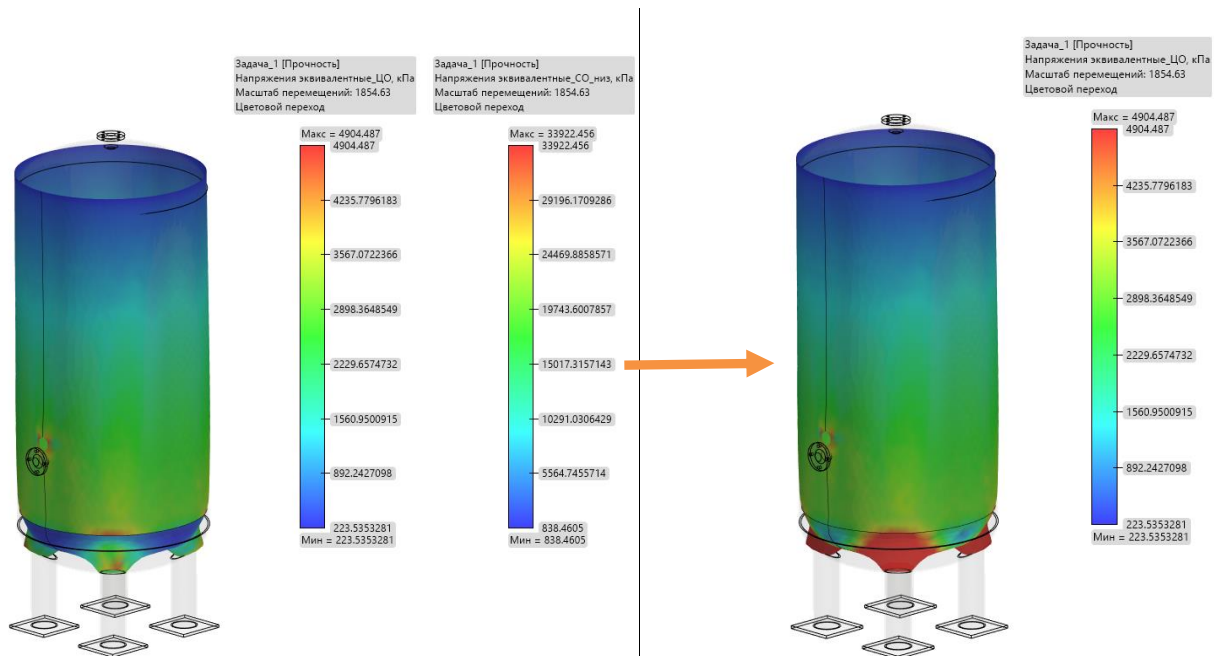
Объединение шкал доступно только для результатов, которые были рассчитаны в рамках одной активной задачи и принадлежат одному типу результата. Шкалы должны быть переведены в ручной режим обновления.

Для перевода шкал в ручной режим обновления необходимо встать на шкалу, вызвать контекстное меню и указать режим – **Ручной пересчёт шкалы** см. п. [Настройка цветовой шкалы](#). После этого станет доступна команда **Объединить шкалы** в контекстном меню шкалы.

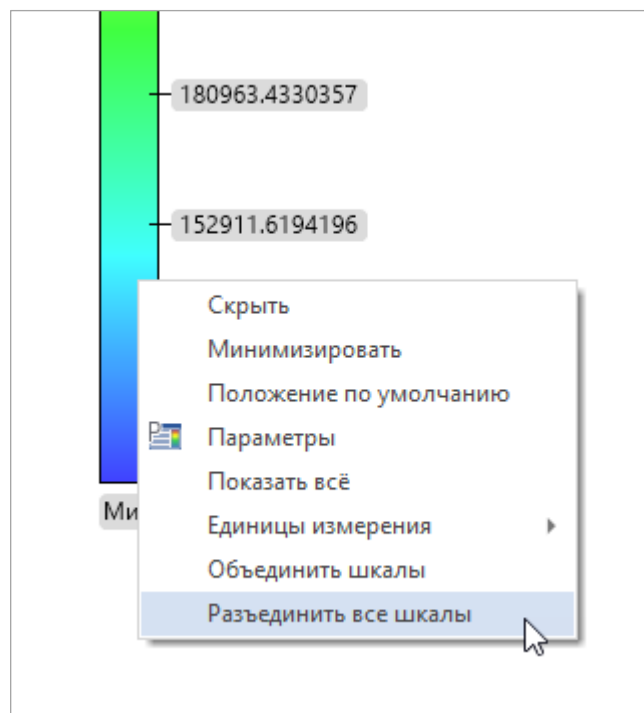


Далее откроется модальное диалоговое окно, в котором пользователю нужно указать какие шкалы необходимо объединить и какую из шкал принять за главную. Главная шкала - параметр, который указывает системе, что для всех объединяемых результатов будет использоваться данная шкала со всеми её параметрами. После подтверждения команды, произойдет объединение шкал и эпюра результатов расчёта перестроится.





Для разъединения шкал, необходимо также вызвать команду **Разъединить все шкалы** из контекстного меню шкалы. Обновить результаты для получившихся шкал можно через команду **Обновить** контекстного меню шкалы. Для автоматического обновления шкалы необходимо перевести ее в режим **Автоматический пересчет шкалы** см. п [Настройка цветовой шкалы](#).



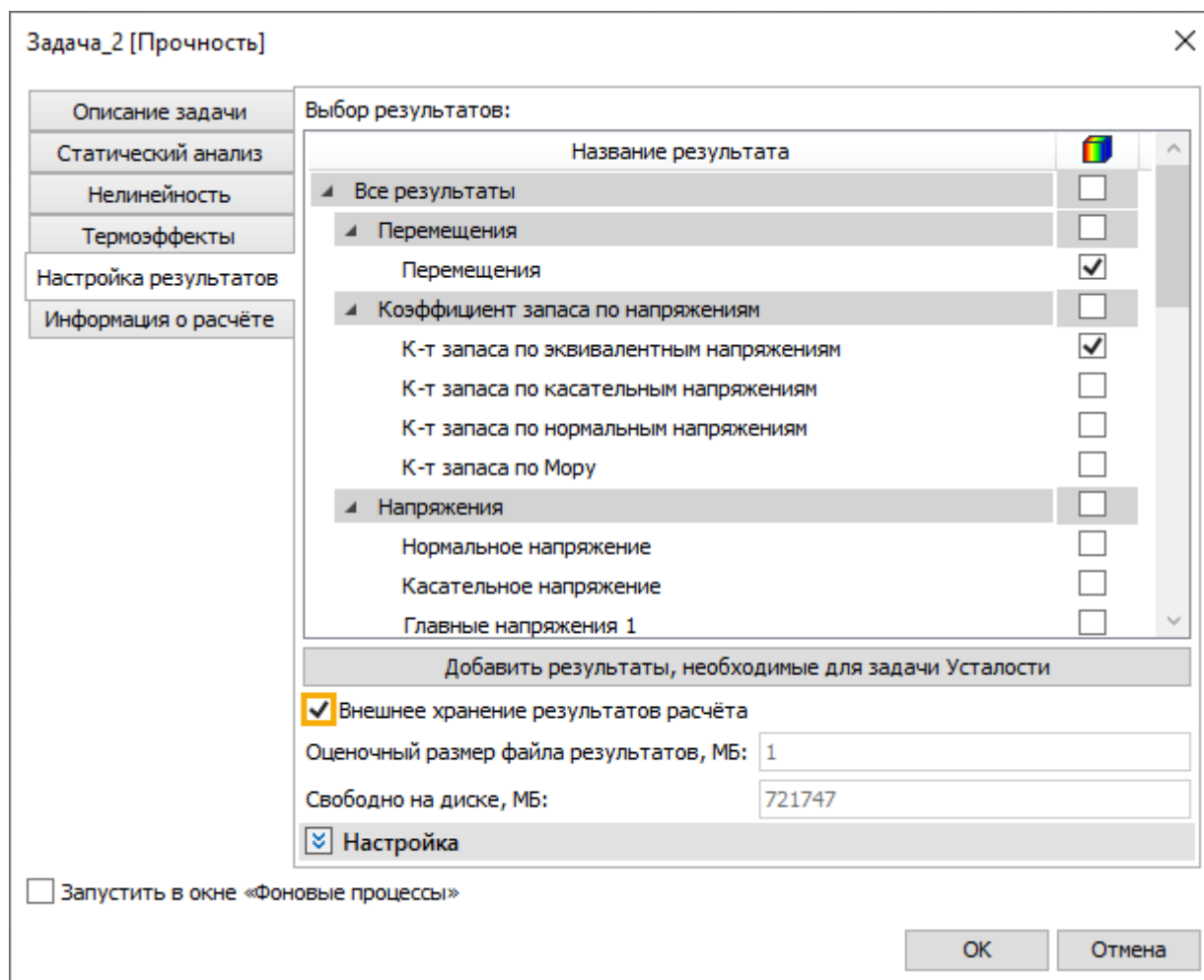
5.2. РАБОТА С РЕЗУЛЬТАТАМИ

5.2.1. ВНЕШНЕЕ ХРАНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В системе T-FLEX Анализ для каждой задачи можно настроить тип хранения результата: внутренне хранение (по умолчанию) или внешнее хранение.

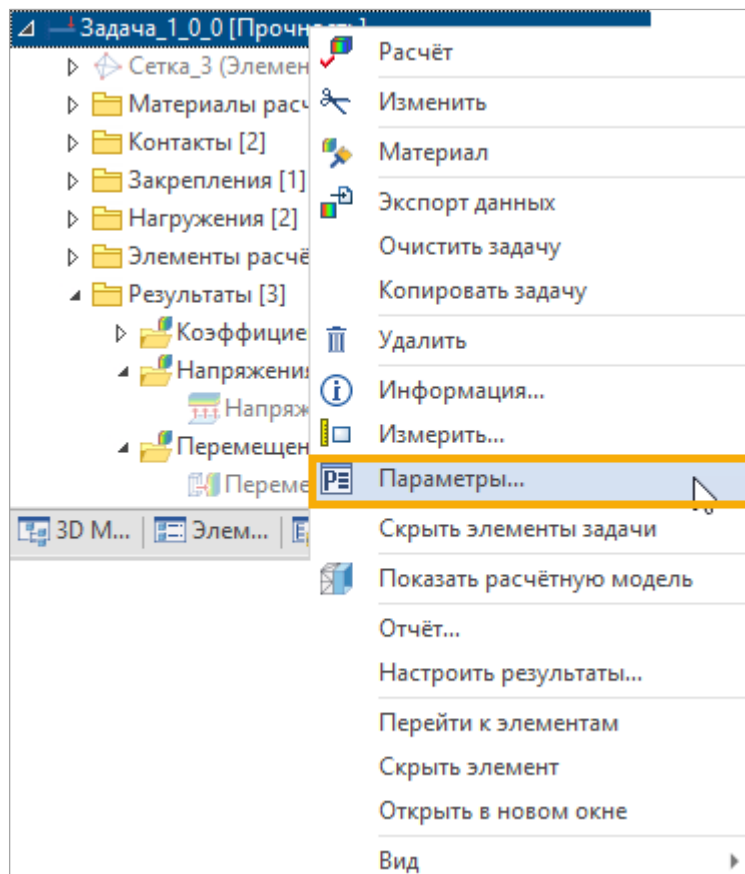
Если включено внутреннее хранение, результаты расчета задачи сохраняются непосредственно в grb-файл модели. Если включено внешнее хранение – результаты расчета сохраняются специальным tfea-файлом в папку с grb-файлом. Чтобы программа считывала внешние файлы результатов, необходимо, чтобы они хранились в одной папке с файлом модели. Если объем результатов достаточно большой, рекомендуется использовать внешнее хранение. Высокообъемные файлы с внешним хранением обладают более высокой скоростью чтения и сохранения в силу особенностей алгоритмов системы T-FLEX Анализ.

Активировать данную опцию «Внешнее хранение результатов расчёта» можно на вкладке Настройка результатов при запуске на Расчёт.



Поменять тип хранения результатов после расчета задачи можно в том же окне выбрав 

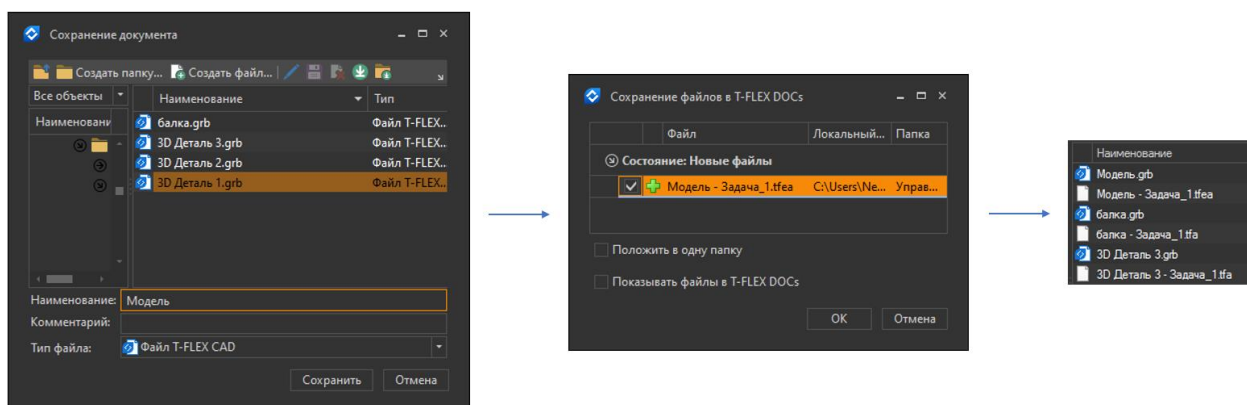
Параметры в контекстном меню по нажатию  на имени выбранной задачи в дереве окна Задачи.



При превышении результатами порогового размера 128 МБ программа предложит переключиться на внешнее хранение.

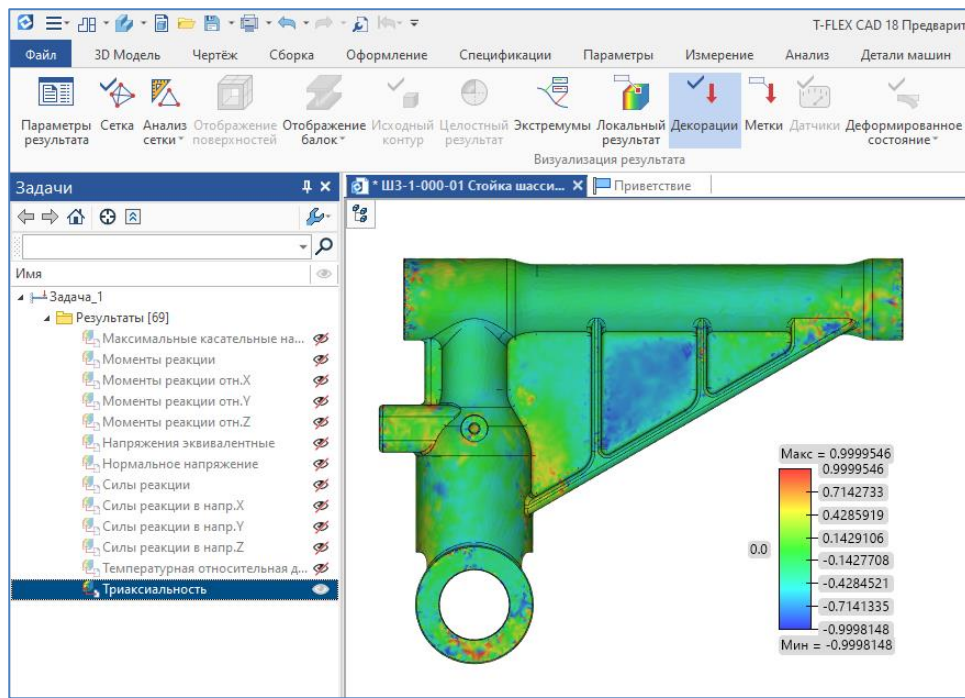
Пороговый размер можно поменять в Настройках T-FLEX Анализа на вкладке Документ см. п. [Настройки](#).

При сохранении документа GRB системы T-FLEX CAD, содержащего результаты расчёта T-FLEX Анализ, файл tfea автоматически будет сохранён в T-FLEX DOCs.



Пример сохранения в T-FLEX DOCs документа с расчётом

Доработка механизма внешнего хранения результатов расчёта tfea в дополнение позволяет открывать и просматривать только результаты расчёта без исходных данных по задаче (аналогичным образом реализован импорт внешних результатов из сторонних систем формата VTK).



Пример открытия результатов расчёта из внешнего файла результатов tfea

5.2.2. ОБЪЁМНАЯ ТЕРМОДЕФОРМАЦИЯ

Объёмная Термодеформация (дилатация) – это относительное изменение объема материала вследствие тепловой деформации. Величина обычно используется в качестве скалярной меры теплового повреждения каменных материалов (горные породы, бетон, искусственные камни и т.п.).

Пусть до деформации элемент упругой среды имел объём dV , в результате тепловой деформации (нагрева или охлаждения) объём изменился и стал равен dV' . Тогда Объёмная Термодеформация будет равна:

$$\theta = \frac{dV' - dV}{dV}.$$

Далее будет удобно полагать, что dV и dV' – координатные элементы объёма в декартовых координатах. Тогда, учитывая:

$$dV = dx \cdot dy \cdot dz, \quad dV' = dx' \cdot dy' \cdot dz'$$

получим:

$$\theta = \frac{dx' \cdot dy' \cdot dz' - dx \cdot dy \cdot dz}{dx \cdot dy \cdot dz} = \frac{dx'}{dx} \cdot \frac{dy'}{dy} \cdot \frac{dz'}{dz} - 1$$

Примем во внимание:

$$\frac{dx'}{dx} = \frac{dx' - dx + dx}{dx} = \frac{dx' - dx}{dx} + 1 = \varepsilon_x + 1$$

где ε_x - компонента тензора деформации, характеризующая термическую деформацию растяжения-сжатия по оси X.

Аналогичным образом:

$$\frac{dy'}{dy} = \varepsilon_y + 1, \quad \frac{dz'}{dz} = \varepsilon_z + 1$$

С учетом последних выкладок выражение для Объемной деформации переписется в виде:

$$\theta = (\varepsilon_x + 1) \cdot (\varepsilon_y + 1) \cdot (\varepsilon_z + 1) - 1 = \theta = 1 + \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z + \varepsilon_x \cdot \varepsilon_y + \varepsilon_y \cdot \varepsilon_z + \dots - 1$$

Так как в теории упругости деформации линейные деформации это околонулевые величины, то, пренебрегая околонулевыми величинами более высокого порядка, получаем:

$$\theta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$$

При $\theta > 0$ происходит увеличение объёма среды, т. е. её разуплотнение (набухание); при $\theta < 0$ происходит уменьшение объёма среды, т. е. её уплотнение (усадка).

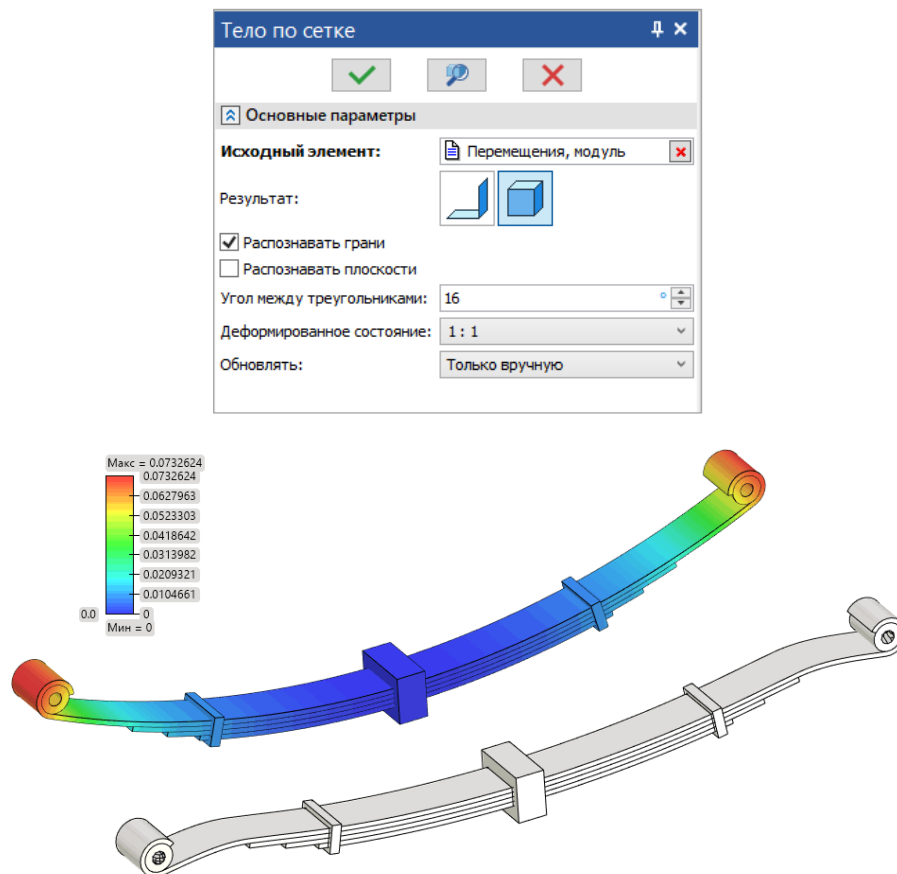
5.2.3. ТЕЛО ПО СЕТКЕ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Результаты анализа > Визуализация результатов > Тело по сетке
Клавиатура	Текстовое меню
	Результаты анализа > Тело по сетке

Команда **Тело по сетке** позволяет получить «Тело» на основе деформированной геометрии по результатам расчёта в масштабе «1:1» или текущего значения коэффициента масштабирования «Из сцены».

Команда применима для всех типов элементов задачи: тел, оболочек, балок.



Применение команды «Тело по сетке» - Получение тела на основе деформированной геометрии

5.3. ПАРАМЕТРЫ РЕЗУЛЬТАТА

Вызов команды:

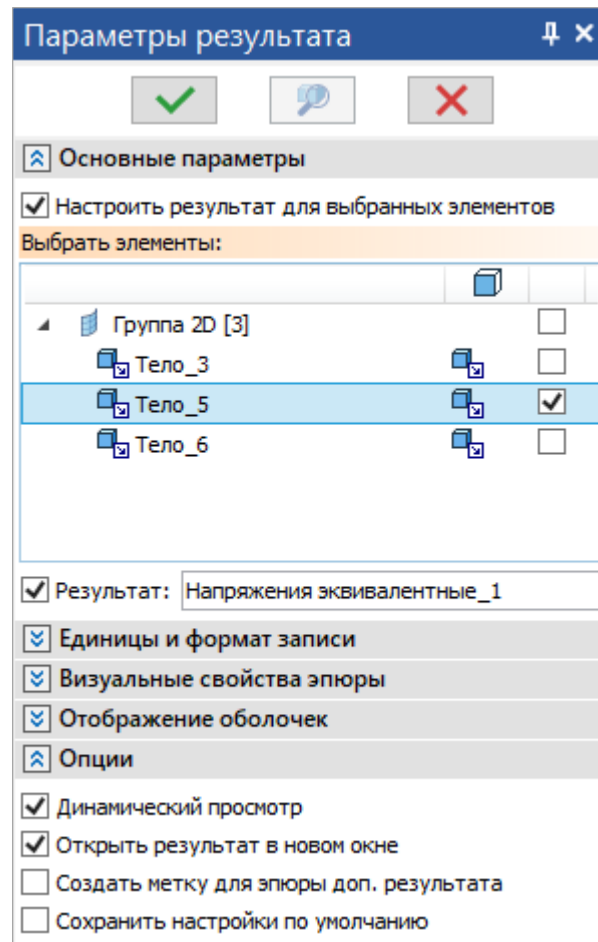
Пиктограмма	Лента
	Результаты анализа > Визуализация расчёта > Параметры результата
Клавиатура	Текстовое меню
	Результаты анализа > Параметры результата

Команду **Параметры результата** можно вызвать несколькими способами:

- из ленты **Результаты анализа**;
- при выборе типа результата через контекстное меню  в дереве задачи окна **Задачи** или окна **3D Модель**;
- по   на название результата в дереве задачи окна **Задачи** или окна **3D Модель**.

Команда **Параметры результата** предназначена для:

- отображения результатов расчёта для каждого элемента задачи. По умолчанию результаты отображаются для всей конструкции;
- создания дополнительного результата на основе текущего;
- отображение компонент для обычных и многослойных оболочек;
- отображение результатов расчёта в других СК для инвариантных величин;
- различного визуального представления эпюр результата.

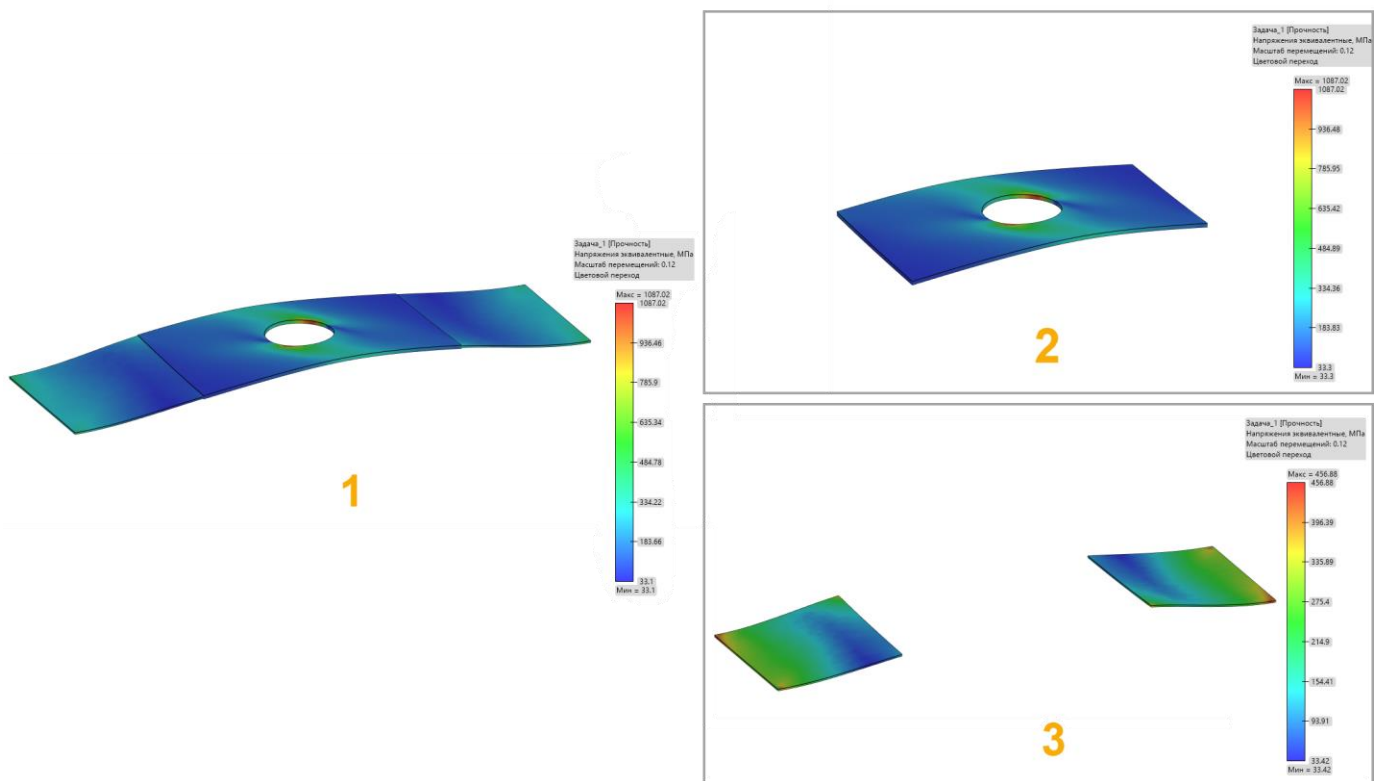
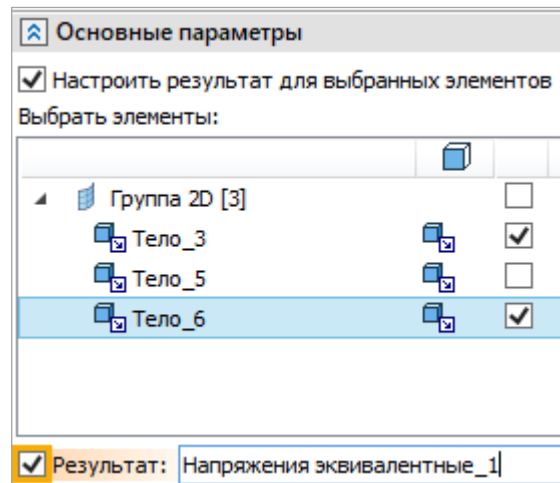


Группа «Основные параметры»

Список «Выбрать элементы» формируется автоматически из элементов, входящих в задачу. При выборе элемента из списка в основной 3D сцене отображается эпюра результата расчёта для этого элемента.

Если активировать переключатель **Результат**, можно сохранить результат для каждого элемента задачи или создать дополнительный результат на основе текущего. В активном поле дать название новому результату.

Данные результаты помещаются в папку выбранного типа результата в дереве задачи окна **Задачи** или окна **3D Модель**.



Пример отображения результатов: 1 – Распределение эквивалентных напряжений для всей конструкции, 2,3 – Распределение эквивалентных напряжений в элементах задачи

Группа «Единицы и формат записи»

В группе настраиваются параметры по отображению результатов расчета в других ЕИ, а также настраивается система исчисления.

Можно настроить следующие параметры:

- **Единицы измерения** – параметр для смены единиц измерения выбранного результата. По умолчанию отображаются те ЕИ, в которых производился расчёт;
- **Тип** – параметр для смены типа числа в шкале. Выбранный тип дублируется в шкалу и отчёт.

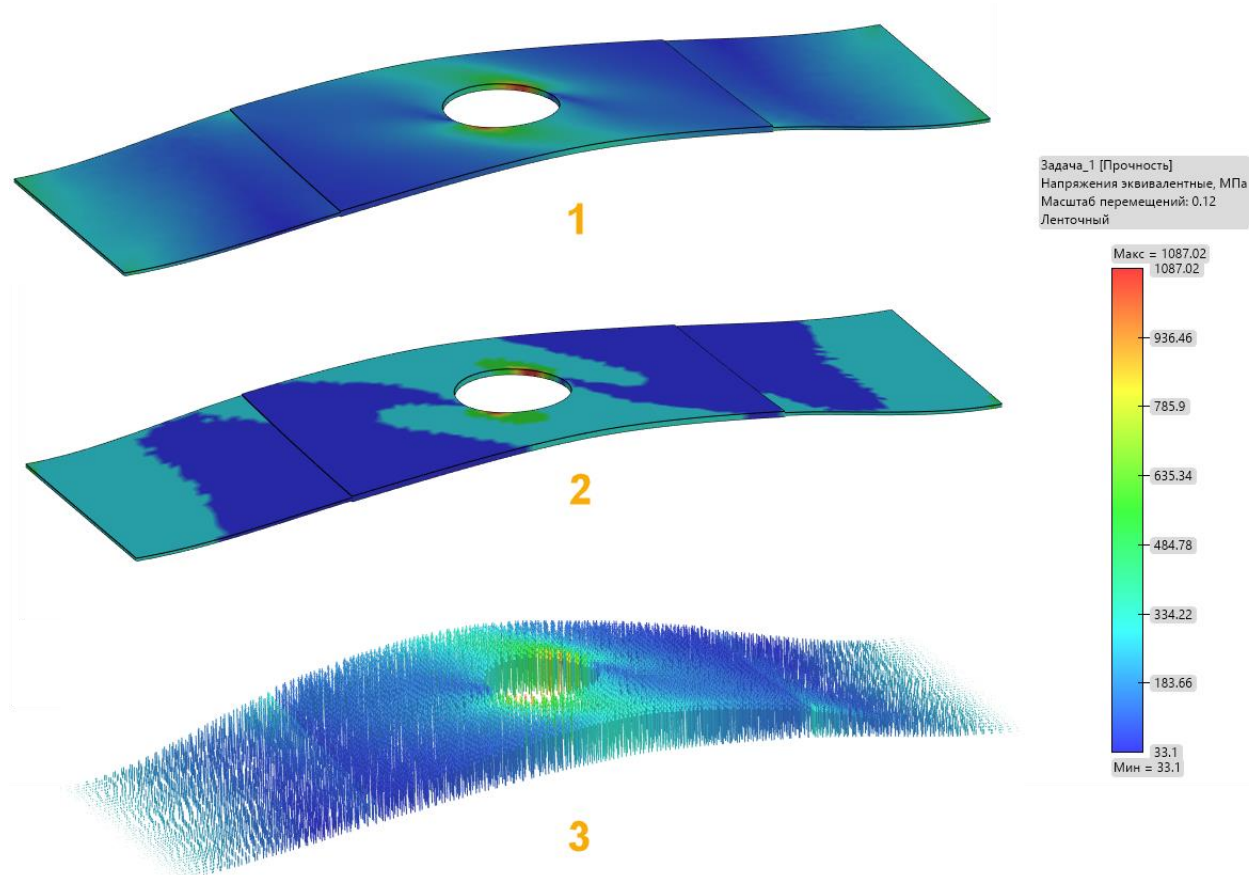
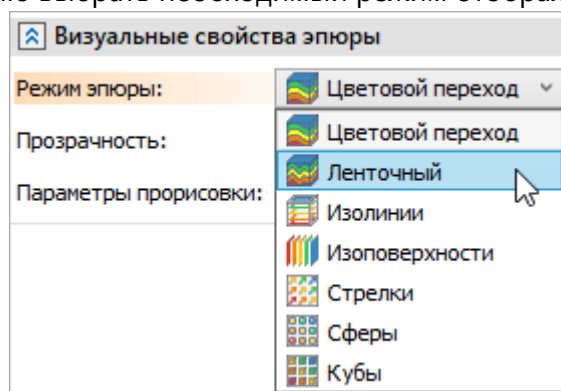
- **Количество знаков** – параметр для определения количества знаков после запятой. Число должно быть положительным и целым. Допустимые ввод от единицы до бесконечности.

Группа «Визуальные свойства эпюры»

В группе настраиваются параметры, с помощью которых возможно изменять визуальные свойства эпюры.

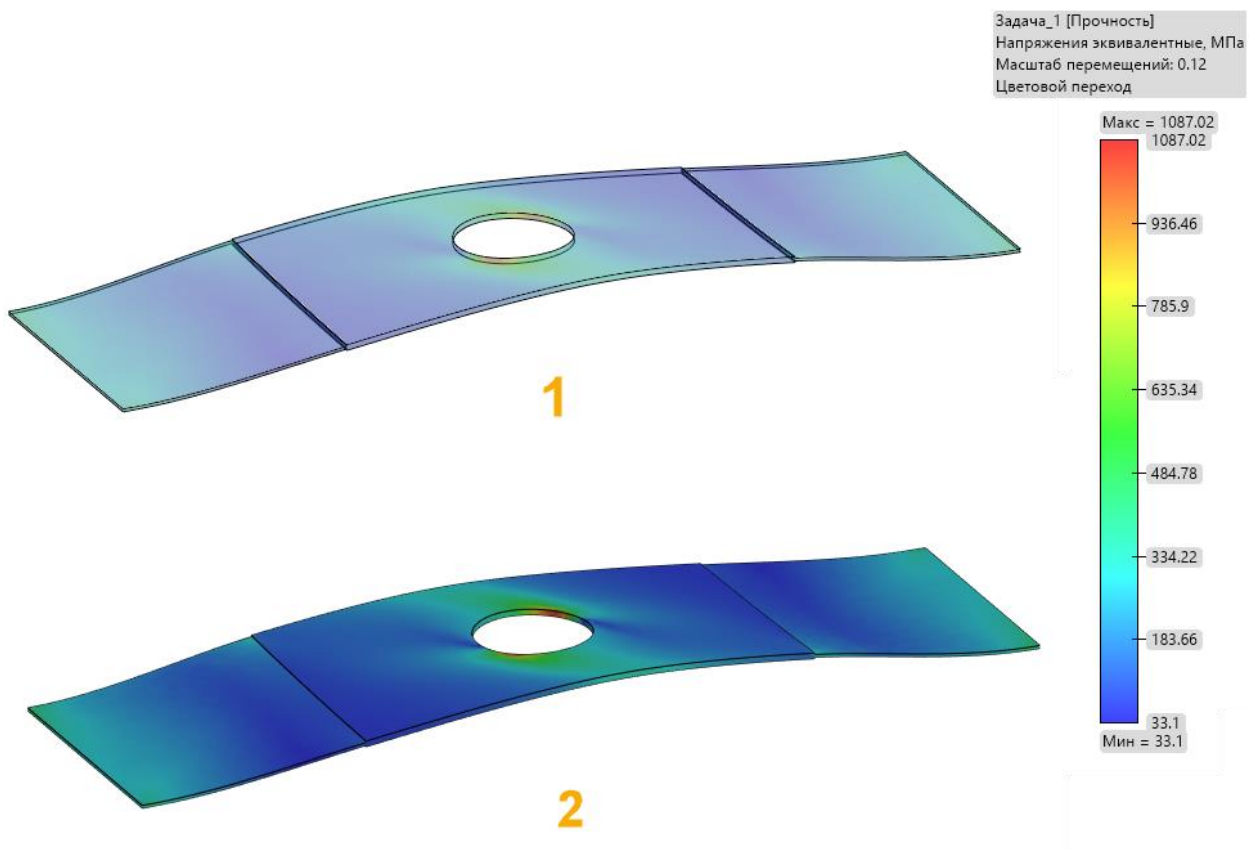
Можно настроить следующие параметры:

- **Режим эпюры** – визуальное представление эпюры результатов. Система предлагает пользователю выбрать необходимый режим отображения из списка.



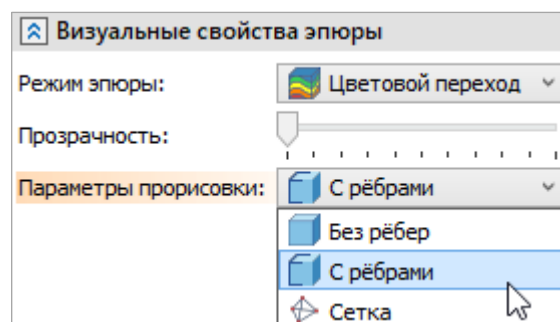
Пример отображения эпюр результатов в разных режимах: 1 – «Цветовой переход»,
2 – «Ленточный», 3 – «Стрелки»

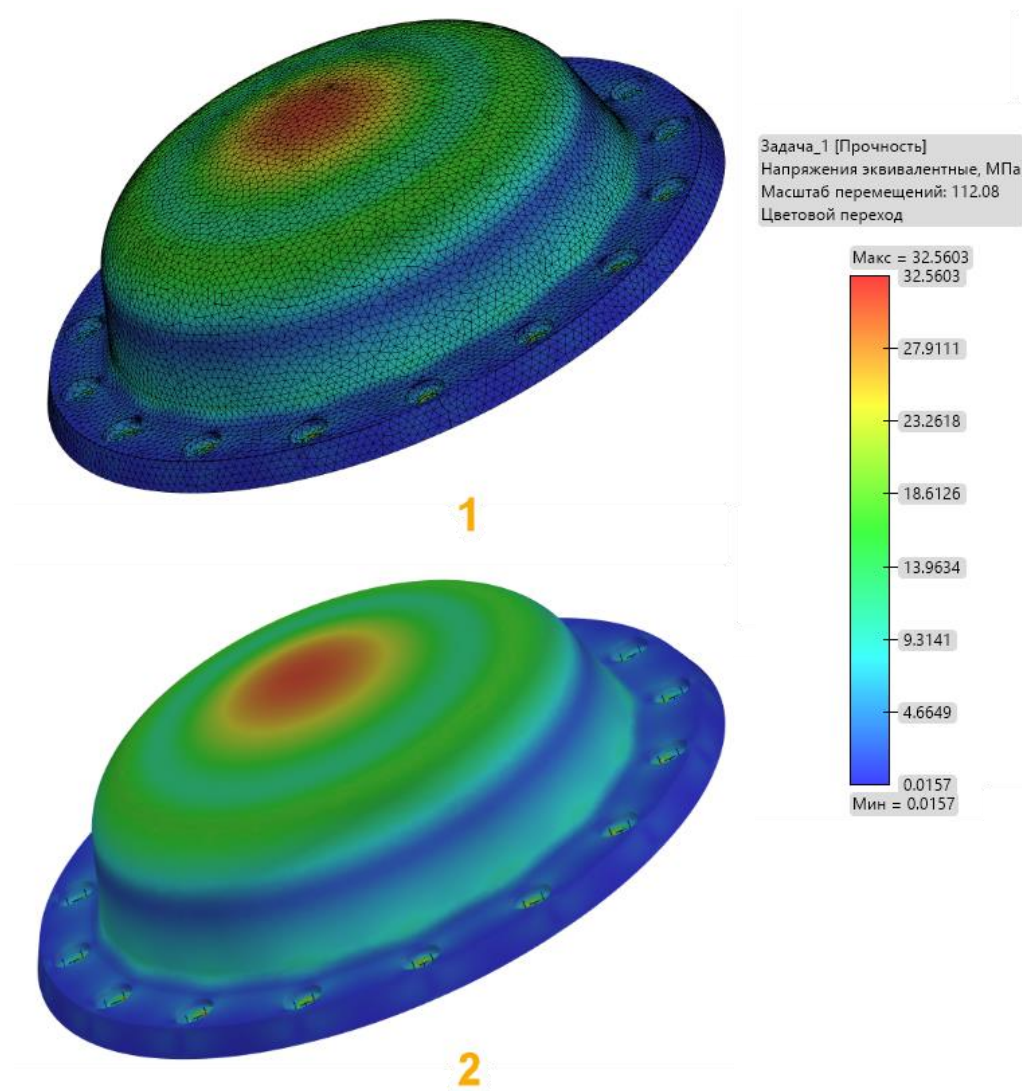
- **Прозрачность** – параметр, отвечающий за прозрачность выбранной эпюры. Изменяется от 0 до 100 в процентах. Где 0 — это не прозрачно (установлено по умолчанию), а 100 — полностью прозрачно.



Пример отображения эпюр результатов разной прозрачности: 1 – прозрачность 70%,
2 – прозрачность 0%

- **Параметры прорисовки** – параметр, отвечающий за отображение границ эпюры результатов. Система предлагает пользователю выбрать необходимый вариант отображения из списка.

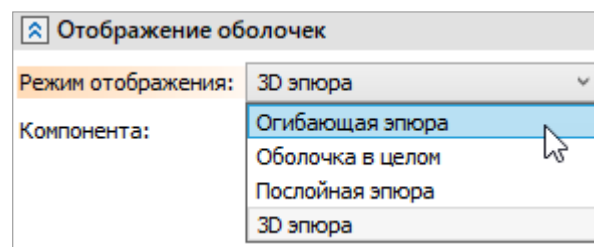




Пример отображения эпюр результатов с настройками «Параметры прорисовки»: 1 – «Сетка»,
2 – «Без рёбер»

Группа «Отображение оболочек»

- **Режим отображения** – параметр, позволяющий сменить представление результата; Для многослойных оболочек для всех компонентов напряжений, коэффициента запаса и деформаций доступны следующие режимы: **Огибающая эпюра**, **Оболочка в целом**, **Послойная эпюра**, **3D эпюра**



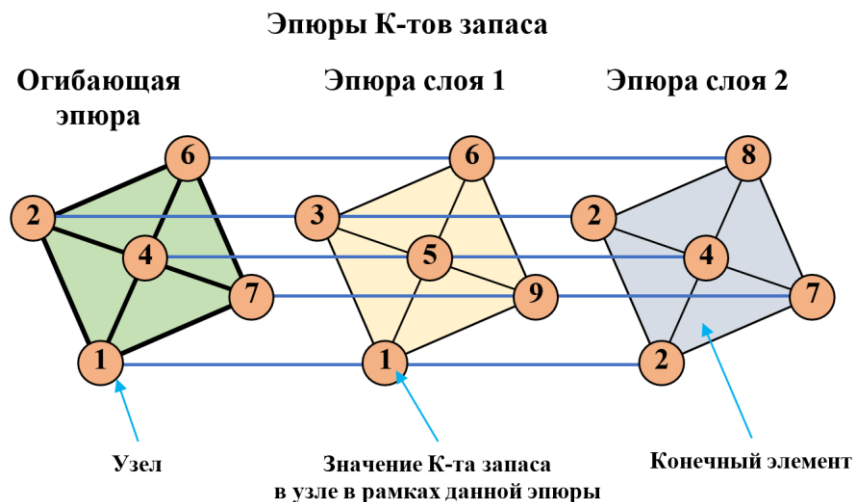
- **Компонента** – параметр для отображения компонента выбранного режима представления оболочки;
- **Номер слоя** – параметр, который появляется для режима отображения **Послойная эпюра** и служит для переключения результатов эпюры по слоям. Это возможно, если материал элемента задан составным типа Многослойный или Сэндвич-панель см. п. [Составные материалы для моделирования композитов](#). Допустимые границы для ввода от единицы до n-го количества возможных слоев в задаче.

Огибающая эпюра – 2D эпюра. Для многослойных оболочек каждая точка эпюры (узел КЭ сетки) имеет или минимальное значение относительно всех слоев в случае коэффициента запаса, или максимальное из модулей значений (модуль самого опасного значения) относительно всех слоев в случае напряжения и деформаций. Для обычных оболочек каждая точка эпюры имеет минимальное значение относительно верха и низа в случае коэффициента запаса или максимальное из модулей значений (модуль самого опасного значения) относительно верха и низа в случае напряжения и деформаций.

Ниже на рисунке представлен простой пример для понимания построения огибающей эпюры коэффициента запаса. Для конкретики рассмотрим узел 1. Видим, что узел 1 имеет два значения коэффициента запаса:

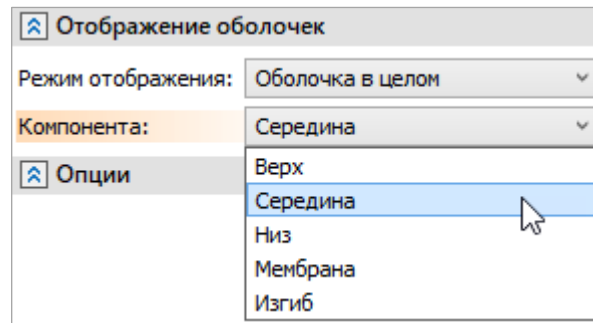
- для слоя 1: 6;
- для слоя 2: 8.

Строя огибающую эпюру, занесем в узел 1 наименьший коэффициент запаса из этих двух значений, который соответствует слою 1 и равен 6. Далее точно такие же действия проводятся с остальными узлами огибающей эпюры.

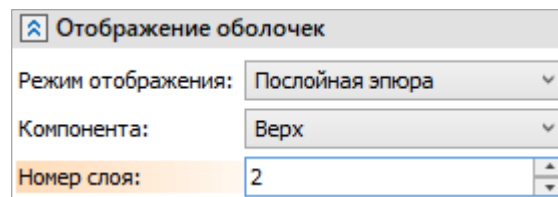


Пример построения огибающей эпюры

Оболочка в целом – 2D эпюра, на которой многослойные оболочки «приравняются» к обычным оболочкам. Т.е. в рамках режима верх последнего слоя является верхом всей многослойной оболочки, а низ первого слоя является низом всей композитной оболочки при отсчете слоев снизу-вверх (именно такой принцип заложен при моделировании многослойной оболочки). Обычные оболочки в данном режиме отображаются как обычно.



Послойная эпюра – 2D-эпюра, для которой выбирается, какие слои многослойной оболочки выводить на эпюре. По умолчанию выводится слой 1. Номер слоя необходимо вводить вручную. Если какая-либо из оболочек не имеет введенного слоя, для нее эпюра не выводится. Эпюра обычных оболочек в данном режиме не выводится.



3D-эпюра – 3D-эпюра, псевдоотображение трёхмерной оболочки с трёхмерными слоями, которую, также, как и любую твердотельную модель в постпроцессоре, можно рассекать.

Компоненты оболочек и системы координат результатов

Компоненты и системы координат доступные для вывода зависят от выбранного режима эпюры. Выбранные режимы и компоненты влияют только на эпюры обычных и многослойных оболочек и не влияют на эпюры твердотельных и балочных элементов задачи. Выбранная же система координат влияет на эпюры всех типов тел задачи.

В зависимости от результата и режима для выбора доступны компоненты оболочки/слоя, в том числе компонента «Середина», которая является аналогом мембранной компоненты для слоев, и компонента «Верх/низ», которая включает вывод двусторонней эпюры.

Также в настройках доступен выбор системы координат, в рамках которой будет выводиться результат. В качестве системы координат при выводе результата может быть выбрана глобальная система координат, система координат слоев (система координат каждого слоя ориентирована так, что ось Z слоя совмещена с осью Z оболочки, а ось X слоя повернута на угол армирования слоя относительно оси X оболочки), произвольная локальная система координат.

Ниже приведены режимы эпюр и доступные для них компоненты:

- **Огибающая эпюра:** для напряжений и деформаций (кроме главных, эквивалентных, интенсивности и энергии) доступен выбор системы координат:
 Глобальная система координат;
 Система координат слоев;
 Локальная система координат.

Для всех напряжений и деформаций выбор компоненты недоступен. Для коэффициентов запаса выбор компоненты и системы координат не доступен.

- **Оболочка в целом:** для коэффициентов запаса, напряжений и деформаций доступны компоненты:
Верх/Низ;
Верх;
Низ;
Мембрана;
Изгиб.
- Для напряжений и деформаций (кроме главных, эквивалентных, интенсивности и энергии) доступен выбор СК:
Глобальная система координат;
Система координат слоев (кроме компонент Мембрана и Изгиб);
Локальная система координат.

Для коэффициентов запаса, главных, эквивалентных, интенсивности, энергии напряжений и деформаций выбор системы координат недоступен.

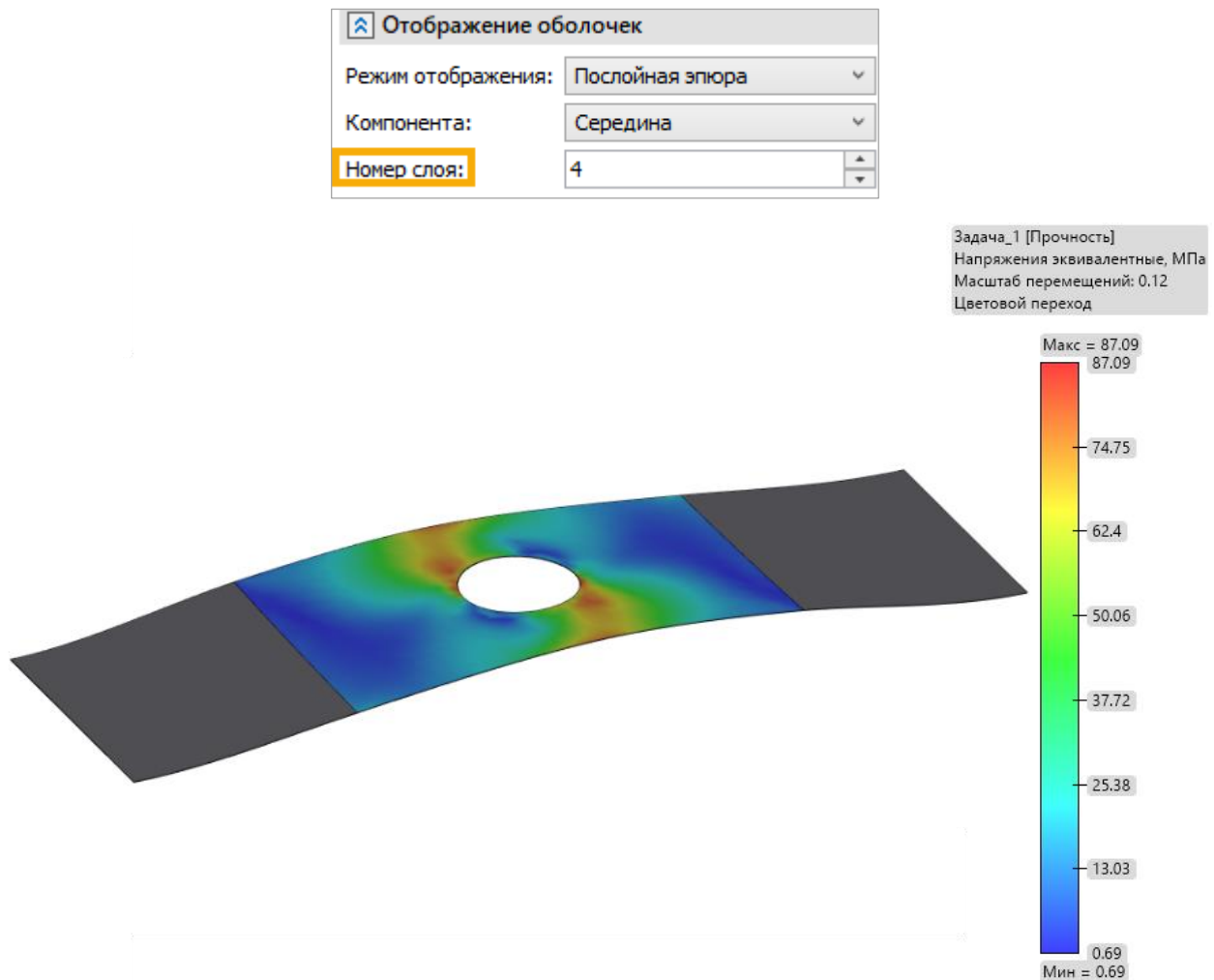
- **Послойная эпюра:** помимо выбора слоя, для коэффициентов запаса, всех напряжений и деформаций доступны компоненты:
Верх/Низ;
Верх;
Низ;
Середина.
- Для напряжений и деформаций (кроме главных, эквивалентных, интенсивности и энергии) доступен выбор СК:
Глобальная система координат;
Система координат слоев;
Локальная система координат.

Для коэффициентов запаса, главных, эквивалентных, интенсивности, энергии напряжений и деформаций выбор системы координат недоступен.

- **3D-эпюра:** для коэффициентов запаса, напряжений и деформаций (кроме главных, эквивалентных, интенсивности и энергии) доступен выбор СК:
Глобальная система координат
Система координат слоев;
Локальная система координат.

Для коэффициентов запаса, всех напряжений и деформаций выбор компоненты недоступен.

При отображении результатов в режиме **Послойная эпюра** необходимо учитывать, что если, например, в рамках одной задачи одна многослойная оболочка имеет 3 слоя, а другая 6 слоёв, то эпюра для элементов, у которых только 3 слоя, слой 4-6 будет серым цветом. Это означает, что для этих слоёв эпюра не выводится.

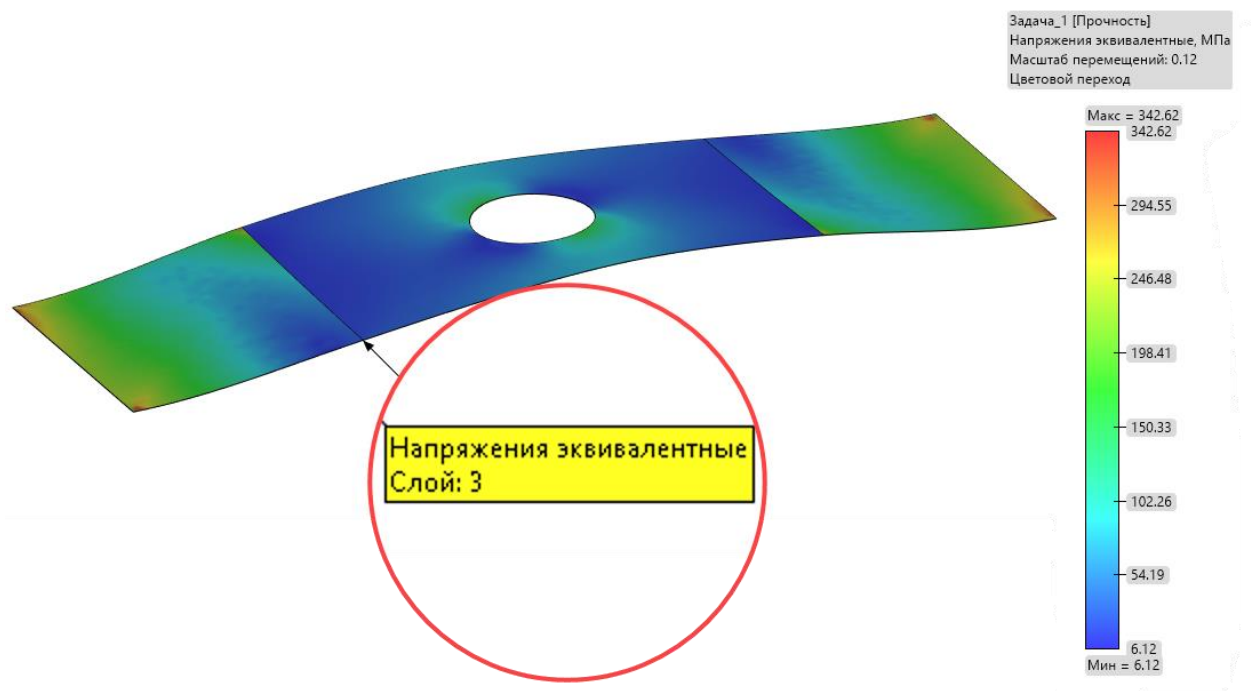


Пример отображения эпюры по слоям – Распределение эквивалентных напряжений в пластине слой 4

Группа «Опции»

В данной группе можно выбрать следующие опции для удобной работы с результатами:

- **Открыть результат в новом окне** – если данная опция активирована, то после подтверждения, настроенный результат, откроется в отдельном окне с активным окном «Параметры результата»;
- **Создать метку эпюры доп. результата** – если данная опция активирована, то для выбранных элементов, при отображении результатов, в сцене появится метка для удобной идентификации результата (например, для оболочки в метке отобразится компонента или слой);



Пример настройки опции «Создать метку эпюры доп. Результата»

5.4. НАСТРОЙКА ЦВЕТОВОЙ ШКАЛЫ

Диалог настроек цветовой шкалы можно вызвать из окна параметров результатов расчёта (кнопка **Настройка**), либо из контекстного меню, вызванного в окне результатов расчёта нажатием .

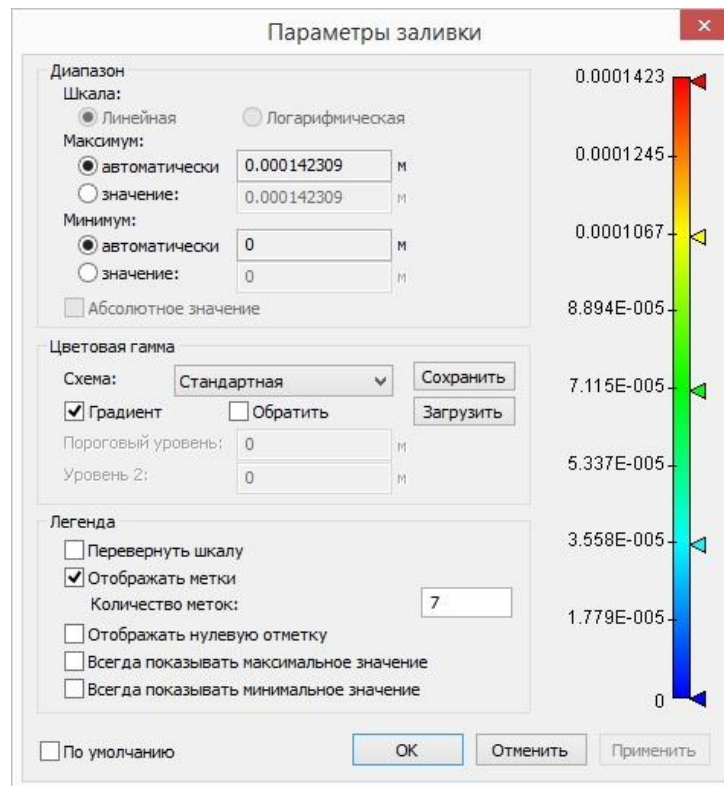
Настройки цветовой шкалы нужно выполнять с целью приведения в соответствие требуемых цветов и полученных значений. Первоначальную настройку система выполняет автоматически. Она равномерно распределяет стандартный спектр из пяти цветов между максимальным и минимальным значениями, полученными в данном расчёте.

Группа «Диапазон»

Группа содержит параметры распределения числовых значений по цветовой шкале.

Линейная/Логарифмическая. Логарифмическая шкала по умолчанию используется для отображения результата **Коэффициент запаса по напряжению**. Это делается для того, чтобы получить более детальную цветовую картину в наиболее ответственном диапазоне – где значения коэффициента приближаются к единице. Пользователь также может переключить режим отображения на линейную шкалу для этого результата. Для других результатов всегда используется только линейная шкала.

Максимум. Данный элемент управления позволяет установить соответствие между максимальным значением и верхним крайним цветом спектра. По умолчанию выбирается максимальное значение, но пользователь может ввести собственную интересующую величину в соответствующем поле.



Минимум. Здесь предоставляется возможность установить соответствие между минимальным значением и нижним крайним цветом спектра. В остальном этот элемент управления аналогичен предыдущему.

Абсолютное значение. Включает режим отображения в окне результатов расчёта значений в узлах по модулю (без учёта знака). Режим является вспомогательным. Его можно использовать для анализа результатов, если интересуют амплитудные значения компонентов перемещений или других величин.

Ввод максимальных и минимальных значений можно использовать для специальной настройки отображения результатов. Например, для отображения результата «Коэффициент запаса по напряжениям» можно ограничить максимальное значение коэффициента запаса, с целью более наглядного отображения данного результата в окне постпроцессора.

Группа «Цветовая гамма»

Параметры группы позволяют настраивать количество цветов в цветовой шкале.

Схема. Имеется семь предварительных настроек и одна пользовательская.

Стандартная. Эта настройка выводит шкалу из пяти основных цветов.

Оттенки серого. Данная настройка включает черно-белую шкалу.

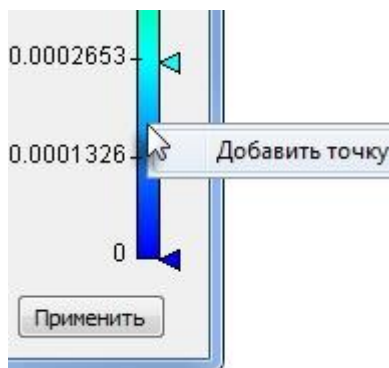
Полный спектр. При включении этой настройки шкала представляет собой полную радугу из 7 основных цветов.

Кроме того, имеются цветовые схемы **Максимум**, **Минимум**, **Порог**, **Диапазон**.

Пользователя. Можно самостоятельно настроить цветовую шкалу, сохранив вариант в специальный файл для последующей быстрой загрузки (файл с расширением *.col). Настройка осуществляется в правой части диалога, где имеется изображение цветовой шкалы. Справа от шкалы есть несколько треугольных меток, обозначающих место какого-либо цвета в

шкале. При помощи этих меток можно задать новое положение цвета в шкале. Для перемещения метки нажмите по ней  и, удерживая кнопку нажатой, переместите.

Для создания новой метки с новым цветом произведите   справа от шкалы. Появится стандартное окно Windows для задания цвета.



Для удаления метки её нужно переместить за пределы цветовой шкалы. Для изменения цвета, соответствующего существующей метке, нужно использовать  . Для сохранения и открытия настроек шкалы можно использовать кнопки **Сохранить** и **Загрузить**, расположенные в группе **Цветовая гамма**.

Градиент. Данный флажок, включённый по умолчанию, позволяет установить плавный переход от одного цвета к другому в цветовой шкале.

Обратить. Позволяет обратить цветовую шкалу.

Группа «Легенда»

Перевернуть шкалу. Этот флажок переворачивает шкалу значений. Данный режим по умолчанию используется при отображении результата **Коэффициент запаса по напряжениям** в статическом анализе. Это удобно для отображения критических значений, близких к единице, красным цветом.

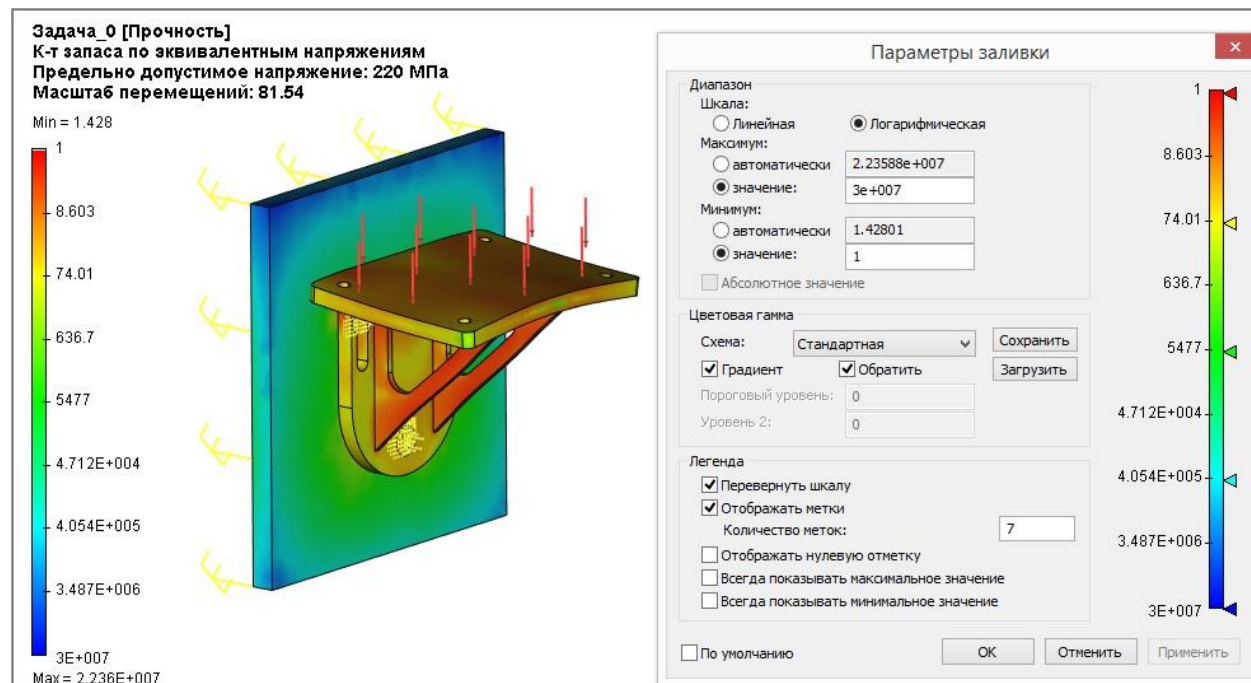
Отображать метки. Включение данного флажка позволяет отображать метки с числовыми значениями на цветовой шкале в окне результатов.

Количество меток. Устанавливает количество меток.

Отображать нулевую отметку. Позволяет отображать на цветовой шкале метку с нулевым значением.

Всегда показывать максимальное значение. При включённом флажке в окне результатов расчёта появляется строка с указанием максимального значения.

Всегда показывать минимальное значение. При включённом флажке в окне результатов расчёта появляется строка с указанием минимального значения.



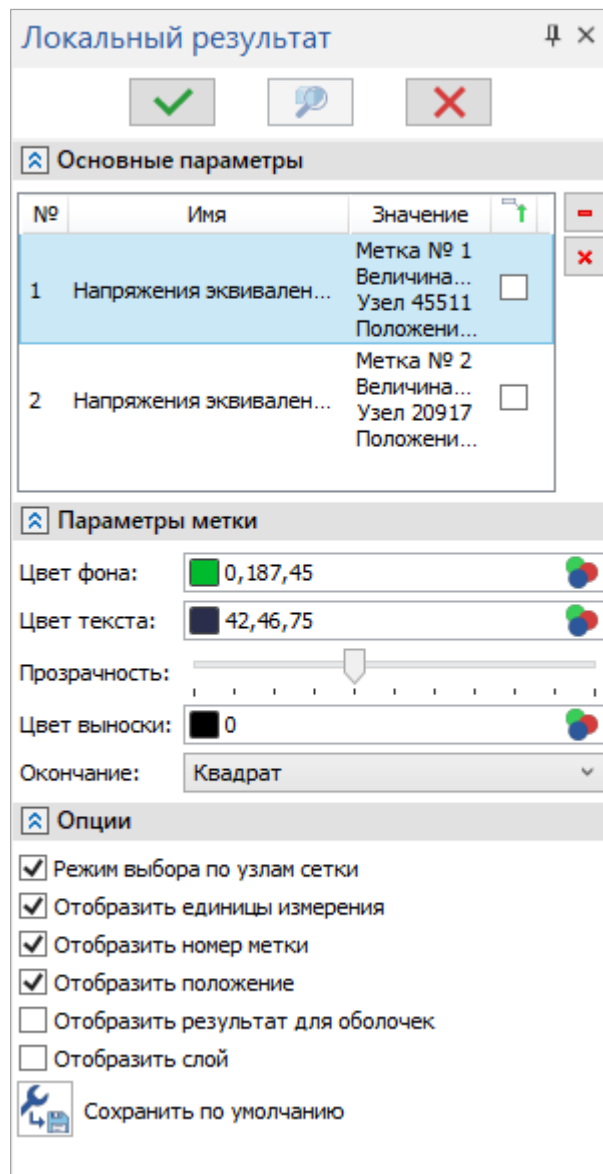
Настройка диапазона значений шкалы для отображения результатов

5.5. ЛОКАЛЬНЫЙ РЕЗУЛЬТАТ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Результаты анализа > Визуализация расчёта > Локальный результат
Клавиатура	Текстовое меню
<ЗТУ>	Результаты анализа > Локальный результат

Постпроцессор T-FLEX Анализа предоставляет удобную возможность для вывода результата в определенном месте конструкции с помощью команды **Локальный результат**. Пользователю достаточно навести курсор на интересующее его место эпюры, и при нажатии система ставит метку и выводит точное значение результата в этом месте. Проставленные метки, как и метки экстремумов попадают в отчет при его автоматической генерации см. п. [Отчёт](#).



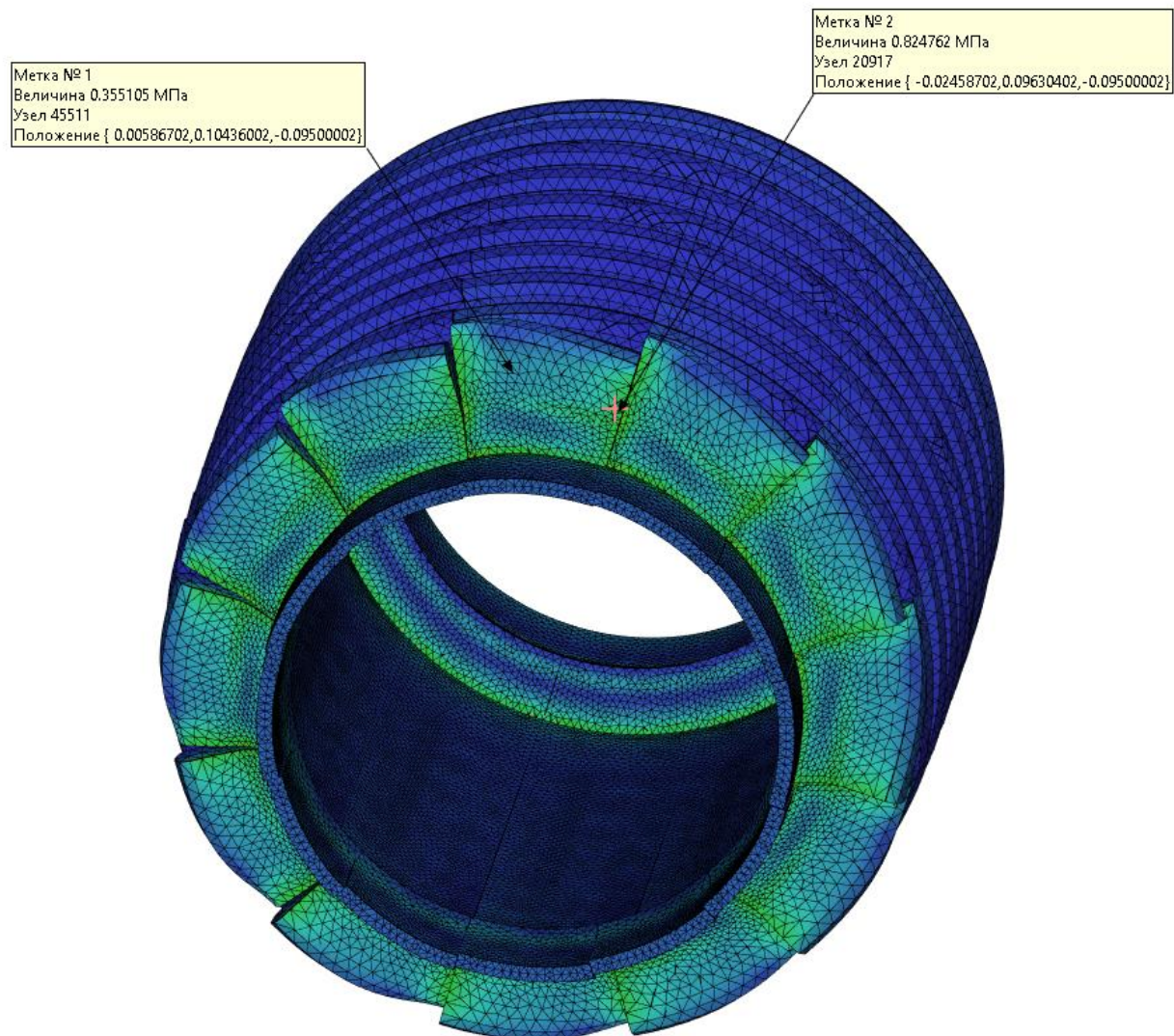
Группа «Основные параметры»

При проставлении меток автоматически формируется список с метками. Список формируется в соответствии с кликом в указанном месте на эпюре. Т.е. первый клик — это первая метка в списке.

При активации переключателя  для выбранной метки, система сохраняет метку и отображает её в тех же местах других (всех) результатов, которые находятся в дереве активной задачи. Тем самым можно произвести сравнение разных результатов расчёта в одних и тех же местах модели.

При помощи вложенных команд можно:

-  - **Удалить элемент из списка.** Команда убирает из списка выделенный результат, при удалении происходит перенумерации элементов в списке;
-  - **Очистить.** Команда для очистки всего списка;

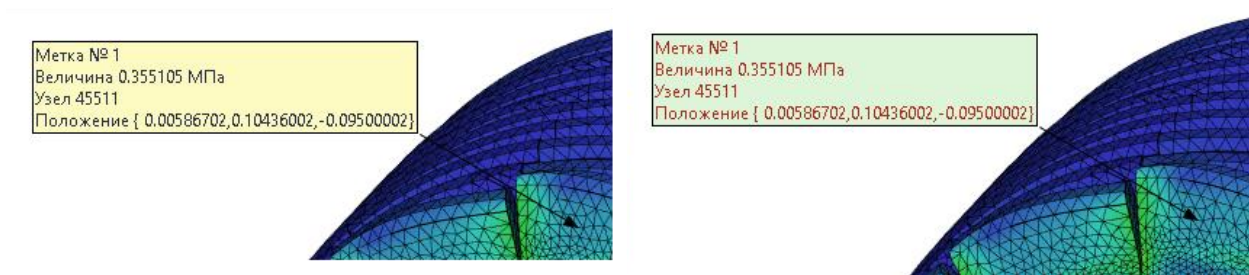


Пример использования команды «Локальный результат» с настроенными параметрами отображения

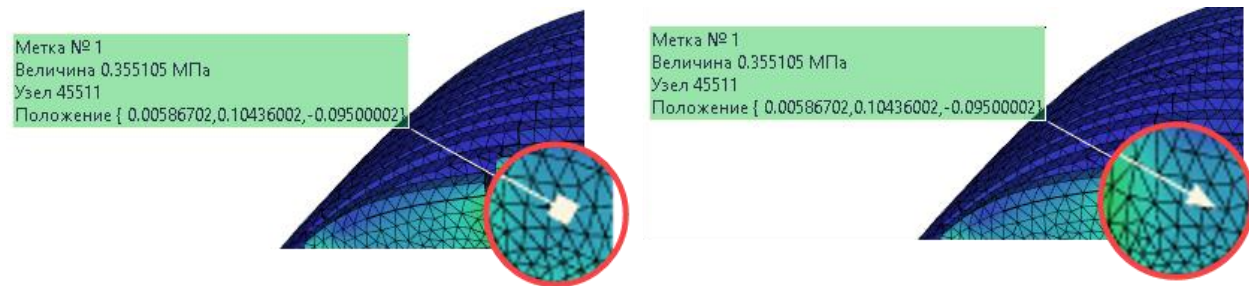
Группа «Параметры метки»

Данные параметры позволяют гибко настроить метки для удобного восприятия при работе с результатами. Пользователь может настроить следующие параметры:

- **Цвет фона** - параметр, отвечающий за изменения цвета метки (заливка);
- **Цвет текста** - параметр, отвечающий за настройку цвета текста метки;
- **Прозрачность** - параметр для настройки прозрачности цвета метки, где 0 — это не прозрачно, а 100 полностью прозрачно (без цвета);
- **Цвет выноски** - параметр для изменения цвета выносных линий. Например, если изменить цвет 3D окна на темный, то выносные линии будут сливаться.
- **Окончание** - параметр, отвечающий за изменения типа маркера на выносной линии (точка привязки). Тип маркера может быть: **Без окончания**, **Стрелка**, **Точка**, **Квадрат**.



Пример настройки параметров для метки «Цвет фона», «Цвет Текста»



Пример настройки параметров для метки «Прозрачность», «Цвет выноски», «Окончание»

Пользователь может сохранить визуальные настройки, с целью последующего использования стиля для отображения меток с помощью встроены команд  **Сохранить по умолчанию.**

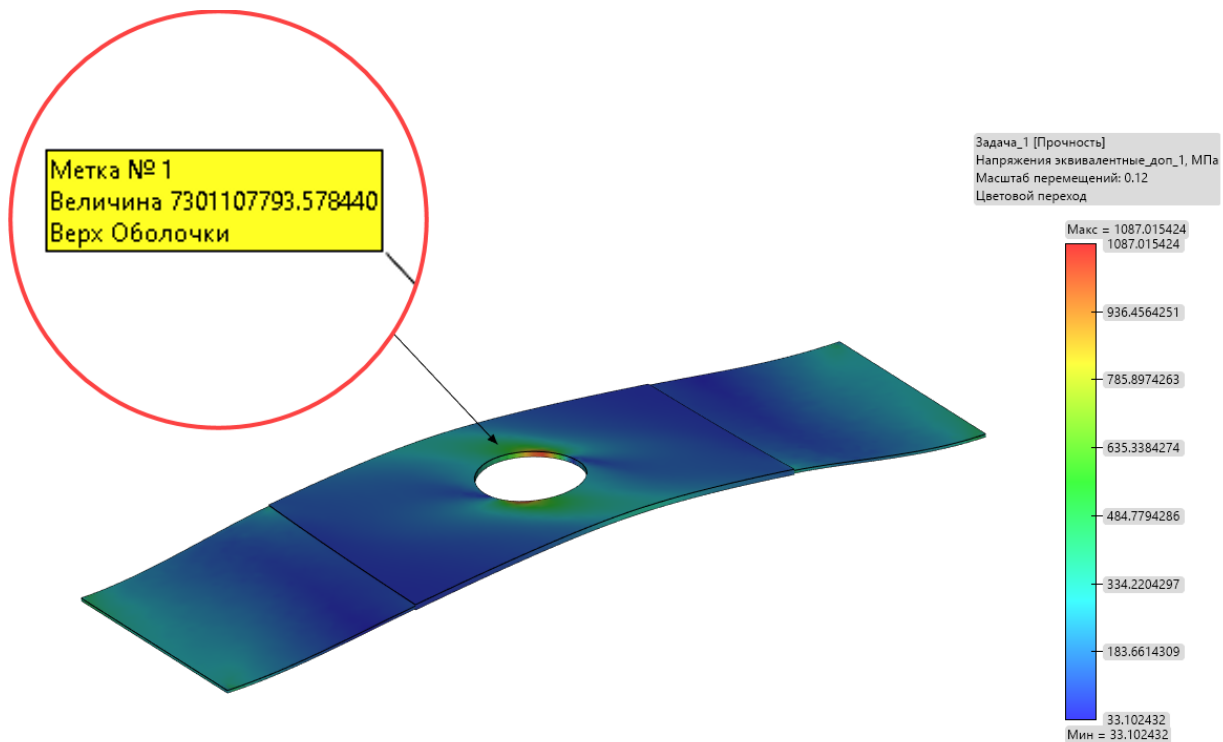
Группа «Опции»

Пользователь может выбрать **Режим выбора по узлам сетки**, что позволяет получить результат в конкретном узле, а также какую информацию отображать в метке.

В метке можно:

- **Отобразить единицы измерения.** В метку попадают ЕИ, которые используются при отображении результата в сцене;
- **Отобразить номер метки.** По умолчанию опция активна. При удалении метки происходит перенумерации элементов в списке;
- **Отобразить положение.** Опция для отображения координат в месте привязки метки;
- **Отобразить результат для оболочек.** Опция для отображения типа результата и компоненты при использовании в задаче многослойных и обычных оболочек.;
- **Отобразить слой.** Опция для отображения номера слоя при использовании в задаче многослойного материала.

Динамические метки при простановке их на многослойные и обычные оболочки имеют особенности. Данные метки могут содержать информацию о типе результата, отображенной-компоненте или слое (последнее доступно если в задаче есть составные материалы) см. подробнее [Параметры результата](#). Данные параметры выводятся опционно по необходимости использования.



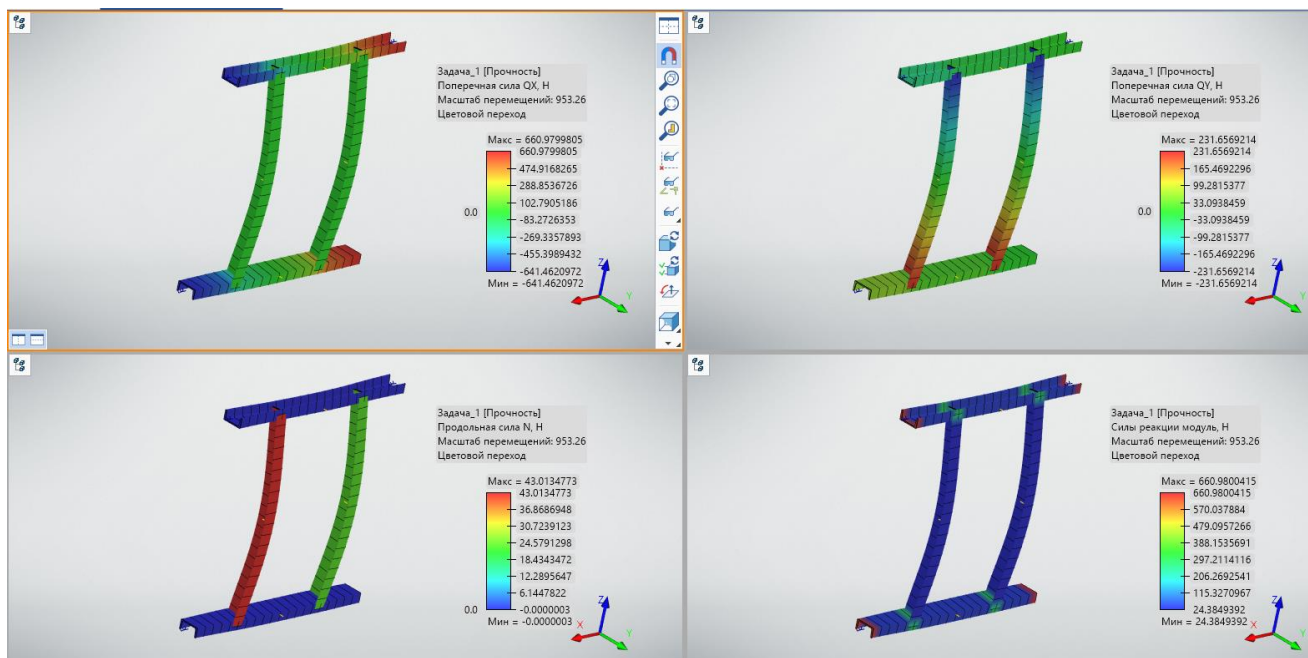
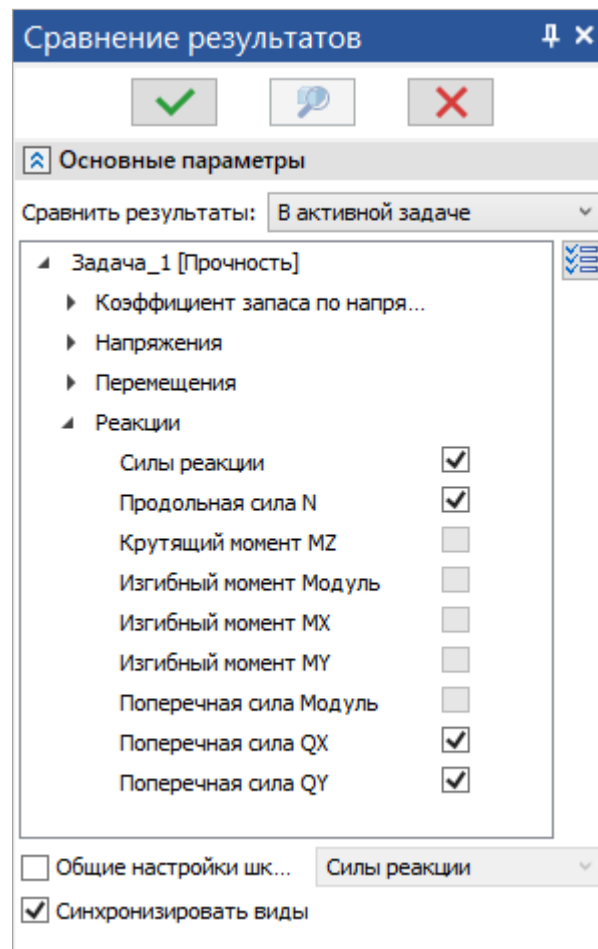
Пример использования команды «Локальный результат» с настроенными параметрами «Отобразить результаты для оболочек»

5.6. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Анализ > Выходные данные > Сравнение результатов
Клавиатура	Текстовое меню
<3SF>	Анализ > Выходные данные > Сравнение результатов

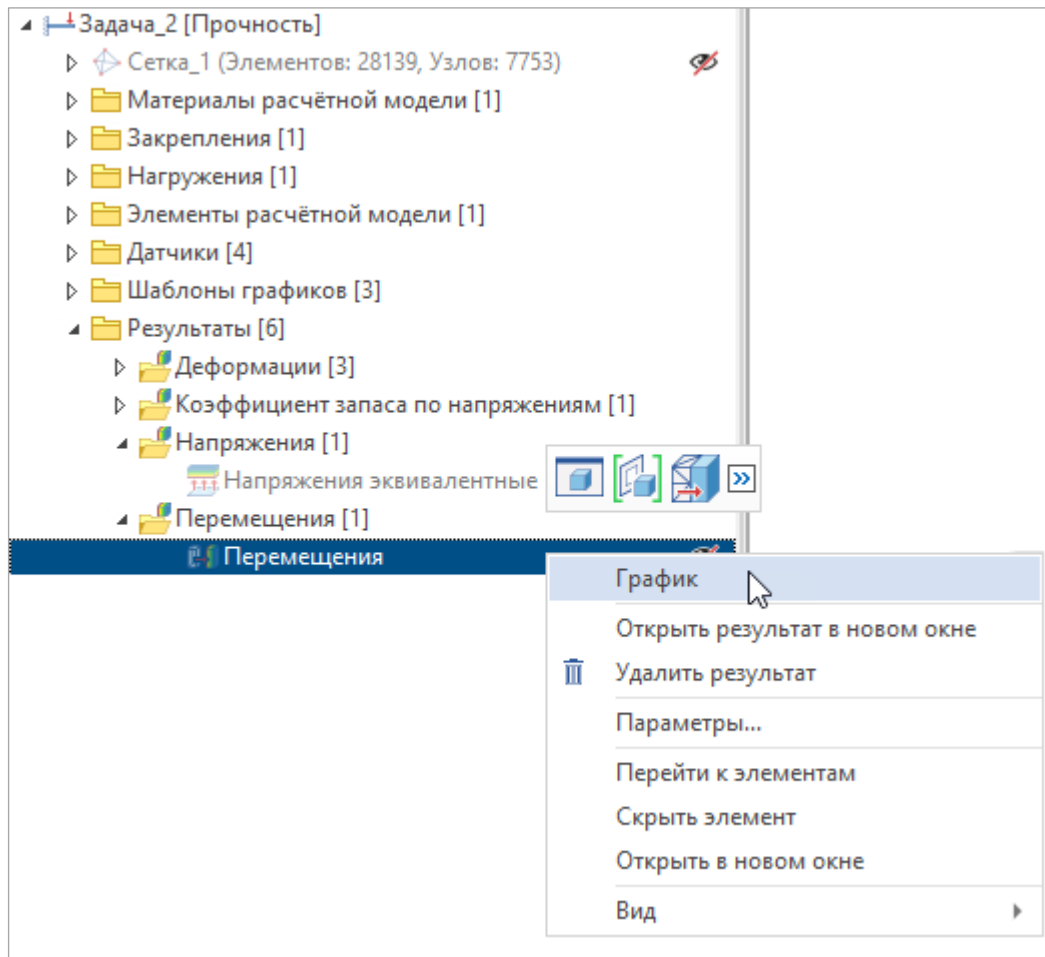
Команда **Сравнение результатов** служит для сравнения нескольких результатов расчёта в рамках одной задачи или разных задач. Экран разделяется на несколько секторов и отображает в них выбранные результаты. Отображение модели в окнах синхронизировано.



Применение команды «Сравнить результаты»

5.7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАФИКОВ ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ

Чтобы создать график по шаблону графика см. п. [Шаблон графика](#) необходимо вызвать контекстное меню  для конкретного результата в дереве окна **Задачи** или окна **3D Модель** и выбрать пункт **График**.



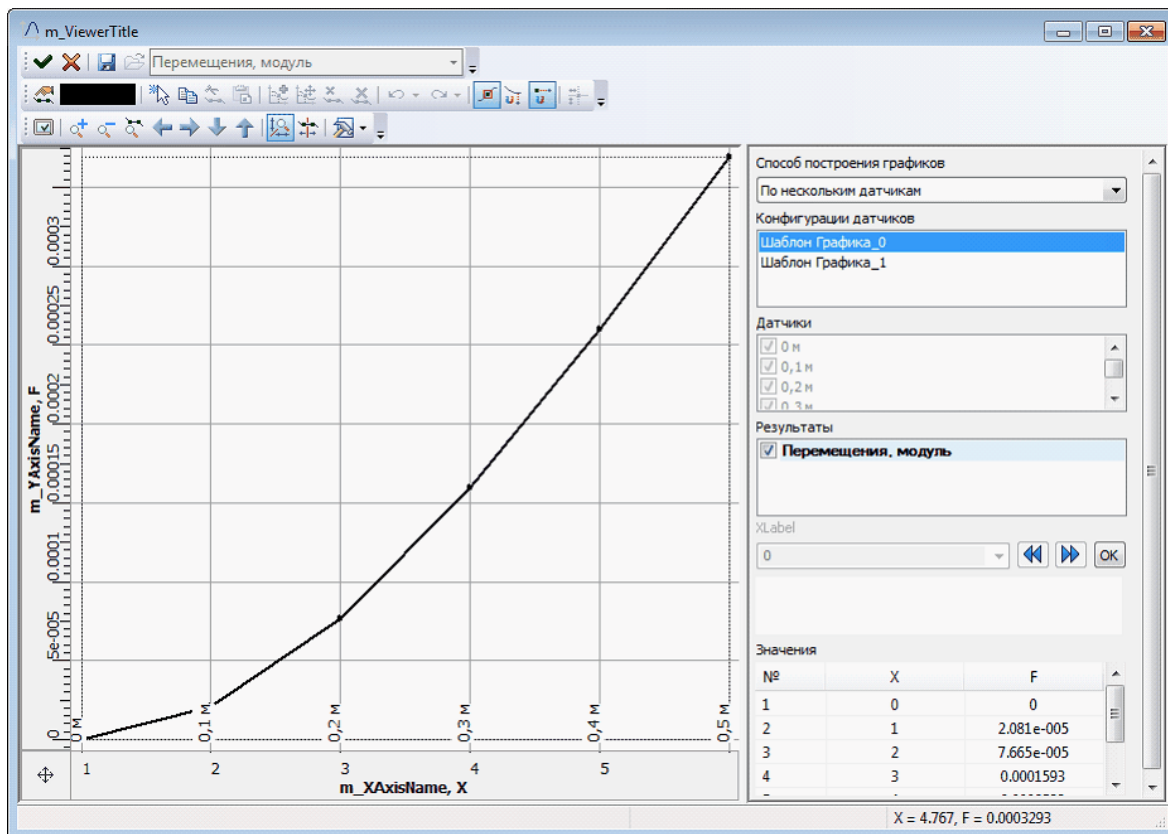
После этого будет создан график для данного типа результатов.

В закладке **Параметры** можно выбрать:

Метод построения: По нескольким датчикам или По одному датчику.

- Способ построения графика по нескольким датчикам применяется, когда задан единственный результат определенного типа (перемещение, напряжение) и для него имеется ряд измерений от датчиков, расположенных в разных точках – строится пространственная зависимость величины.
- Способ построения графика по одному датчику применяется, когда задан множественный результат (например, ряд значений температуры в точке в разные моменты времени в тепловом анализе нестационарных процессов или ряд значений вибрационных ускорений в точке для разных вынуждающих частот) – строится временная или частотная зависимость величины.

Шаблон. На выбор предоставляются шаблоны графиков с набором датчиков, созданные ранее в задаче см. п. [Шаблон графика](#).



В закладке **Значения** отображаются координаты точек графика – эти данные связаны со значениями от датчиков и не могут редактироваться, но могут быть скопированы в буфер обмена с последующей вставкой в другой график или электронную таблицу. Следует отметить, что графики в задачах конечно-элементного анализа, как и динамического анализа, являются объектами T-FLEX CAD типа «График».

Поэтому к ним применимы все операции как к обычным графикам, например, можно воспользоваться функцией `graph()` для считывания промежуточных значений (интерполяции). Для более точной интерполяции удобно установить тип графика «гладкая кривая» или скопировать точки вместе с координатами в новый график типа «гладкая кривая». Более подробную информацию см. в справке T-FLEX CAD.

5.8. ОТЧЁТ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Результаты анализа > Визуализация результатов > Отчёт
Клавиатура	Текстовое меню
	Результаты анализа > Отчёт

Команда **Отчёт** предназначена для формирования отчётных документов в формате PDF HTML.

Отчёт содержит информацию о:

- задаче
- модели
- материале модели и его физико-механических свойствах;
- свойствах сетки (тип элемента, количество КЭ элементов и узлов);
- граничных условиях;
- результатах расчёта – эпюры для каждого типа результата с максимальными и минимальными значениями.

Пользователь сам определяет какие результаты будет содержать отчёт, для этого в диалоговом окне настраиваются следующие параметры:

Отчёт

✕

Общая информация

Название:

Задача_1

Автор:

Admin

Компания:

Настроить разделы отчёта

Список результатов

Результаты	3D H...	3D PDF	
☒ Перемещения	Нет	Нет	
☒ Напряжения эквивалентные	Нет	Нет	
☒ К-т запаса по эквивалентным напряжениям	Нет	Нет	

Все Вкл/Выкл Результаты

Все Вкл/Выкл 3D HTML

Все Вкл/Выкл 3D PDF

☒ Использовать изображения открытых результатов

☐ Показывать целостный результат

☐ Показывать метки Граничных условий

Настроить параметры изображения

Положение камеры:

Вид по умолчанию

▼

☒ Показать отчёт после создания

Создать

Отменить



Использование команды «Отчёт» - Пример отчёта для задачи статической прочности

5.9. СЕРВИСЫ ПОСТПРОЦЕССИНГА

В данном разделе описаны сервисные команды постпроцессинга, которые предназначены для обеспечения удобной работы с результатами расчёта. Команды располагаются в группе «Визуализация результатов» и «Выходные данные» ленты Результаты анализа.

Основные темы в этом разделе:

- [Сетка](#)
- [Отображение поверхностей](#)
- [Отображение балок](#)
- [Исходный контур](#)
- [Целостный результат](#)
- [Экстремумы](#)
- [Декорации](#)
- [Метки](#)
- [Датчики](#)
- [Деформированное состояние](#)
- [Фоновая анимация](#)
- [Цветовое распределение](#)

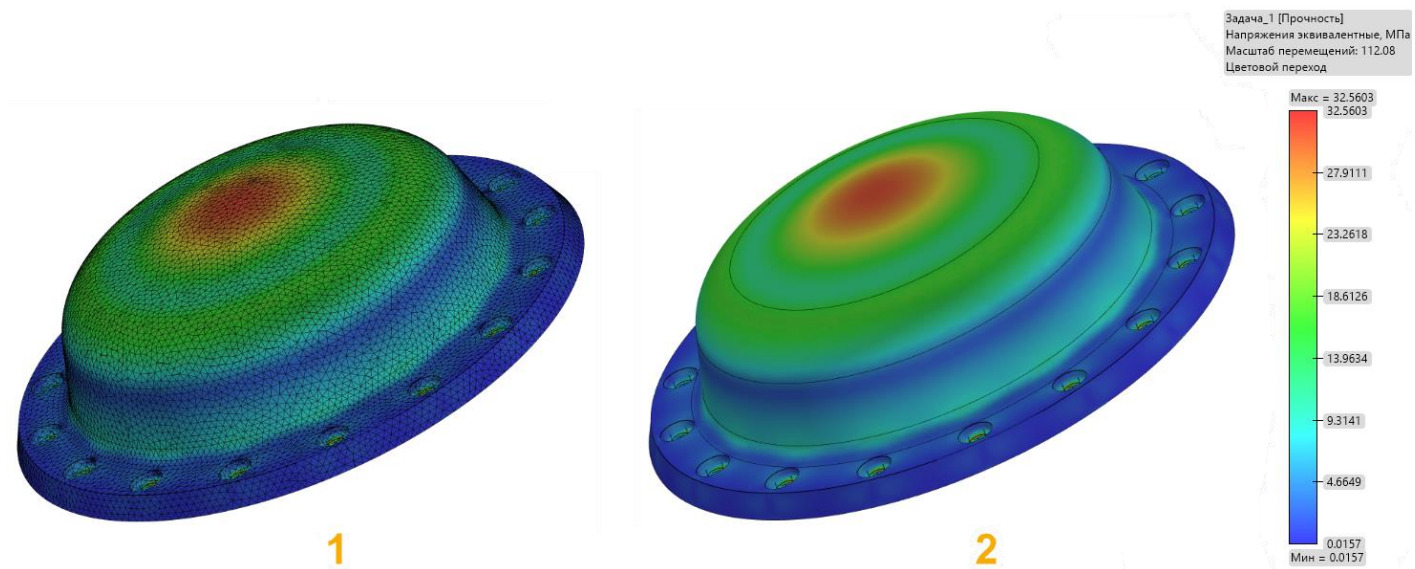
- [Экспорт данных](#)
- [Импорт данных](#)
- [Запись анимации](#)

5.9.1. СЕТКА

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Результаты анализа > Визуализация результатов > Сетка
Клавиатура	Текстовое меню
	Результаты анализа > Сетка

Команда **Сетка** служит для отображения сетки КЭ модели.



Применение команды «Сетка»

5.9.2. ОТОБРАЖЕНИЕ БАЛОК

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Результаты анализа > Визуализация результатов > Отображение балок
Клавиатура	Текстовое меню
	Результаты анализа > Отображение балок

Команда **Отображение балок** предназначена для визуального представления результатов расчёта, для конструкций, состоящих из балочных элементов.

Режимы отображения, следующие:



- Объёмное;



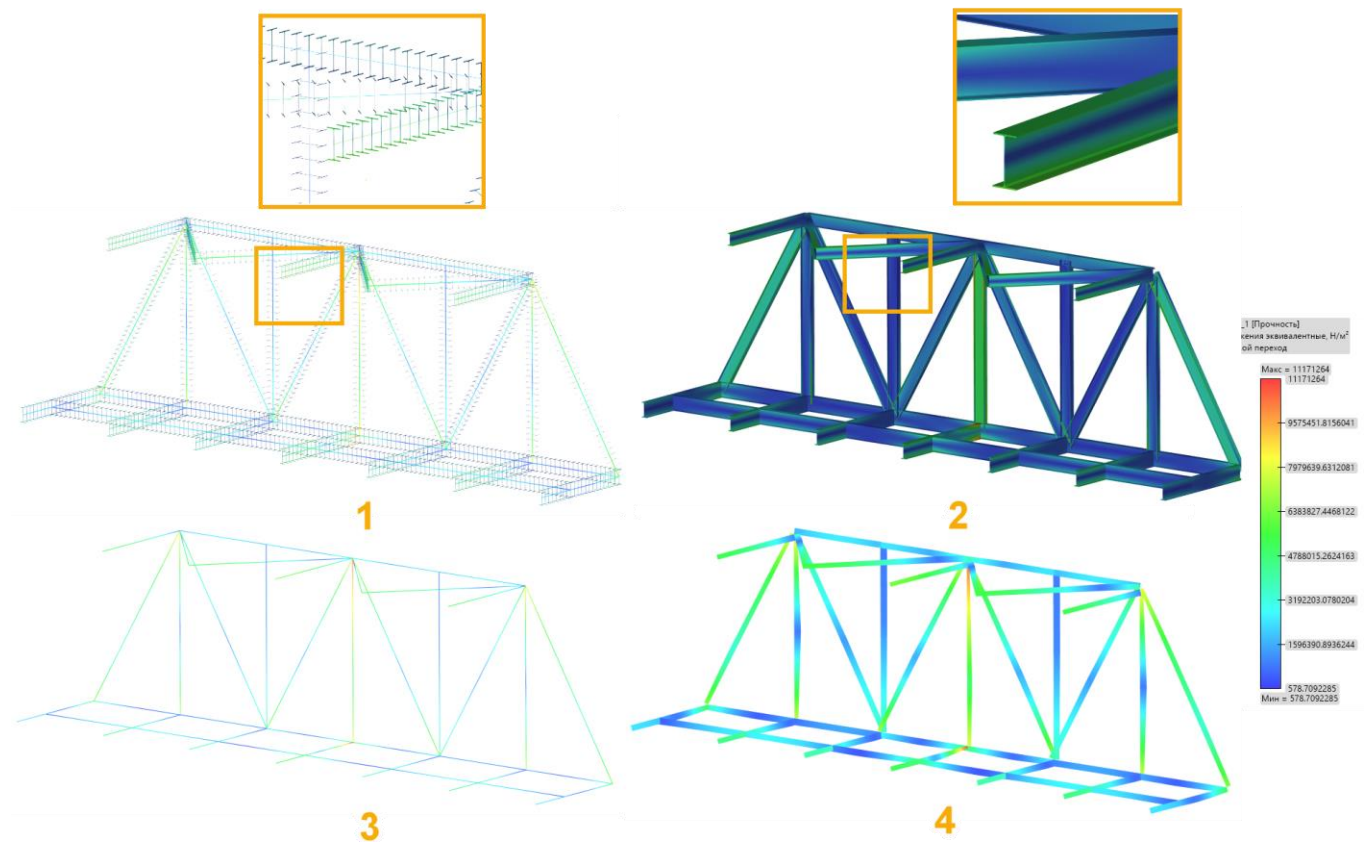
- Упрощённое;



- Плоское;



- Проволочное.



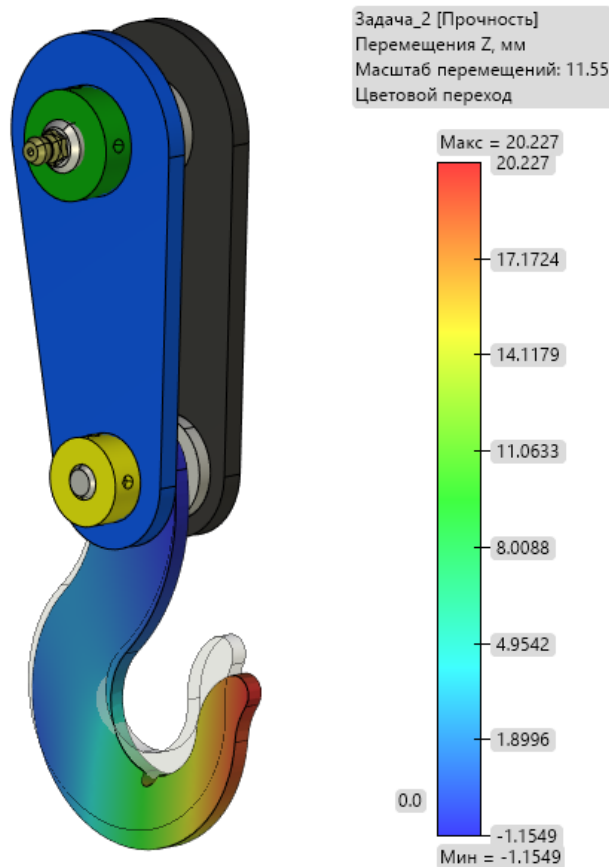
Применение команды «Отображение балок»: 1 – «Объёмное», 2 – «Упрощённое», 3 – «Плоское», 4 – «Проволочное»

5.9.3. ИСХОДНЫЙ КОНТУР

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Результаты анализа > Визуализация результатов > Исходный контур
Клавиатура	Текстовое меню
	Результаты анализа > Исходный контур

Команда **Исходный контур** служит для отображения контура расчётной модели. Эта позволяет наглядно сравнить деформированное состояние модели с исходным.



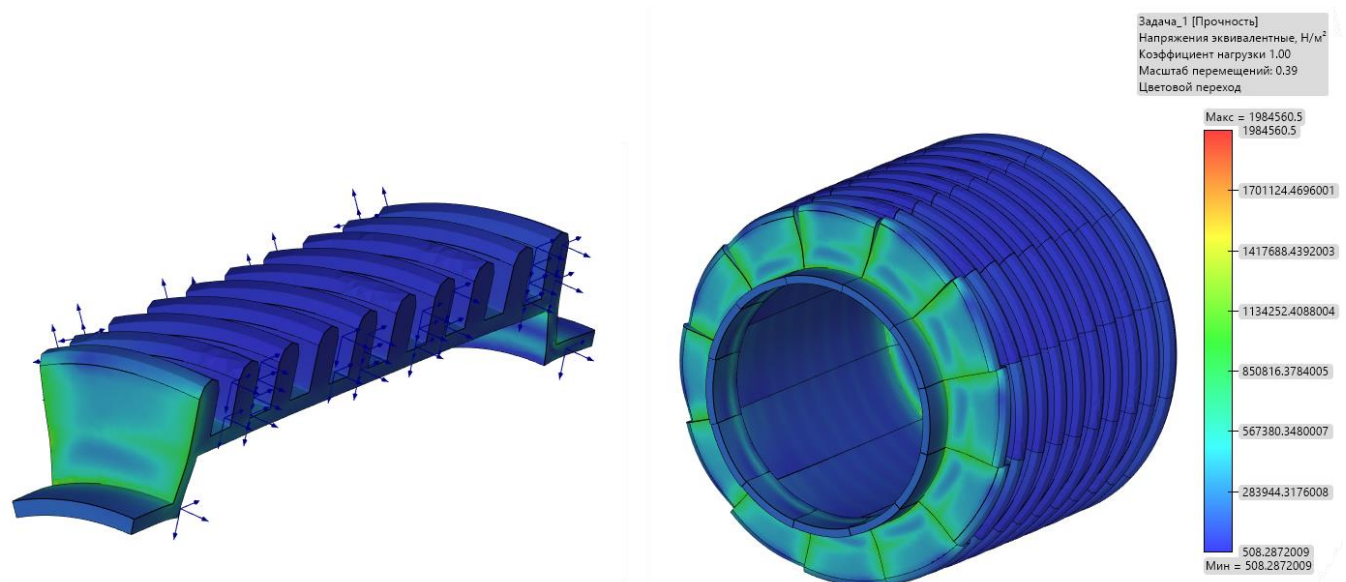
Применение команды «Исходный контур»

5.9.4. ЦЕЛОСТНЫЙ РЕЗУЛЬТАТ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Результаты анализа > Визуализация результатов > Целостный результат
Клавиатура	Текстовое меню
	Результаты анализа > Целостный результат

Команда **Целостный результат** служит для отображения эпюры для всей конструкции, если задача была посчитана с применением граничных условий типа симметрия см. п. [Симметрия](#).



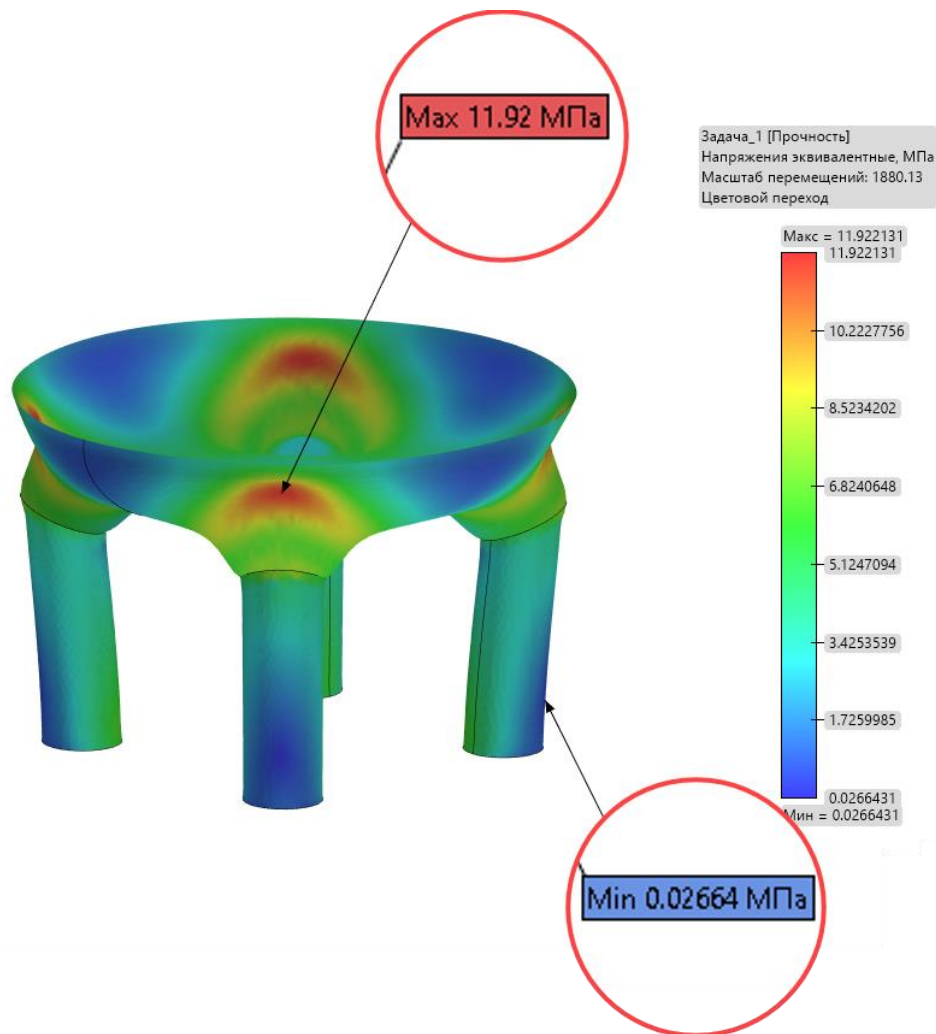
Применение команды «Целостный результат»

5.9.5. ЭКСТРЕМУМЫ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Результаты анализа > Визуализация результатов > Экстремумы
Клавиатура	Текстовое меню
	Результаты анализа > Экстремумы

Команда **Экстремумы** служит для отображения максимальных и минимальных значений на эпюре результатов расчёта.



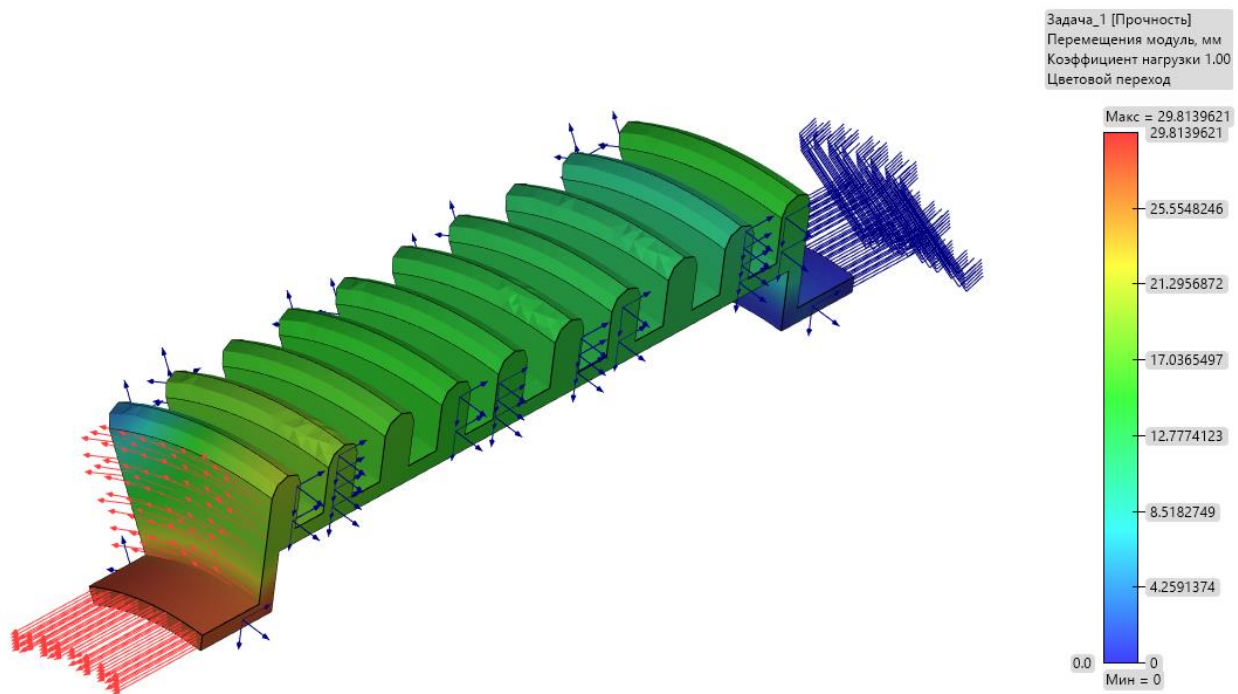
Применение команды «Экстремумы»

5.9.6. ДЕКОРАЦИИ

Вызов команды:

Пиктограмма	Лента
	Результаты анализа > Визуализация результатов > Декорации
Клавиатура	Текстовое меню
	Результаты анализа > Декорации

Команда **Декорации** служит для отображения условных изображений всех условий и нагрузжений заданных в задаче.



Применение команды «Декорации»

5.9.7. ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ

Вызов команды:

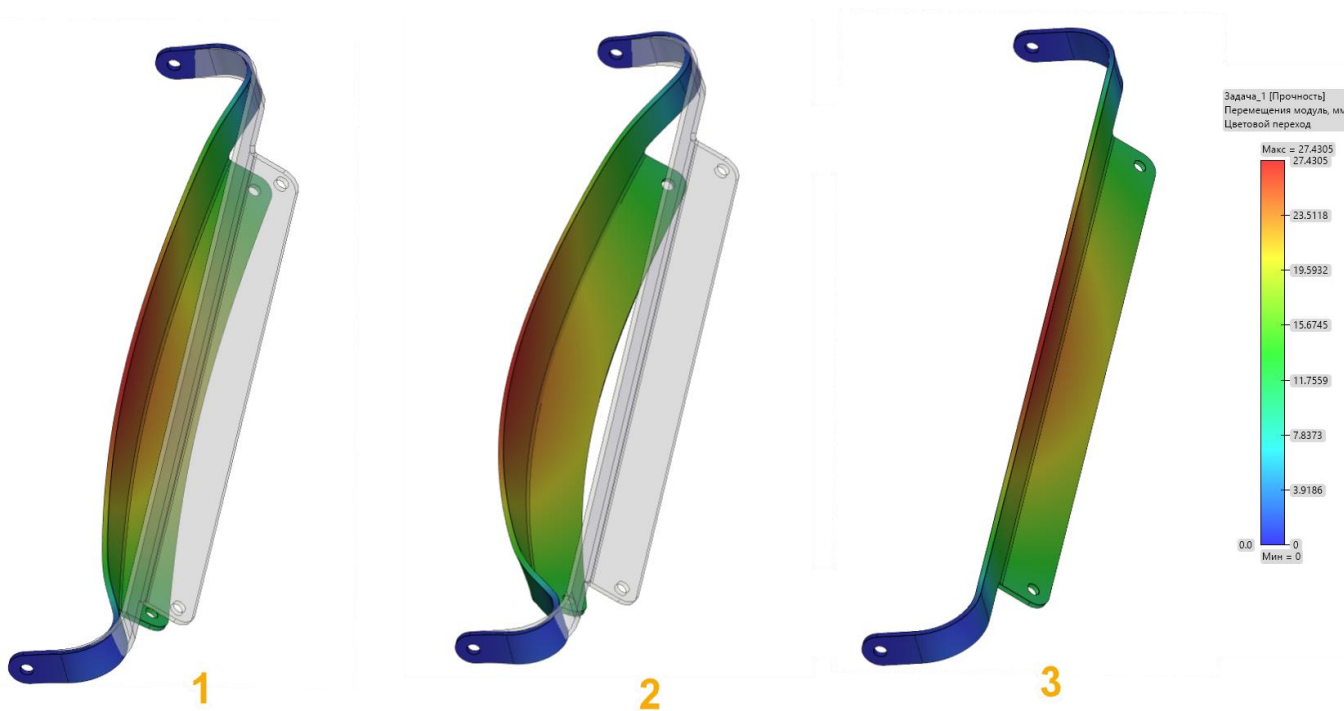
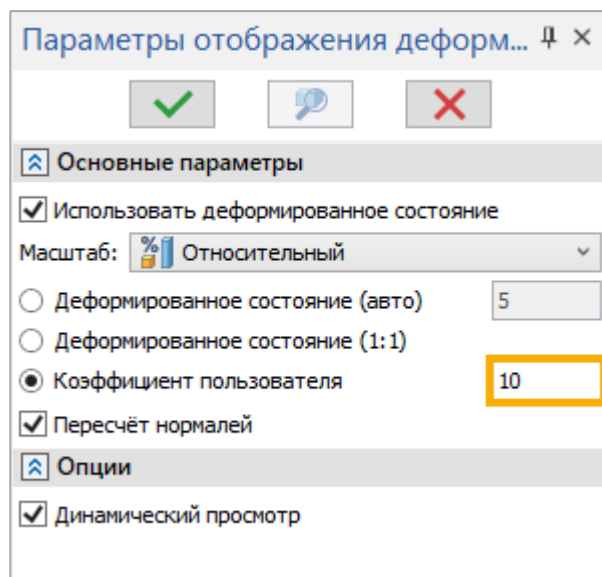
Пиктограмма	Лента
	Результаты анализа > Визуализация результатов > Деформированное состояние
Клавиатура	Текстовое меню
	Результаты анализа > Деформированное состояние

Команда **Деформированное состояние** служит для отображения модели в деформированном состоянии.

Для удобной работы с результатами отображения команда **Деформированное состояние** содержит несколько вложенных команд:

- деформированное состояние/без деформированного состояния;
- деформированное состояние 1:1;
- коэффициент пользователя.

При инициировании вложенной команды **Коэффициент пользователя**, открывается диалоговое окно, в котором пользователь может ввести свой масштабный коэффициент для более наглядного отображения деформированного состояния модели.



Применение команд: 1 - «Деформированное состояние», 2 – «Коэффициент пользователя»,
3 – «Без деформированного состояния»