

APM FEM

Руководство пользователя

APM FEM

Система прочностного анализа для КОМПАС-3D

Версия для КОМПАС-3D v21

Руководство Пользователя

Научно-технический центр «АПМ»

141070, Россия, Московская область, г. Королёв, Октябрьский бульвар 14, оф. 6

тел./факс: +7 (495) 120-58-10.

Наш адрес в Интернете: <http://www.apm.ru>, e-mail: com@apm.ru

Авторские права © 1989 – 2022 Научно-технический центр «Автоматизированное проектирование машин». Все права защищены. Все программные продукты НТЦ «АПМ» являются зарегистрированными торговыми марками центра. Названия и марки, упомянутые в данном руководстве, являются зарегистрированными торговыми марками их законных владельцев.

Содержание

Введение	4
Глава 1. Интерфейс системы APM FEM	5
1.1 Начало работы с APM FEM	5
1.2 Общий вид APM FEM	5
1.3 Выбор объектов	6
1.4 Задание свойств материала	7
1.5 Особенности расчета деталей и сборок	8
1.6 Панель Параметры	8
1.7 Настройки изображения стрелок закреплений и нагрузок	9
1.8 Команды панели Настройки	9
Глава 2. Типы расчетов	11
2.1 Статический расчет	11
2.2 Расчет устойчивости	11
2.3 Расчет частот и форм собственных колебаний	11
2.4 Тепловой расчет	11
2.5 Топологическая оптимизация	11
2.6 Общий порядок расчета модели	11
2.7 Порядок расчета модели при топологической оптимизации	12
Глава 3. Команды APM FEM	13
3.1 Подготовка модели к расчету	13
3.2 Задание свойств объектов модели	30
3.3 Работа с деревом прочностного анализа	34
3.4 Генерация КЭ сетки	35
3.5 Выполнение расчета	39
3.6 Параметры расчета	40
3.7 Логирование	43
3.8 Результаты расчета	43
3.9 Вспомогательная геометрия и дополнительные результаты	51
Глава 4. Расчет топологической оптимизации конструкций	57
4.1 Добавление, редактирование и удаление откликов	57
4.2 Добавление, редактирование и удаление конструктивных ограничений	63
4.3 Задание области проектирования	65
4.4 Добавление, редактирование и удаление целевой функции	66
4.5 Добавление, редактирование и удаление ограничения	67
4.6 Добавление, редактирование и удаление оптимизационной задачи	67
4.7 Расчёт	69
4.8 Параметры расчёта	69
4.9 Результаты топологической оптимизации	70
4.10 Поверхность в STL и Поверхность в КОМПАС	71

Введение

Система *APM FEM* представляет собой интегрированный в КОМПАС-3D инструмент для подготовки и последующего конечно-элементного анализа трехмерной твердотельной модели (детали или сборки).

Подготовка геометрической 3D-модели и задание материала осуществляется средствами системы КОМПАС-3D. С помощью *APM FEM* можно приложить нагрузки различных типов, указать граничные условия, создать конечно-элементную сетку и выполнить расчет. При этом процедура генерации конечных элементов производится автоматически.

APM FEM позволяет выполнять следующие типы расчетов:

- статический расчет;
- расчет на устойчивость;
- расчет собственных частот и форм колебаний;
- тепловой расчет;
- топологическую оптимизацию.

В результате выполненных системой *APM FEM* расчетов Вы можете получить следующую информацию:

- карту распределения нагрузок, напряжений, деформаций в конструкции;
- коэффициент запаса устойчивости конструкции;
- частоты и формы собственных колебаний конструкции;
- карту распределения температур в конструкции;
- массу и момент инерции модели, координаты центра тяжести.

Система *APM FEM* разработана в НТЦ «АПМ» (www.apm.ru) для прочностного конечно-элементного экспресс-анализа в КОМПАС-3D. Более расширенный функционал конечно-элементного анализа импортированных моделей доступен в системе APM WinMachine в модуле *APM Structure3D*.

APM Structure3D предоставляет возможность редактирования КЭ сетки, создания комбинированных (стержневых-пластинчатых-объемных) моделей, а также решения задач большой размерности. Подробнее использование функционала *APM Structure3D* рассмотрено в п. 3.4.

Глава 1. Интерфейс системы APM FEM

1.1 Начало работы с APM FEM

Минимальные требования для работы *APM FEM* соответствуют требованиям КОМПАС-3D.

Система *APM FEM* является прикладной библиотекой КОМПАС-3D для подключения которой необходимо при установке КОМПАС-3D поставить галочку напротив опции *APM FEM*. После окончания установки проконтролировать наличие установленной прикладной библиотеки можно в списке наборов инструментальных панелей (нажатием левой кнопкой мыши на значке *Развернуть*) (Рис. 1.1). В списке необходимо выбрать пункт *APM FEM*. После этого библиотека будет активирована и станет доступна инструментальная панель *APM FEM: Прочностной анализ* (Рис. 1.2). Перед началом работы с библиотекой *APM FEM* рекомендуется перестроить модель (клавиша F5).

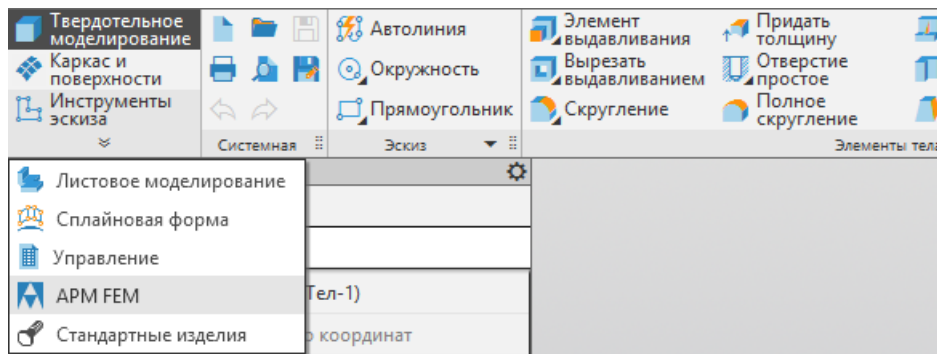


Рис. 1.1. Развернутый список инструментальных панелей

1.2 Общий вид APM FEM

APM FEM является библиотекой системы трехмерного моделирования КОМПАС-3D и полностью использует ее интерфейс, что существенно облегчает работу.

Основные элементы интерфейса, используемые *APM FEM* представлены на Рис. 1.2:

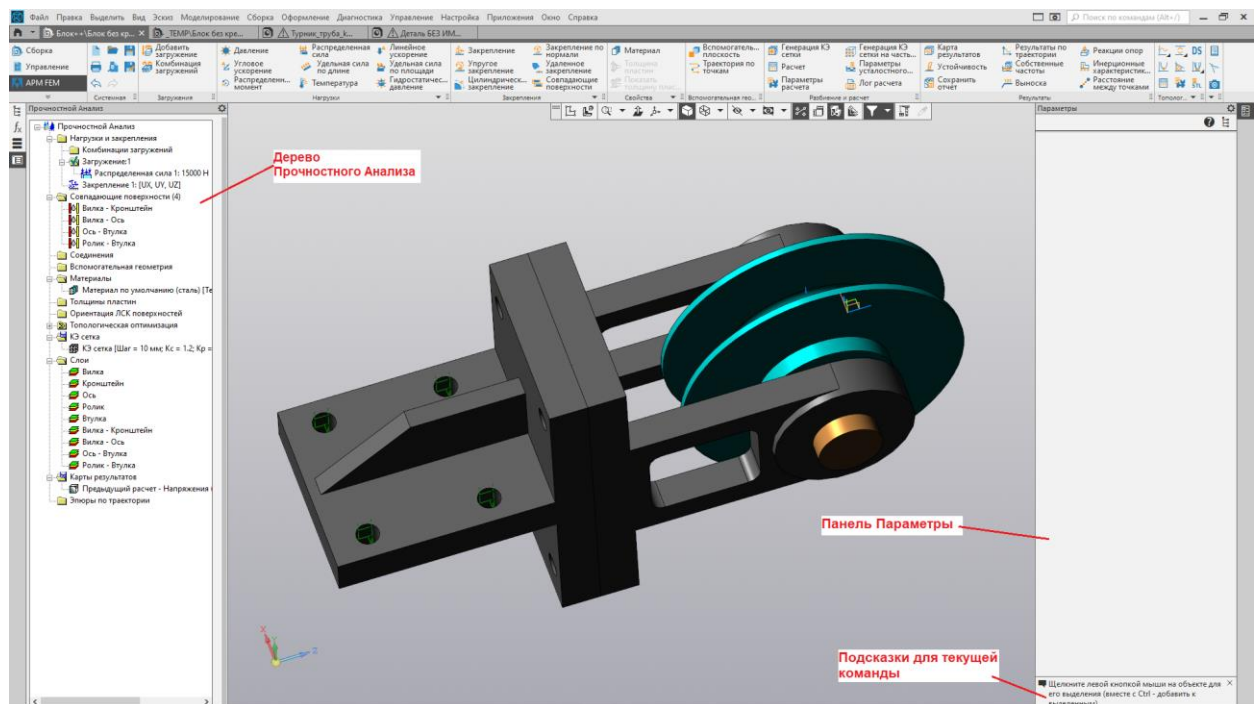


Рис. 1.2. Интерфейс APM FEM

К основным элементам интерфейса APM FEM относятся:

- дерево «Прочностной анализ»;
- панель «Параметры»;
- подсказки для текущей команды;
- информационные сообщения.

Команды APM FEM расположены на инструментальной панели *APM FEM: Прочностной анализ* (Рис. 1.3).

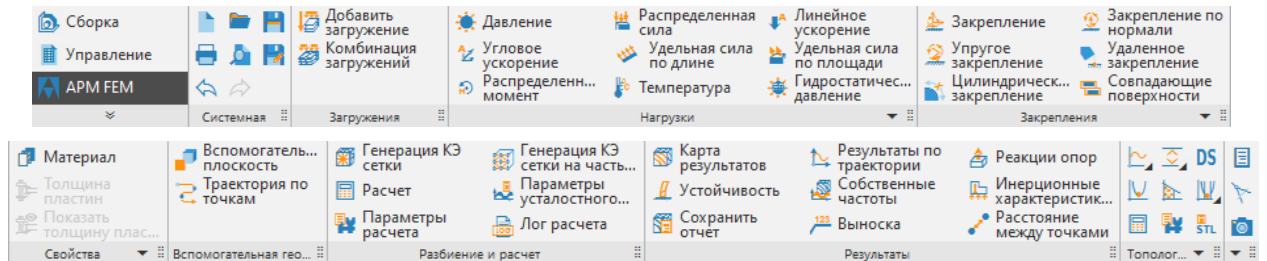


Рис. 1.3. Инструментальная панель APM FEM: Прочностной анализ

1.3 Выбор объектов

Для задания закреплений и нагрузок требуется указание или выделение объектов: как правило, ребер и граней. После активации команды в строке состояния появляется подсказка «Укажите грань (ребро)...». Для выбора грани или ребра достаточно навести на него указатель мыши и щелкнуть левой кнопкой мыши. Цвет выбранных граней и ребер станет красным, а на панели свойств будет указано общее количество объектов, к которым приложена нагрузка или задано закрепление (Рис. 1.4). При выборе объектов следует учитывать вид указателя мыши для граней и ребер (Рис. 1.5).

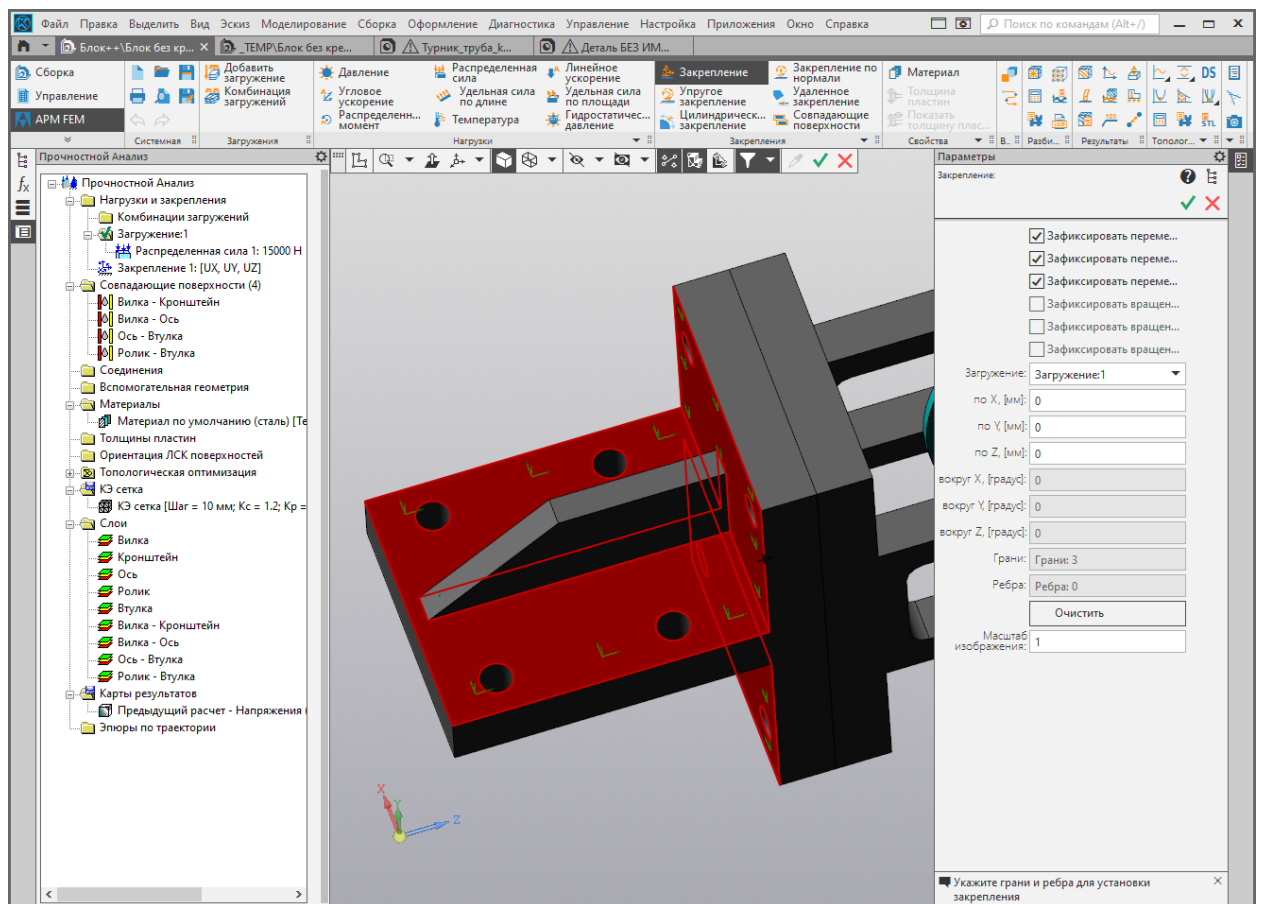


Рис. 1.4. Пример выбора граней для задания закреплений

Для удобства выбора можно использовать фильтры КОМПАС-3D. Для этого в меню **Выделить/Фильтровать объекты** необходимо включить или выключить фильтр граней и ребер.

Для снятия выделения необходимо щелкнуть по объекту повторно.

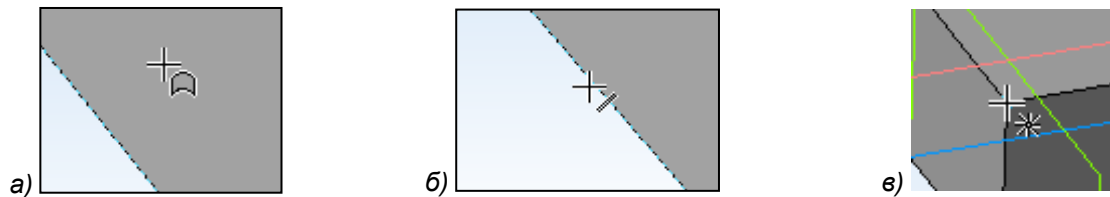


Рис. 1.5. Вид указателя мыши при выборе грани (а), ребра (б), узла (в)

1.4 Задание свойств материала

Задание свойств материала осуществляется средствами системы КОМПАС-3D с использованием **библиотеки Материалов и Сортаментов** или системы справочников **ПОЛИНОМ:MDM. ПОЛИНОМ:MDM** включает в себя набор различных справочников. Для приложения *APM FEM* необходимо использовать справочник материалов, именуемый как **Справочник Материалов и Сортаментов**.

Для выполнения прочностного расчета для материала детали должны быть заданы следующие свойства:

- предел текучести, (МПа);
- модуль упругости нормальный, (МПа);
- коэффициент Пуассона, (-);
- плотность, (кг/м³);
- температурный коэффициент линейного расширения, (1/°C);
- теплопроводность, (Вт/(м·°C));
- предел прочности при сжатии, (МПа);
- предел выносливости при растяжении, (МПа);
- предел выносливости при кручении, (МПа).

В том случае, если для детали или каких-то деталей из сборочной единицы материал из **библиотеки Материалов и Сортаментов** или **ПОЛИНОМ:MDM** не задан, то при генерации конечно-элементной сетки появляется предупреждение со списком этих деталей (Рис. 1.6).

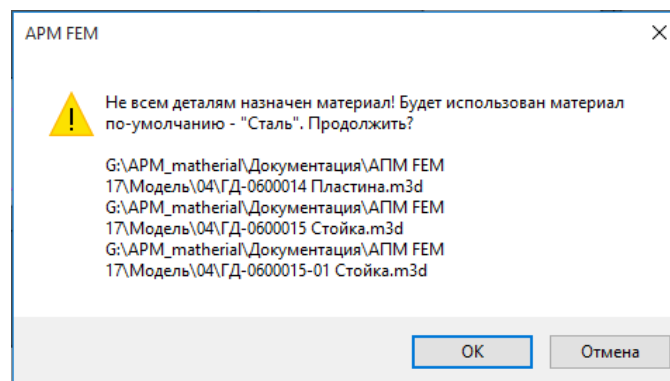


Рис. 1.6. Предупреждение о том, что перечисленным деталям не задан материал из библиотеки

При нажатии кнопки *OK* в этом окне всем перечисленным деталям присвоятся свойства материала «Сталь», соответствующие материалу Сталь 3кп (с пределом текучести 235 МПа). Нажатие кнопки *Отмена* прервет процесс генерации КЭ сетки.

Данное окно предупреждения будет появляться в том случае, если в контекстном меню при щелчке правой кнопкой мыши на папке *КЭ сетка* в дереве прочностного анализа стоит флажок в опции *Проверять наличие материала у деталей*. По умолчанию, флажок в этой опции установлен. При отсутствии флажка в этой опции окно предупреждения выдаваться не будет, и свойства материала «Сталь» будут присваиваться таким деталям автоматически.

Если какой-либо из пунктов свойств материала в библиотеке **Материалов и Сортаментов** или **ПОЛИНОМ:MDM** не задан (некорректен), то по умолчанию принимаются свойства материала «Сталь», соответствующие материалу Сталь 3кп (с пределом текучести 235 МПа), и система выдаёт предупреждение об отсутствии (некорректности) свойств (Рис. 1.7).

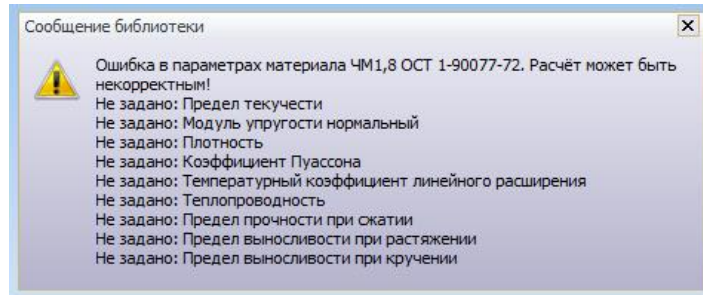


Рис. 1.7. Предупреждение о том, что перечисленные свойства материала не заданы в библиотеке

Учитывая, что практически для всех сталей такие свойства, как модуль Юнга, коэффициент Пуассона и плотность одинаковы, то различий в картах напряжений и перемещений для деталей из разных сталей не будет, и можно использовать материал по умолчанию. Различия будут при просмотре карт коэффициентов запаса, поскольку пределы текучести, прочности, а также выносливости при растяжении и кручении зависят от марки стали.

1.5 Особенности расчета деталей и сборок

Условно, все детали входящие в сборку КОМПАС-3D можно разделить на две группы. К первой группе относятся детали, которые необходимо рассчитать на прочность, используя конечно-элементный анализ. Ко второй группе относятся конструктивные элементы и детали, которые необходимо исключить из расчета.

Для исключения объекта или целой детали из расчета необходимо в дереве модели выбрать команду **Исключить из расчета** (Рис. 1.8).

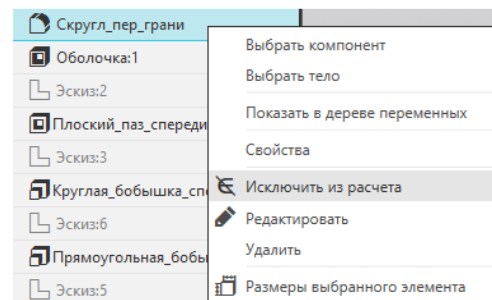


Рис. 1.8. Исключение из расчета

К конструктивным элементам, которые необходимо исключить из расчета, относятся фаски, канавки, небольшие отверстия и другие объекты, которые не оказывают значительного влияния на прочность, однако для их корректного описания потребуется значительное уменьшение размеров конечных элементов.

Необходимо исключить из расчета также детали, прочность которых не вызывает сомнения или может быть определена инженерными методами. Например, при выполнении расчета сборки исключают из расчета элементы крепежа, прочность которых может быть определена инженерными методами расчета.

При генерации КЭ сетки сборки каждая деталь помещается в отдельный слой. Это позволяет просматривать результаты расчета только для одной или нескольких деталей, включая/выключая отдельные слои.

1.6 Панель Параметры

Для задания параметров команд используется **Панель параметров** КОМПАС-3D. По умолчанию панель параметров расположена на отдельной вкладке рядом с деревом операций или поверх него, но для удобства эту панель можно переместить в любое удобное место (Рис. 1.2).

Задание граничных условий (нагрузок и закреплений) по умолчанию осуществляется в глобальной системе координат (ГСК) или по нормали к поверхности. Если выбрана локальная система координат (ЛСК), то граничные условия задаются в ней.

Для изменения направления нагрузки на противоположное в общем случае необходимо изменить знак перед её значением на противоположный или использовать соответствующий ин-

струментарий конкретной команды. Истинное направление действия нагрузки отображается непосредственно на модели.

Любая нагрузка помещается в какое-либо загрузение. Чтобы поместить нагрузку в требуемое загрузение, необходимо выбрать его из выпадающего списка *Загрузение*. По умолчанию нагрузка помещается в активное загрузение.


Для завершения ввода значений параметров служит кнопка  (Ctrl+Enter).

Для отказа от задания параметров и прерывания команды служит кнопку  (Esc).

1.7 Настройки изображения стрелок закреплений и нагрузок

Размеры изображения стрелок, закреплений и нагрузок на модели определяются автоматически. При этом панель свойств всех команд содержит поле для ввода масштаба изображения. *Масштаб изображения* позволяет изменить размеры стрелок закреплений и нагрузок при отображении на модели. Данный инструмент позволяет улучшить визуализацию, если размеры изображения стрелок закреплений и нагрузок на модели не видны или, наоборот, слишком громоздки.

При задании нагрузок на тела стрелки могут быть не видны (отображаться внутри модели).

Для лучшего отображения предназначена команда **Режим отображения** , которая позволяет отобразить нагрузку с противоположной стороны выбранной поверхности. Команда доступна для *Давления*, *Распределенной силы*, *Удельной силы по длине*, *Удельной силы по площади*, *Температуры*.

1.8 Команды панели Настройки

Команды панели **Настройки** представлены на Рис. 1.9.

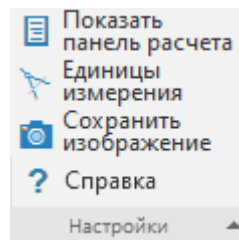




Рис. 1.9. Панель инструментов Настройки

 **Показать панель расчета** – команда активирует вкладку с деревом прочностного анализа. Эту команду следует вызвать, чтобы отобразить вкладку с деревом после загрузки файла.

 **Единицы измерения** – команда вызывает диалоговое окно, в котором можно выбрать единицы измерения для различных физических величин, используемых в модуле APM FEM (Рис. 1.10).

Единицы измерения отображаются в дереве объектов, при создании/редактировании объекта, а также участвуют при формировании отчета.

Кнопка *Сохранить* сохраняет текущие настройки единиц измерения. Сохраненные настройки используются как настройки по умолчанию при работе с новым проектом. При открытии ранее сохраненного файла используются настройки единиц измерения, сохраненные в этом файле.

Кнопка *По умолчанию* восстанавливает настройки единиц измерения, установленные по умолчанию.

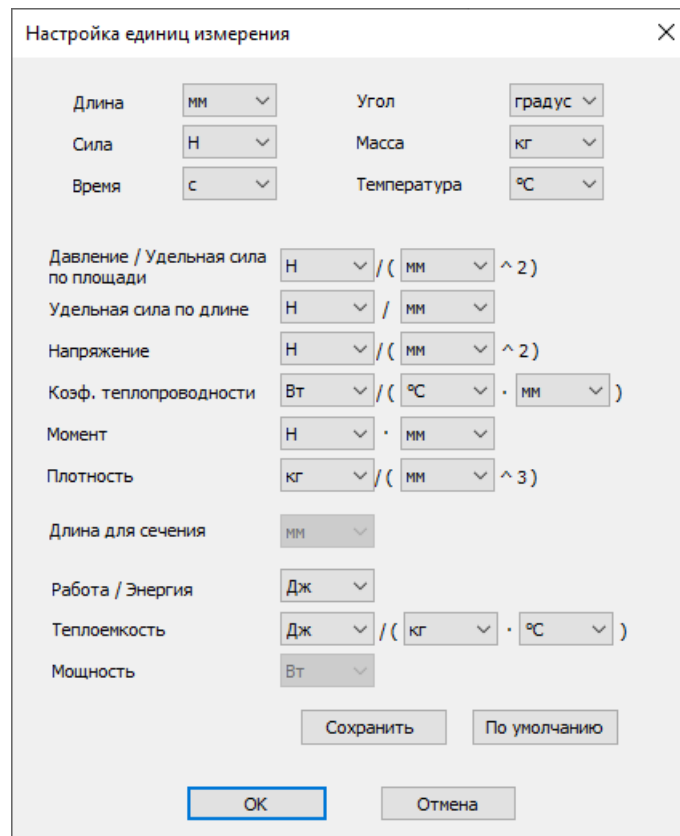



Рис. 1.10. Настройка единиц измерения

 **Сохранить изображение** – команда позволяет пользователю сделать снимок рабочей области программы (Рис. 1.11).

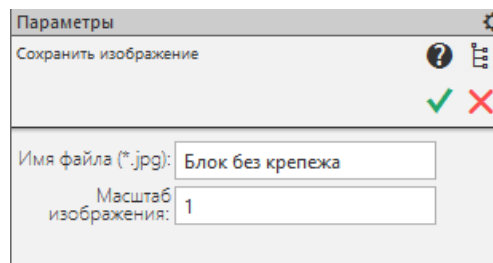


Рис. 1.11. Инструменты команды Сохранить изображение

В поле *Имя файла (*.jpg)* вводится название файла-картинки, которое по умолчанию совпадает с именем модели. Можно ввести любое другое имя файла-картинки. В поле *Масштаб изображения* задается масштаб сохраняемой картинки.

Файлы-картинки сохраняются в папке *Сохраненные изображения (Name)*, которая создается в текущей директории проекта, где *Name* – имя модели. Все файлы-картинки сохраняются в формате jpg. Все файлы-картинки сохраняются после завершения сеанса работы с модулем APM FEM и могут быть использованы повторно при последующей работе с проектом. Для каждого проекта (модели) создается своя папка с картинками.

Сделанные снимки в дальнейшем можно использовать при формировании отчета. Чтобы сохраненные картинки можно было вставить в конец отчета, необходимо в окне *Сохранить отчет* поставить флажок *Сохраненные изображения*.

Сохранение изображений доступно в любом режиме (при просмотре сетки, карт результатов и т.д.).

 **Справка** – команда открывает окно справочной системы APM FEM.

Глава 2. Типы расчетов

2.1 Статический расчет

Для анализа напряженно-деформированного состояния трехмерных моделей машиностроительных и строительных конструкций, состоящих из пластинчатых/оболочечных и объемных конечных элементов, предназначен статический расчет. Результатами расчета являются:

- распределение эквивалентных напряжений и их составляющих, а также главных напряжений;
- распределение линейных, угловых и суммарных перемещений;
- распределение деформаций по элементам модели;
- распределение коэффициентов запаса по текучести и прочности;
- координаты центра масс, масса, моменты инерции модели;
- суммарные реакции, приведенные к центру масс модели.

2.2 Расчет устойчивости

Выход из строя конструкций, работающих под действием сжимающих нагрузок, возможен не только за счет появления в их элементах напряжений, превышающих допускаемые для выбранного материала значения, но и вследствие потери устойчивости. В случае отсутствия таких нагрузок сжимающие напряжения в конструкции не возникают и, следовательно, она всегда устойчива – например, подвешенный на стержне груз.

2.3 Расчет частот и форм собственных колебаний

Расчет собственных частот и соответствующих им форм собственных колебаний объектов, в том числе и предварительно нагруженных, проводится, как правило, в тех случаях, когда эти объекты подвержены динамическому воздействию, в частности, работают в условиях вибрации с известным спектром.

Задача нахождения собственных частот и форм актуальна для многих типов конструкций, в частности, для летательных аппаратов — например, вследствие вибрации двигателя вертолета в резонанс может входить его несущая рама.

2.4 Тепловой расчет

Задачей теплового расчета является определение температурного поля модели при заданных значениях относительной температуры в отдельных узлах в условиях стационарной теплопроводности, т. е. в предположении отсутствия потерь энергии за счет излучения во внешнее пространство и теплопередачи.

2.5 Топологическая оптимизация

Топологическая оптимизация - один из этапов структурной оптимизации изделия, благодаря которому определяется оптимальное распределение материала в ограниченном пространстве (области проектирования) с учетом нагрузок и закреплений. В качестве критерия оптимальности могут выступать разные значения: жесткостные или прочностные характеристики конструкции, масса, собственные частоты и др. Благодаря этой технологии получается существенно снизить материалоемкость и вес конструкции с наперед заданными эксплуатационными показателями.

2.6 Общий порядок расчета модели

Порядок подготовки модели и выполнения расчета:

1. Подключение библиотеки *APM FEM: Прочностной анализ*.

2. Задание закреплений и приложение нагрузки.
3. Задание совпадающих граней (для КЭ анализа сборки).
4. Генерация КЭ сетки.
5. Выполнение расчета.
6. Просмотр результатов в виде карт напряжений, перемещений и т.п..

ВНИМАНИЕ! При любом изменении граничных условий (нагрузок и закреплений), а также замене материала деталей для получения обновленных результатов необходимо перестроение конечно-элементной сетки и проведение нового расчета.

2.7 Порядок расчета модели при топологической оптимизации

Порядок подготовки модели и выполнения расчета:

1. Подключение библиотеки *APM FEM: Прочностной анализ*.
2. Формирование расчётной модели (задание материалов, закреплений, загружений, совпадающих поверхностей и др.).
3. Формирование оптимизационной задачи.
 - 3.1. Задание области проектирования, определяющей, где может располагаться материал по условиям конструктивных и технологических ограничений.
 - 3.2. Задание откликов для дальнейшего формирования целевой функции (ЦФ) и ограничений из доступных:
 - объем;
 - общая энергия деформации;
 - масса;
 - перемещение узла вдоль одной из глобальных осей;
 - проекция перемещения узла на заданное направление;
 - взаимное смещение двух узлов;
 - напряжение группы элементов.
 - 3.3. Формирование ЦФ на основе сформированных откликов.
 - 3.4. Формирование ограничений на основе сформированных откликов.
 - 3.5. Добавление технологических ограничений из доступных:
 - минимальная толщина;
 - максимальная толщина;
 - симметрия;
 - штамповка;
 - экструзия;
 - 3d – печать.
 - 3.6. На основе ЦФ, ограничений и технологических ограничений, происходит формирование оптимизационной задачи.
 - 3.7. Задание настроек сходимости и параметров работы с памятью.
4. Генерация КЭ сетки.
5. Выполнение расчета топологической оптимизации конструкции по заданным параметрам с учетом наложенных ограничений.
6. Анализ результатов - просмотр карты "Объемная доля", обработка (визуальное удаление "лишнего" материала).
7. Пост-обработка полученной оптимизированной геометрии конструкции (либо специализированными инструментами КОМПАС-3D, либо обычными средствами КОМПАС-3D после экспорта/импорта файла формата STL).

Глава 3. Команды APM FEM

3.1 Подготовка модели к расчету

Команды панелей **Загрузки**, **Нагрузки** и **Закрепления** предназначены для подготовки модели к расчету (задания граничных условий) (Рис. 3.1).

Отдельные нагрузки или закрепления можно показать или скрыть, используя дерево прочностного анализа. Это влияет только на отображение на модели.

Для того чтобы исключить нагрузку или закрепление из расчета необходимо, используя дерево прочностного анализа, вызвать из контекстного меню команду *Исключить из расчета* (*Включить в расчет*) для соответствующего объекта. Эту возможность можно использовать для вариации расчетных моделей.

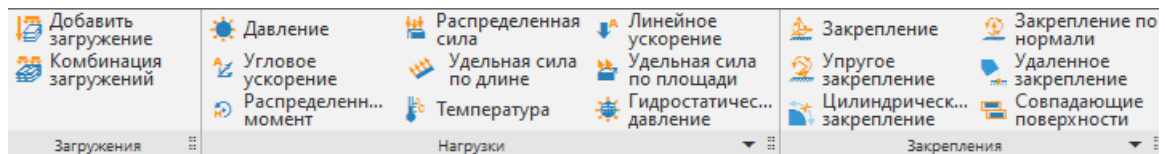


Рис. 3.1. Панели инструментов Загрузки, Нагрузки и Закрепления

Добавить загрузку – команда добавляет новое загрузку. В папку *Нагрузки и закрепления* дерева прочностного анализа добавляется подпапка загрузки с именем по умолчанию. Загрузка может включать в себя комбинацию нагрузок. При щелчке правой кнопкой мыши на папке *Загрузка* в дереве вызывается контекстное меню (Рис. 3.2), в котором можно удалить выбранное загрузка, отредактировать или сделать активным.

Командой *Показать схему нагрузок* выводится таблица, в которой можно посмотреть, какие нагрузки применены к тому или иному загрузку (Рис. 3.3). Закрепления показываются всегда, поскольку они считаются общими для всех загрузок. Индексация нагрузок и закреплений осуществляется буквами латинского алфавита. На модели будут прорисованы элементы (грани, ребра) и отображены индексы, к которым приложены нагрузки для выбранного загрузку, и все закрепления. Индексы в квадратных скобках характеризуют невидимые на экране пользователя элементы. Индексы без квадратных скобок показывают видимые элементы.

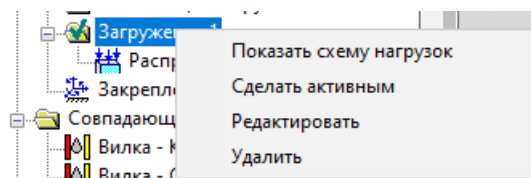


Рис. 3.2. Контекстное меню папки загрузки

Индекс	Название
A	Распределенная сила 1: 15000 Н
B	Закрепление 1: [UX, UY, UZ]

Рис. 3.3 Схема нагрузок

Схему нагрузок для каждого нагружения можно отобразить в отчете. Для этого в окне *Сохранить отчет* нужно поставить галочку напротив *Схема нагрузок*.

Если нагружение активно, то при задании новой нагрузки она будет помещаться по умолчанию в это нагружение.

При выборе команды *Редактировать* вызывается диалог *Загружение* (Рис. 3.4) в котором можно задать название нагружения и множитель собственного веса. Множитель собственного веса - коэффициент, с которым собственный вес всей модели добавится к выбранному нагружению при расчете этого нагружения. По умолчанию равен 0. Необходимо учитывать, что вектор силы тяжести будет направлен против оси Z глобальной системы координат.

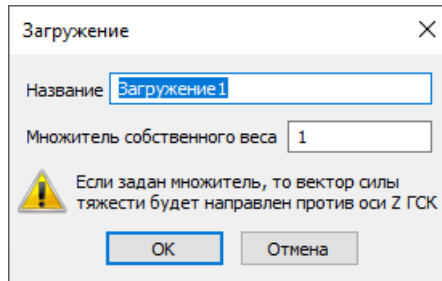



Рис. 3.4. Диалог Загружение

 **Комбинация нагружений** – команда вызывает диалог *Комбинация нагружений* (Рис. 3.5). Комбинация нагружений представляет собой линейную комбинацию одновременно действующих нагружений. Возможно создание нескольких комбинаций нагружений.

В диалоговом окне можно задать название для создаваемой комбинации нагружений. Чтобы добавить нагружение в комбинацию, выберите его в выпадающем списке нагружений, задайте для него множитель и нажмите кнопку *Добавить*. Чтобы удалить нагружение из комбинации нагружений, выберите требуемое нагружение в списке добавленных нагружений и нажмите кнопку *Удалить выбранное нагружение*.

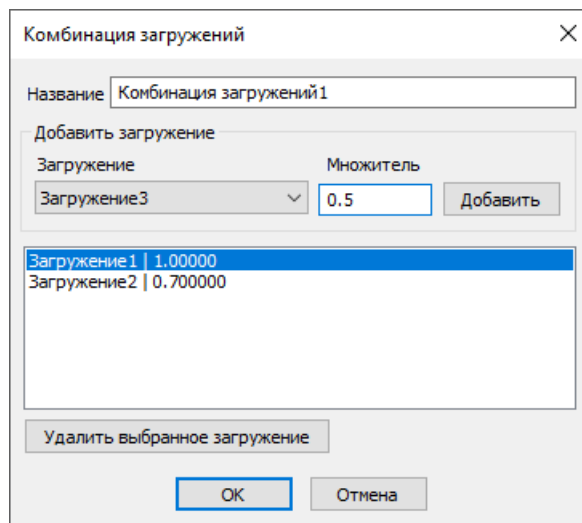


Рис. 3.5. Диалог Комбинация нагружений

После нажатия кнопки *ОК* созданная комбинация нагружений будет добавлена в папку *Комбинации нагружений*. При щелчке правой кнопкой мыши на объекте *Комбинация нагружений* в дереве вызывается контекстное меню (Рис. 3.6), где можно удалить или отредактировать выбранную комбинацию, а также показать схему нагрузок, которая аналогична схеме нагрузок для *Загружения* (см. Рис. 3.3).

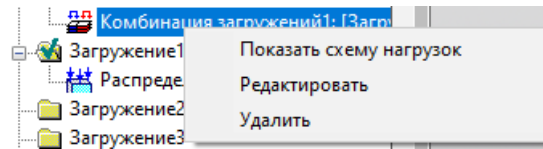



Рис. 3.6. Контекстное меню объекта Комбинация загрузок

 **Давление** – команда предназначена для создания равномерно распределенного давления по нормали к поверхностям трехмерной модели.

Для этого необходимо указать поверхности, к которым будет приложено давление. Выбранные поверхности будут выделены красным цветом и занесены в список граней, а также на них отрисуются стрелки, указывающие направление действующего давления (Рис. 3.7).

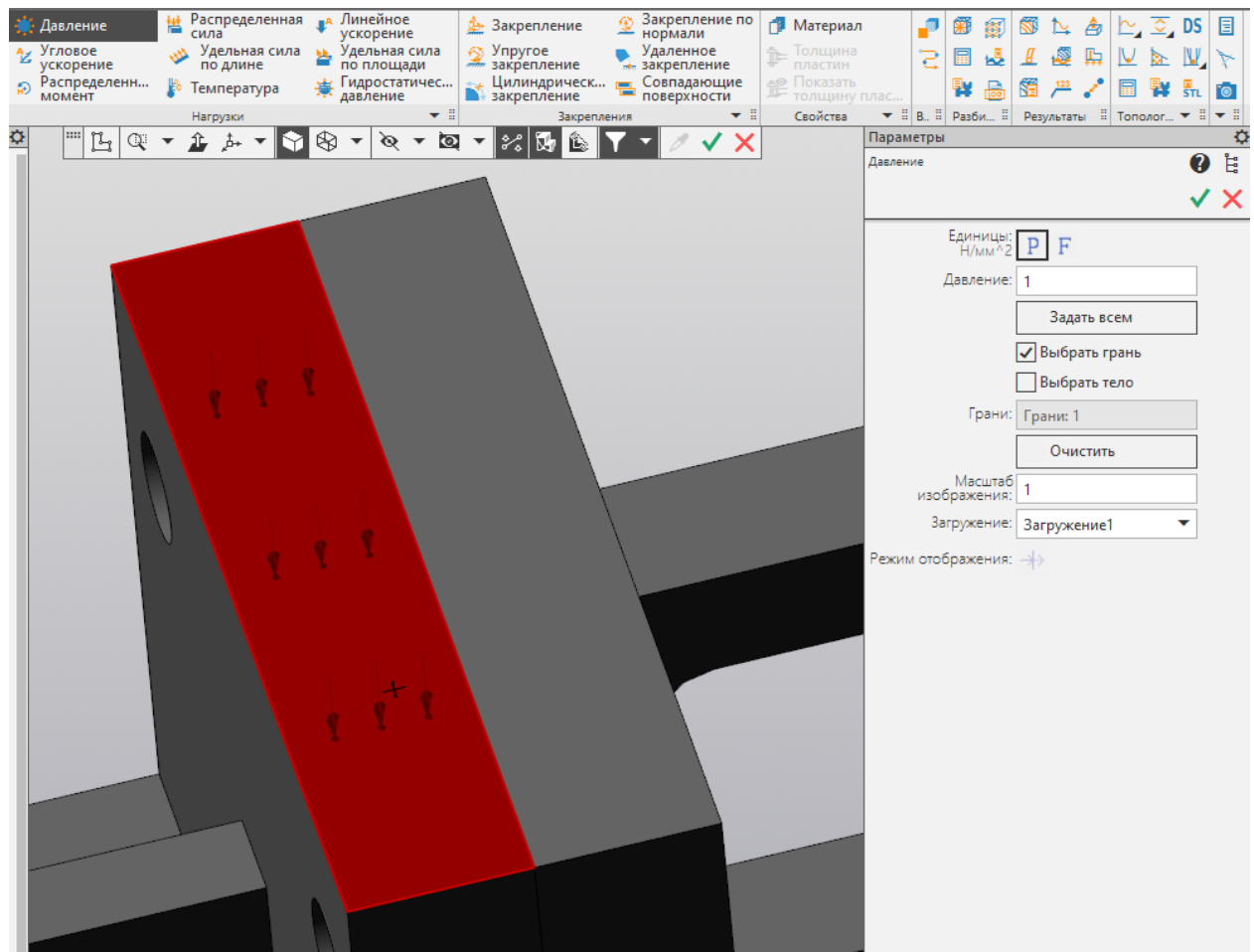


Рис. 3.7. Указание поверхности, на которую будет приложено давление

Опция *Выбрать грань* позволяет выбирать отдельные грани.

Опция *Выбрать тело* позволяет выбирать детали целиком при работе со сборками.

Кнопка *Задать всем* прикладывает давление ко всем поверхностям одной детали или сборки.

Значение давления вводится в поле *Давление*. Значение нагрузки может быть задано как в виде давления, так и в виде силы, действующей на данную грань. Для этого необходимо выбрать кнопку *P* для давления или *F* для силы.

При выборе способа задания давления через силу введенное значение силы будет задано на все выбранные грани равномерно. Такой подход позволяет с помощью одной команды задать суммарную нагрузку на группу разных по площади граней.

Давление моделируется как сила, действующая на выбранную поверхность и направленная по нормали к каждой точке поверхности.



Распределенная сила – команда предназначена для создания равномерно распределенной силы к грани или ребру трехмерной модели (Рис. 3.8).

Для задания направленной распределенной силы необходимо выбрать грани или ребра, а также в полях *Направление X*, *Направление Y*, *Направление Z* ввести значения компонент вектора, соответствующие проекциям силы в глобальной системе координат. В поле *Величина вектора силы* выводится результирующее значение (длина вектора) силы, которое также можно отредактировать.

Задать направление действия силы можно по ребру или отрезку. Для этого необходимо отметить опцию *Взять вектор с отрезка* и указать соответствующее ребро или отрезок. Кнопка *Инvertировать вектор* позволяет изменить направление вектора на противоположное.

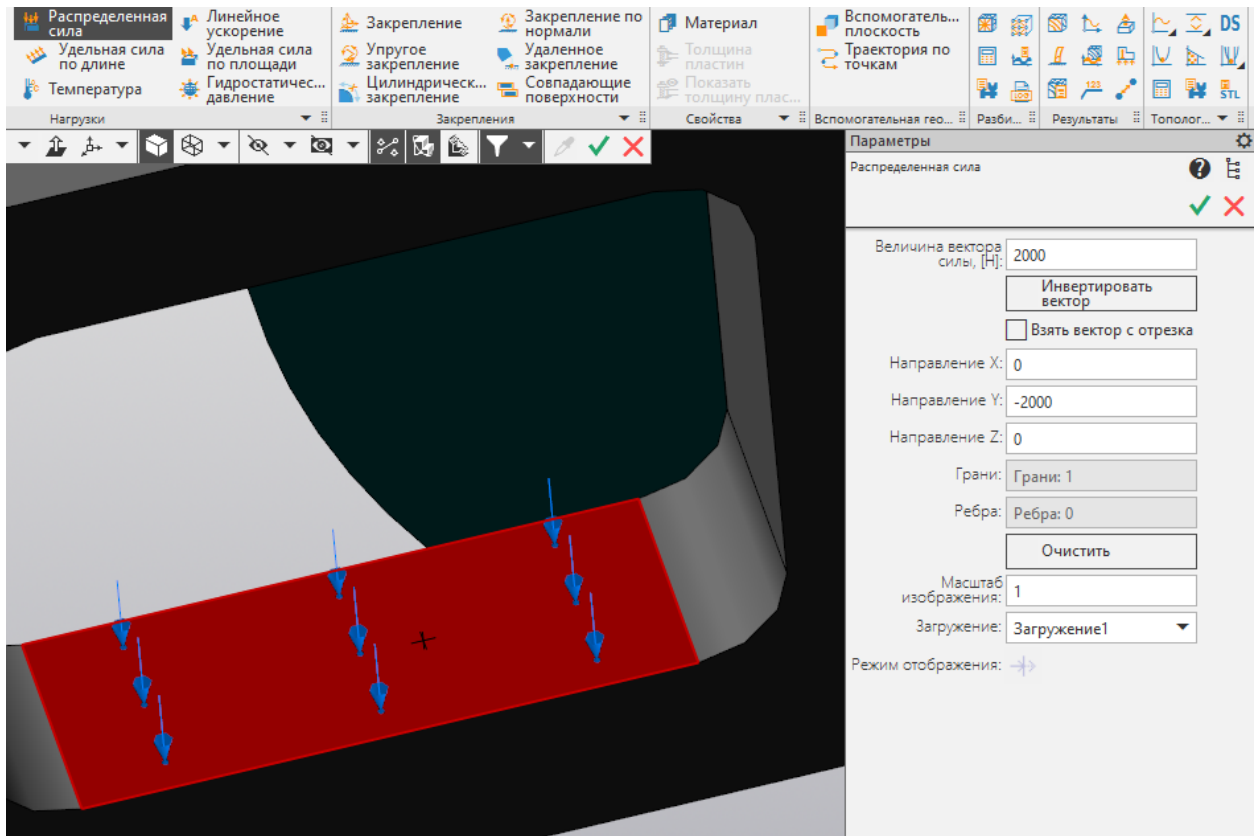


Рис. 3.8. Задание распределенной силы



Линейное ускорение – команда предназначена для задания вектора линейного ускорения. Значение линейного ускорения вводится в поля *Направление X*, *Направление Y*, *Направление Z*, соответствующие его проекциям в глобальной системе координат (Рис. 3.8). В поле *Величина вектора ускорения* выводится результирующее значение (длина вектора) ускорения, которое также можно отредактировать. Задать направление действия линейного ускорения также можно по ребру или отрезку. Для этого необходимо выбрать опцию *Взять вектор с отрезка* и указать соответствующее ребро или отрезок. Кнопка *Инvertировать вектор* позволяет изменить направление вектора на противоположное.

Ускорение действует на всю конструкцию. Вектор ускорения изображается красной стрелкой из точки с координатами (0; 0; 0).

С помощью данной команды также можно задать ускорение свободного падения и, таким образом, учесть действие силы тяжести. Например, если линейное ускорение задано против оси Y, то в ту же сторону будет действовать эквивалентная ей сила тяжести (Рис. 3.9).

Чтобы поместить нагрузку в требуемое загрузке, необходимо выбрать его из выпадающего списка *Загрузка*. По умолчанию нагрузка помещается в активное загрузке.

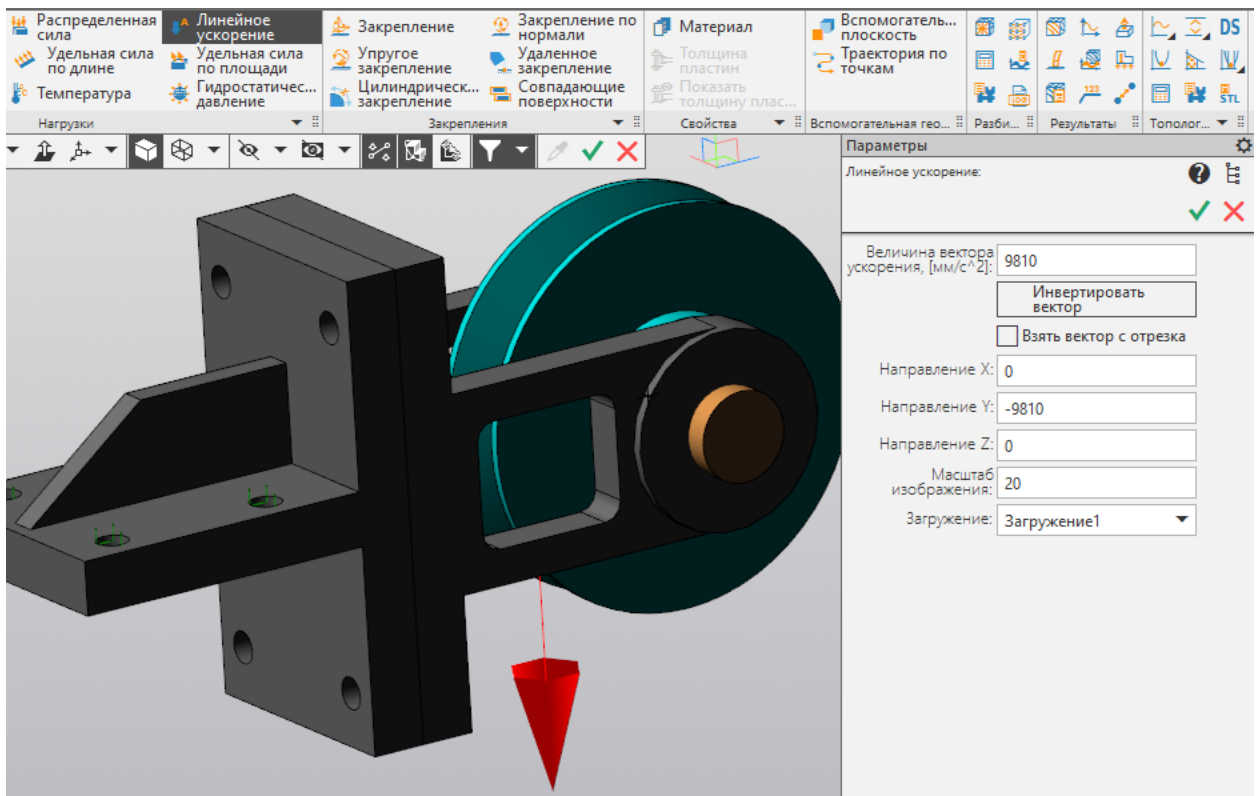


Рис. 3.9. Задание линейного ускорения

Угловое ускорение – команда предназначена для задания угловой скорости и углового ускорения (Рис. 3.9).

Точка отсчета и *Направление* задаются в соответствующих им полях X, Y, Z, соответствующих проекциям в глобальной системе координат. Значения угловой скорости и углового ускорения задаются дополнительно. Направление угловой скорости и ускорения определяется по «правилу правого винта». Вектор углового ускорения изображается желтой стрелкой в точке отсчета.

Точку отсчета можно также указать на модели на пересечении ребер. Привязка по точке действует к пересечению ребер.

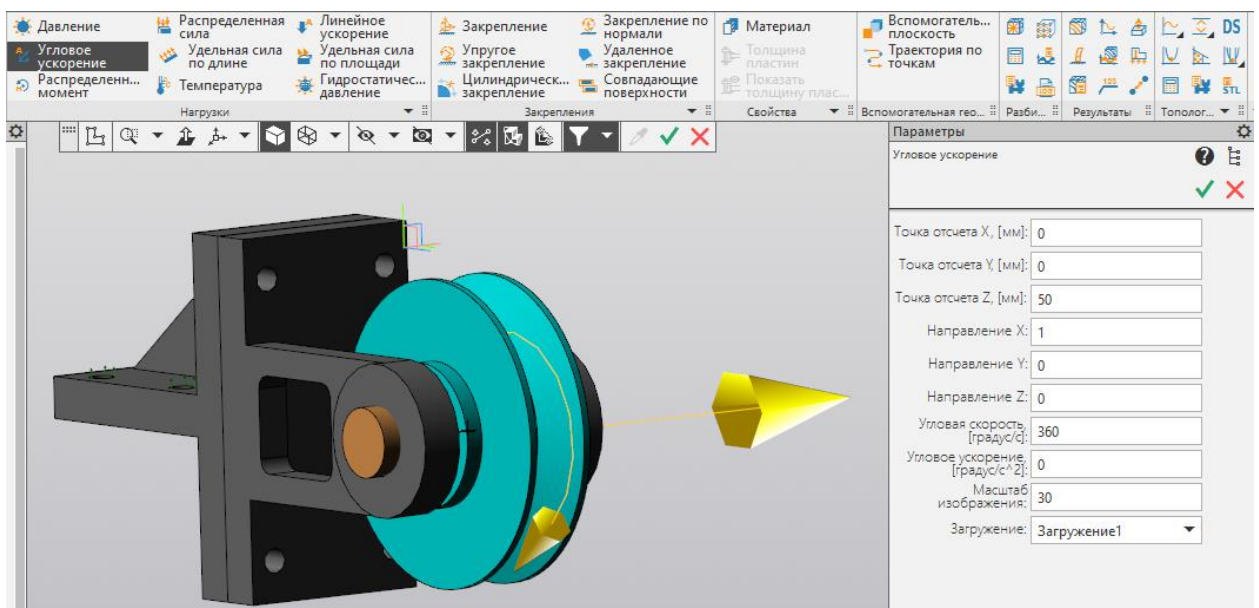


Рис. 3.9. Задание угловой скорости и углового ускорения



Удельная сила по длине – команда предназначена для задания равномерно распределенной силы к ребру трехмерной модели. (Рис. 3.10). Для задания нагрузки необходимо указать ребра, к которым будет приложена сила, и ввести проекции этой силы по осям X, Y, и Z в соответствующие поля *Направление X*, *Направление Y*, *Направление Z* в глобальной системе координат, тем самым задав как значение, так и направление действия силы. Задание проекции по любой из осей приведет к появлению на выделенных ребрах стрелок, показывающих направление действия силы в данном конкретном случае. В поле *Величина вектора нагружения* выводится результирующее значение (длина вектора) удельной силы, которое также можно отредактировать.

Задать направление действия удельной силы по длине можно по ребру или отрезку. Для этого необходимо выбрать опцию *Взять вектор с отрезка* и указать соответствующее ребро или отрезок. Кнопка *Инvertировать вектор* позволяет изменить направление вектора на противоположное.

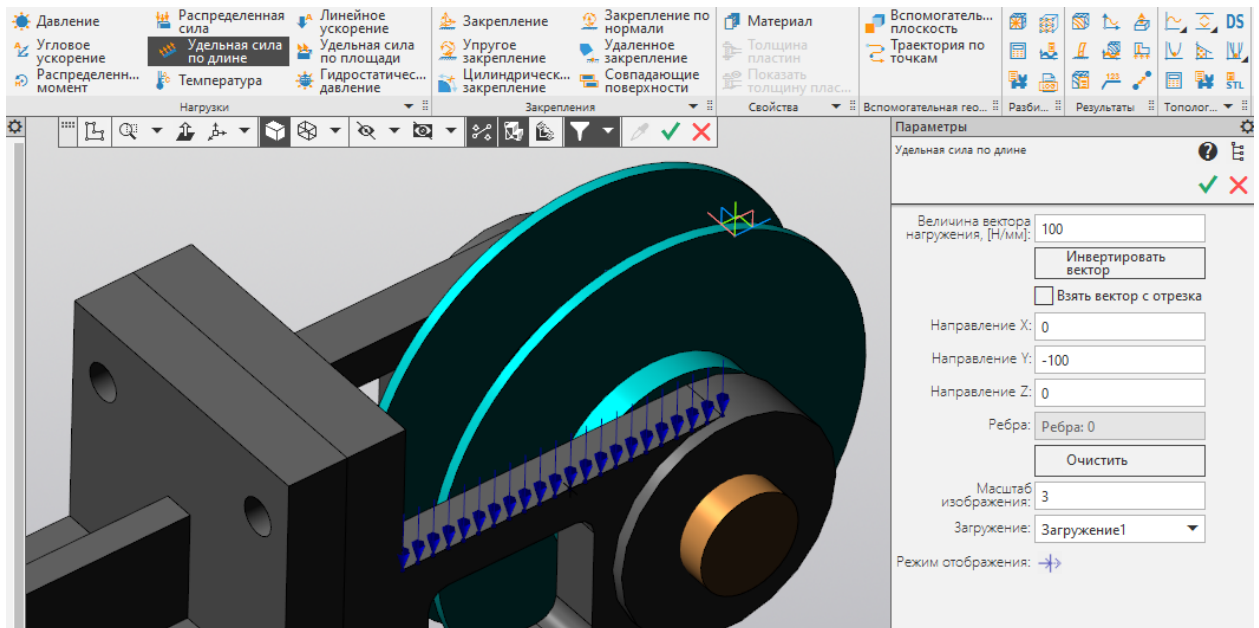


Рис. 3.10. Задание удельной силы по длине



Удельная сила по площади – команда предназначена для задания равномерной удельной силы по площади к поверхности трехмерной модели. Задание данной нагрузки аналогично заданию *Распределенной силы*, только значение удельной силы вводится в Н/мм².



Распределенный момент – команда предназначена для задания равномерно распределенного момента по площади к поверхности трехмерной модели, либо по длине к ребру (Рис. 3.11). Одновременно, в рамках одной команды, приложить распределенный момент и к грани, и к ребру нельзя. Задание данной нагрузки аналогично заданию элементарных сил, создающих заданный по величине момент вокруг геометрического центра выбранных поверхностей или ребер.

Для задания нагрузки необходимо указать те грани или ребра, к которым будет приложен распределенный момент, ввести значение действующего момента и вектора его направления в пространстве. Для этого достаточно ввести проекции вектора этого момента по осям X, Y, и Z в соответствующие поля *Компонента Mx*, *Компонента My*, *Компонента Mz* в глобальной системе координат, тем самым задав как значение, так и направление действия вектора момента. Задание проекции по любой из осей приведет к появлению на выделенных ребрах или гранях стрелок, показывающих направление действия вектора момента. В поле *Величина вектора момента* выводится результирующее значение (длина вектора) момента, которое также можно отредактировать.

Задать направление действия вектора момента можно также по ребру или отрезку. Для этого необходимо выбрать опцию *Взять вектор с отрезка* и указать соответствующее ребро или отрезок. Кнопка *Инvertировать вектор* позволяет изменить направление вектора на противоположное.

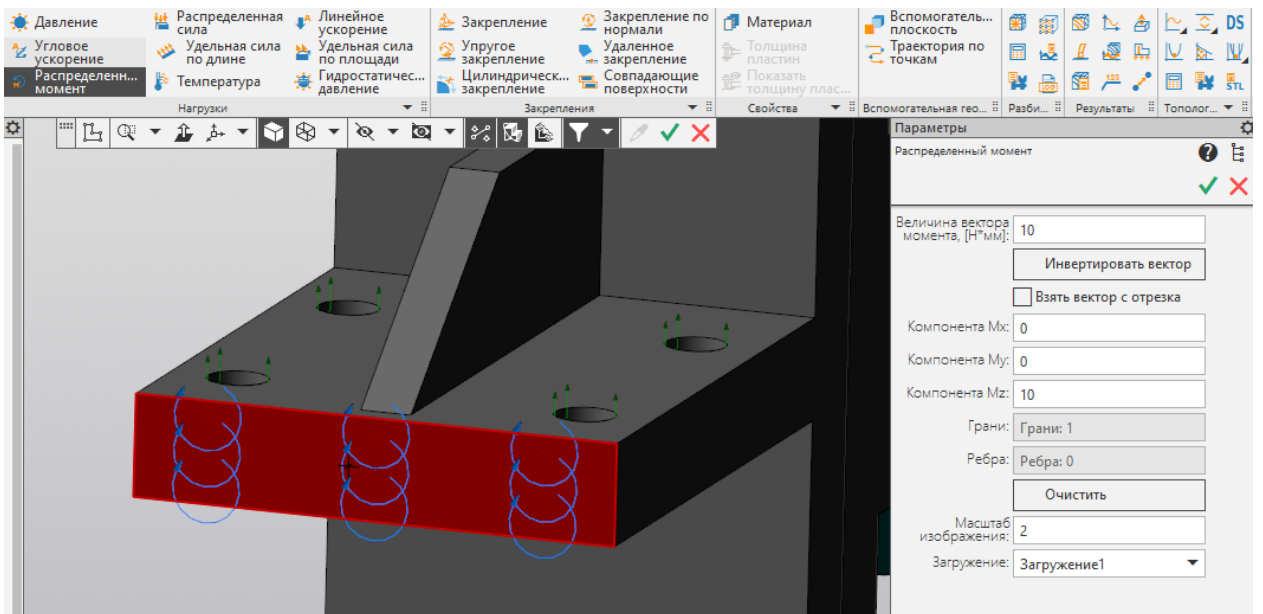


Рис. 3.11. Задание распределенного момента

Температура – команда предназначена для задания равномерно распределенной температуры к ребру, к поверхности или к узлу (Рис. 3.12).

Опция *Выбрать тело* позволяет выбирать детали целиком при работе со сборками.

Кнопка *Задать всем* задает температуру всем поверхностям одной детали или сборки.

Для задания нагрузки выбираются поверхности, ребра, узлы или детали целиком, к которым будет приложена температура, и в поле *Температура* вводится числовое значение действующей температуры.

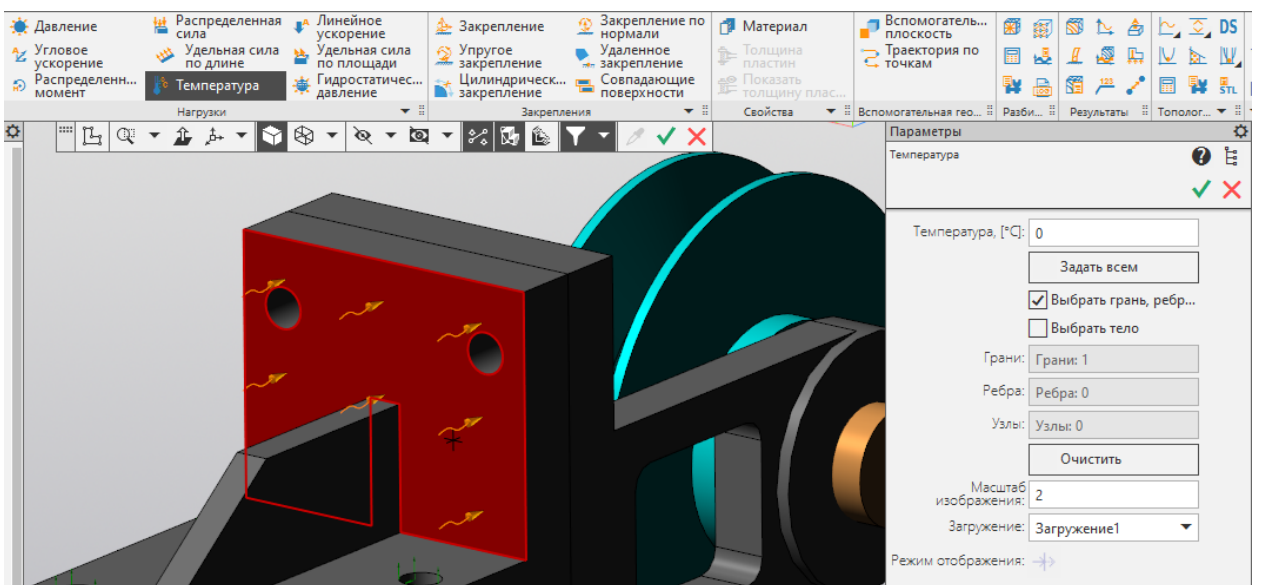


Рис. 3.12. Задание температуры

Гидростатическое давление – команда предназначена для задания нагрузки в виде гидростатического давления к грани трехмерной модели (Рис. 3.13).

В поле *Плотность* вводится значение плотности жидкости. Значение с учетом направления вводится в поля *Координата X*, *Координата Y*, *Координата Z*, соответствующие проекциям в глобальной системе координат. В поле *Величина вектора ускорения* выводится результирующее значение (длина вектора) действующего линейного ускорения (чаще всего это ускорение свободного падения), которое также можно изменить. Задать направление действия линейного ускорения

также можно по ребру или отрезку. Для этого необходимо выбрать опцию *Взять вектор с отрезка* и указать соответствующее ребро или отрезок. Направление вектора определится автоматически.

Точка свободной поверхности.

При действии гидростатического давления указывается точка свободной поверхности.

В поле *Начальное давление* вводится значение давления на свободной поверхности жидкости. Для определения положения свободной поверхности жидкости в пространстве в полях *Координата X*, *Координата Y*, *Координата Z* вводятся координаты точки, лежащей на свободной поверхности. Координаты точки свободной поверхности также можно определить указанием вершины выбором соответствующей опции *Указать вершину* и выбором вершины на модели. По точке и вектору ускорения положение свободной поверхности определяется однозначно.

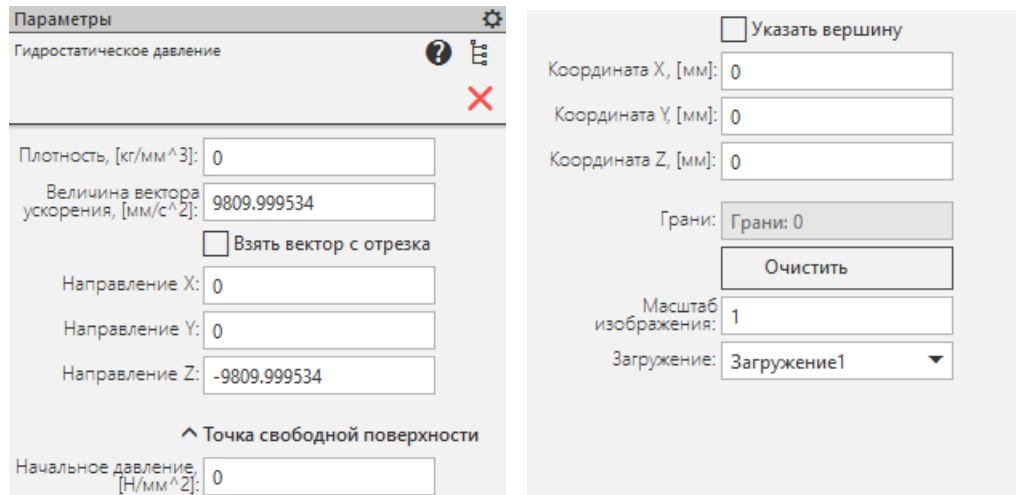


Рис. 3.13. Задание гидростатического давления



Подшипниковая нагрузка – команда предназначена для задания подшипниковой нагрузки (Рис. 3.14). Подшипниковая нагрузка предназначена для вычисления контактных усилий от действия радиальной силы на подшипник.

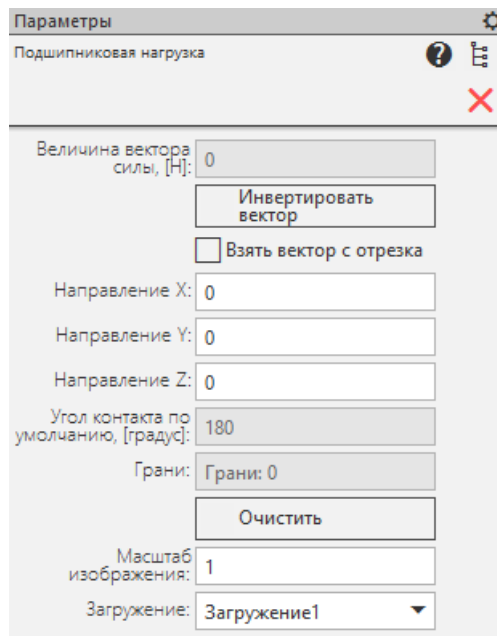


Рис. 3.14. Задание подшипниковой нагрузки

Значение радиальной силы вводится в поля *Направление X*, *Направление Y*, *Направление Z*, соответствующие проекциям в глобальной системе координат. Задать направление действия силы можно также по ребру или отрезку. Для этого необходимо выбрать опцию *Взять вектор с отрезка* и указать соответствующее ребро или отрезок. Кнопка *Инvertировать вектор* позволяет изменить направление вектора на противоположное. В поле *Величина*

вектора силы выводится результирующее значение (длина вектора) силы, которое также можно отредактировать.

Угол контакта – угол контакта ψ подшипника с валом. По умолчанию угол контакта ψ составляет 180 градусов и не меняется (Рис. 3.15).

При задании подшипниковой нагрузки можно выбрать только грани цилиндрической формы.

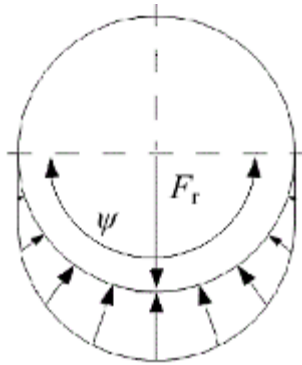


Рис. 3.15. Угол контакта подшипника с валом



Удаленная сила – команда предназначена для создания удаленной силы к граням или ребрам трехмерной модели (Рис. 3.16).

Для задания значения силы необходимо ввести с клавиатуры компоненты вектора в поля *Направление X*, *Направление Y*, *Направление Z*, соответствующие проекциям силы в глобальной системе координат. В поле *Величина вектора* выводится результирующее значение (длина вектора) силы, которое также можно отредактировать..

Необходимо указать грани или ребра, к которым будет приложена удаленная сила. Для того, чтобы убрать из списка ранее выбранную грань (ребро) необходимо ещё раз щелкнуть на эту грань (ребро).

Для задания точки приложения силы необходимо ввести её координаты в поля *Координата X*, *Координата Y*, *Координата Z*. Также точку можно задать по выбранной грани или ребру. Для этого необходимо выбрать опцию *Указать положение* и щёлкнуть по грани или ребру. Положение точки определится автоматически, исходя из геометрического центра выбранного объекта.

Характер приложения (деформируемый или жесткий) можно указать в соответствующем выпадающем списке.

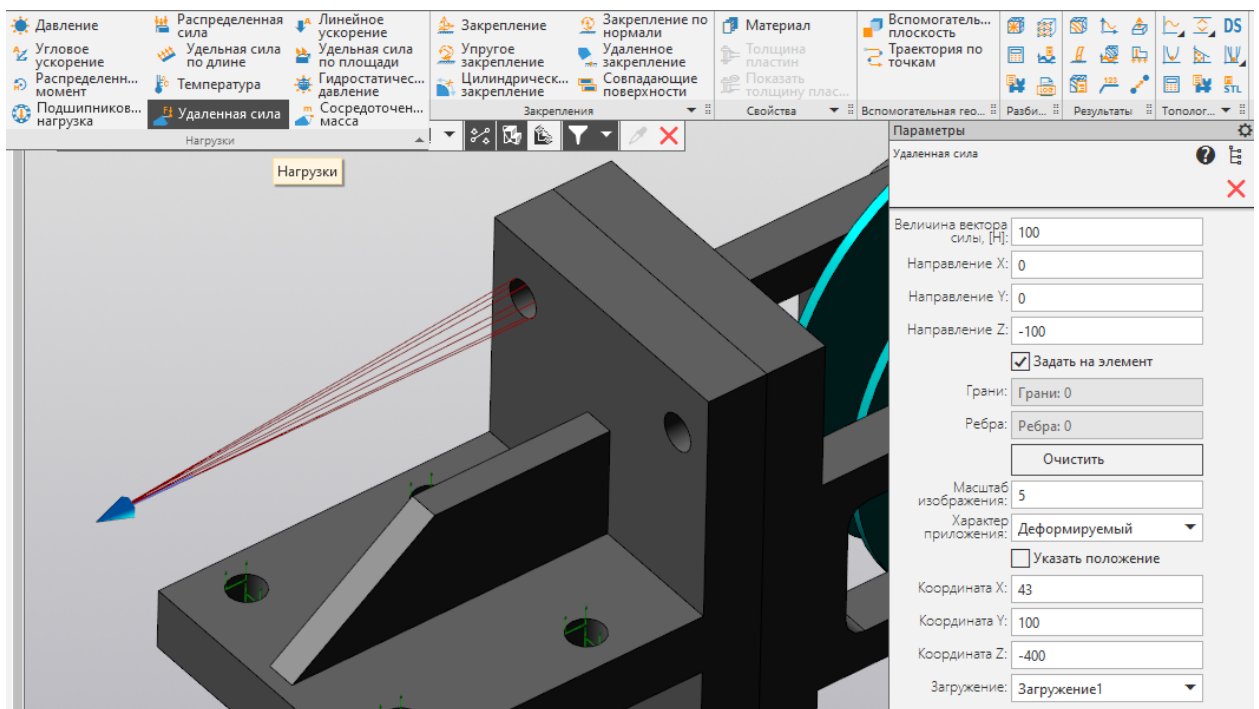


Рис. 3.16. Задание удаленной силы



Сосредоточенная масса – команда предназначена для приложения сосредоточенной массы или моментов инерции к граням или ребрам трехмерной модели (Рис. 3.17).

В поле *Масса* вводится значение массы. В полях *Момент инерции X*, *Момент инерции Y*, *Момент инерции Z* вводятся относительно соответствующих осей значения моментов инерции.

Для задания нагрузки необходимо указать грани или ребра, к которым будет приложена сосредоточенная масса или момент инерции.

В полях *Координата X*, *Координата Y*, *Координата Z* вводятся координаты сосредоточенной массы или момента инерции. Также точку можно задать по выбранной грани или ребру. Для этого необходимо выбрать опцию *Указать положение* и щёлкнуть по грани или ребру. Положение точки определится автоматически, исходя из геометрического центра выбранного объекта.

В выпадающем списке *Характер приложения* указывается, соответственно, характер приложения: *деформируемый* или *жесткий*.

Сосредоточенная масса учитывается только в расчете собственных частот!

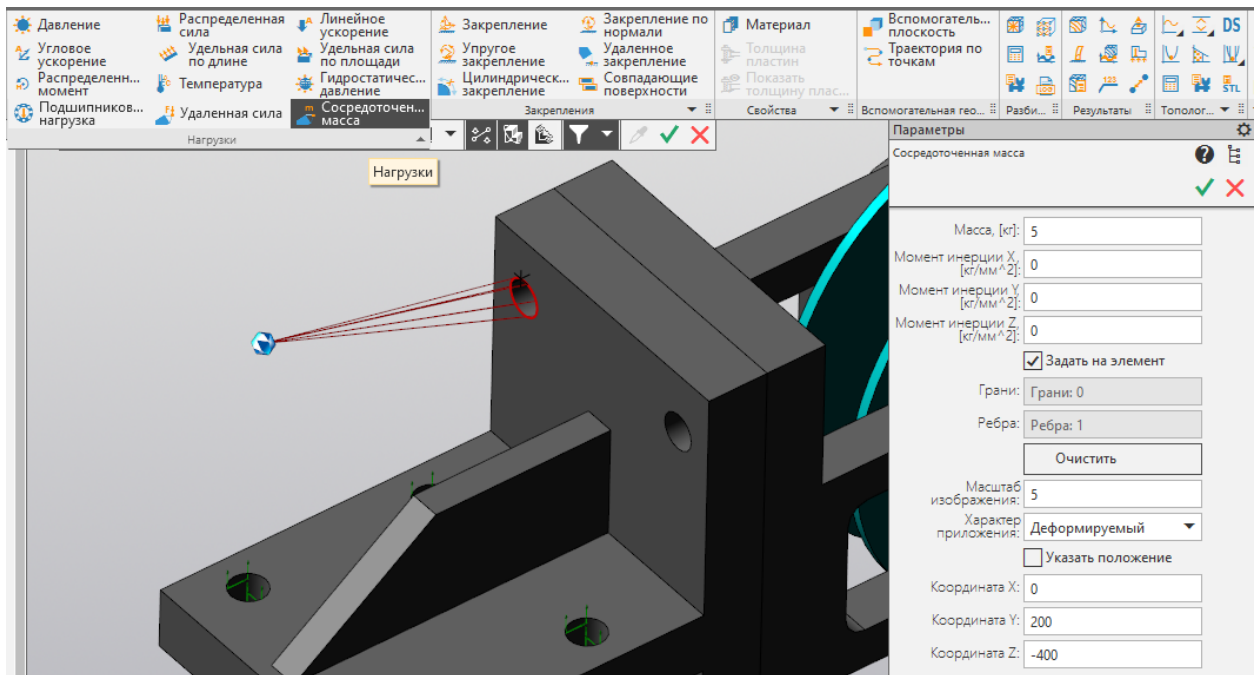


Рис. 3.17. Задание сосредоточенной массы



Закрепление – команда предназначена для установки закрепления к ребру или к поверхности трехмерной модели (Рис. 3.18).

Для создания закрепления необходимо указать ребра или поверхности, на которые будут установлены закрепления. Соответствующими опциями осуществляется ограничение (фиксация) степеней свободы: перемещения для объемных и поверхностных тел или вращения для поверхностных тел относительно осей ГСК.

Помимо закрепления данной командой могут быть заданы перемещения (для объемных и поверхностных тел) и углы поворота (только для поверхностных тел). Для этого в полях *по X*, *по Y*, *по Z* указываются значения перемещений, а в полях *вокруг X*, *вокруг Y*, *вокруг Z* указываются значения углов поворота. При этом в дерево прочностного анализа помимо *Закрепления* будет добавлен под выбранным загрузением дополнительный узел *Перемещение* (Рис. 3.19).

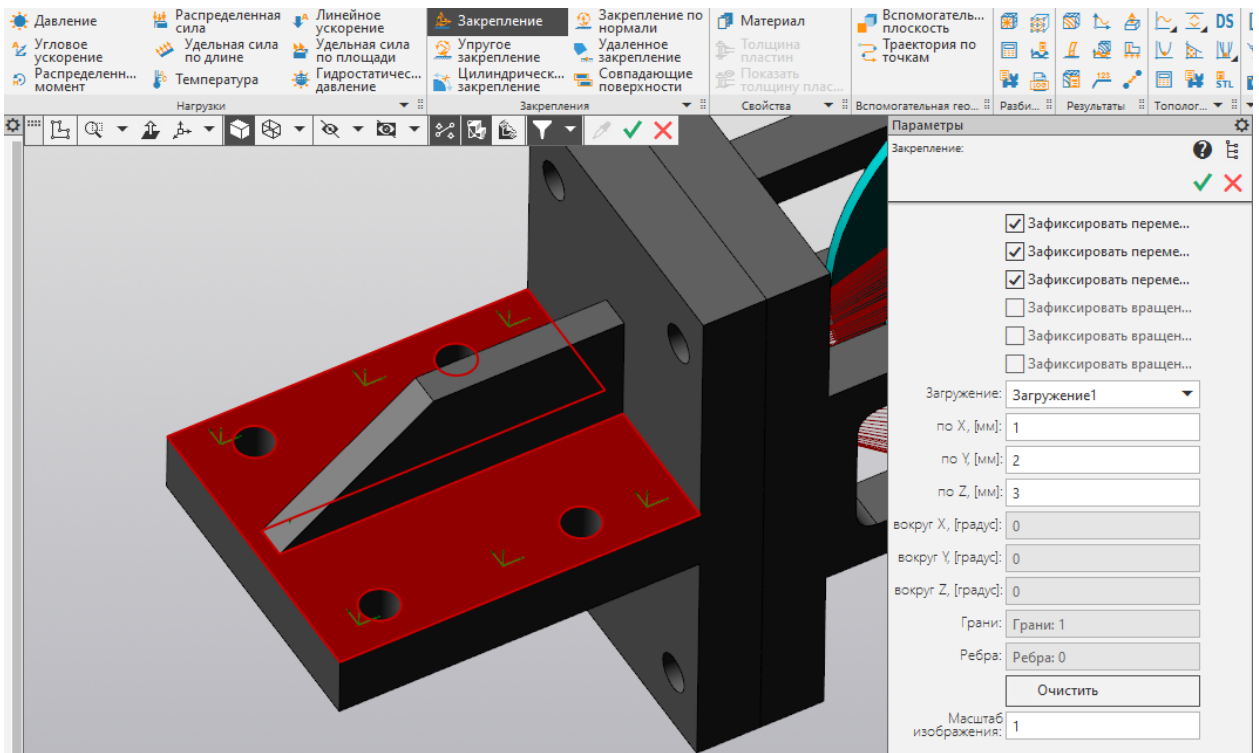


Рис. 3.18. Задание закреплений и перемещений

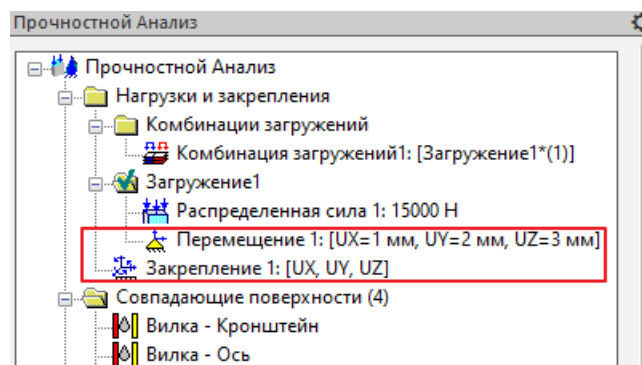


Рис. 3.19. Узлы закрепления и перемещения в дереве



Закрепление по нормали – команда предназначена для создания закрепления по нормали к поверхностям трехмерной модели (Рис. 3.20).

Для создания закрепления необходимо выбрать поверхности, на которые будут установлены закрепления. Перемещения по нормали к этим поверхностям будут запрещены.

В поле *Загрузка* выбирается загрузка, в которое будет добавлено закрепление.

Помимо закрепления данной командой могут быть заданы перемещения. Для этого в поле *Перемещение* вводится значение смещения. При этом в дерево прочностного анализа помимо *Закрепления по нормали* будет добавлен дополнительный узел *Перемещение* (Рис. 3.21). В данном случае *Перемещение* зависит от *Закрепления по нормали*, поэтому, если удалить *Закрепление по нормали*, то автоматически удалится и перемещение.

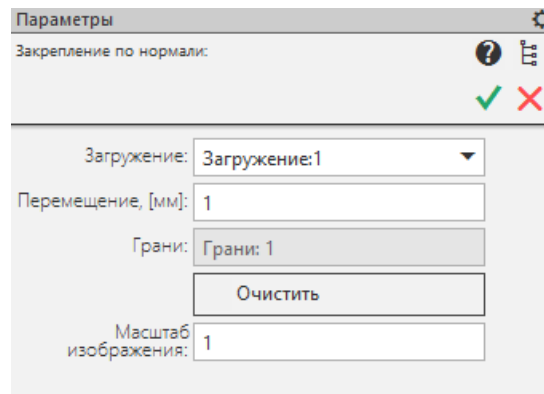


Рис. 3.20. Задание закрепления и перемещения по нормали

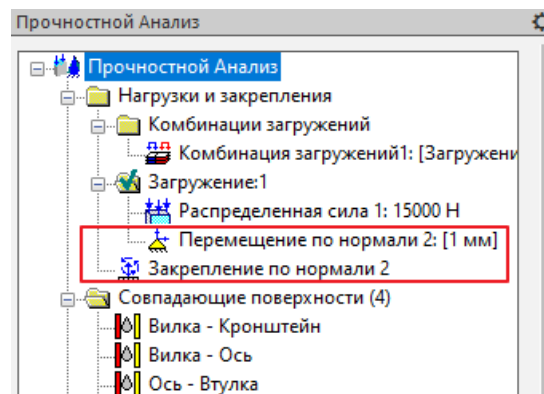


Рис. 3.21. Узлы закрепления и перемещения по нормали в дереве

Если на грань уже задано упругое закрепление, то задать на эту же грань закрепление по нормали нельзя, о чем будет выдано соответствующее сообщение Рис. 3.22).

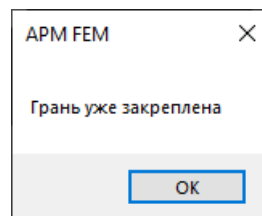


Рис. 3.22. Сообщение об ошибке выбора поверхности закрепления

Упругое закрепление – команда предназначена для установки упругого закрепления к поверхностям трехмерной модели (Рис. 3.23). Для его задания необходимо выбрать грань, а также ввести значение удельной жесткости (жесткости, отнесенной к площади грани, на которую она задается) в соответствующем поле *Удельная жесткость*.

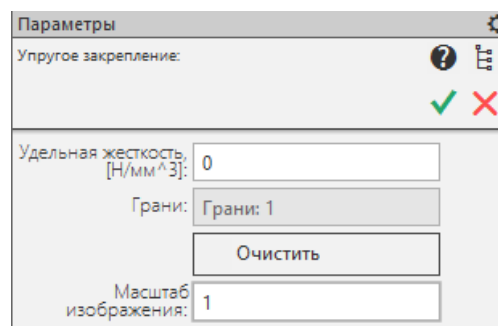



Рис. 3.23. Задание упругого закрепления

Упругое закрепление действует по нормали к поверхности, поэтому его задание на грань включает задание закрепления по нормали на ту же грань. Если на грань уже задано закрепление по нормали, то задать на эту же грань упругое закрепление нельзя, о чем будет выдано соответствующее предупреждение (Рис. 3.22).

 **Удаленное закрепление** – команда предназначена для установки удалённого закрепление к ребру или к поверхности трехмерной модели (Рис. 3.24).

Для создания удаленного закрепления необходимо указать ребра или поверхности, на которые будут установлены закрепления. Соответствующими опциями (*Зафиксировать...*) осуществляется ограничение (фиксация) степеней свободы: перемещения для объемных и поверхностных тел или вращения для поверхностных тел относительно осей ГСК.

При выбранной опции *Задать на элемент* выбираются грани или ребра, к которым должно быть приложено закрепление. При выбранной опции *Указать положение* указывается точка закрепления, или вручную по координатам, значение которых вводится в полях *Координата X*, *Координата Y*, *Координата Z*, или с привязкой к ребру или грани. Для варианта с привязкой первым щелчком левой кнопки мыши выбирается грань или ребро, вторым – создается соединение, при этом точкой привязки является геометрический центр выбранного ребра или грани.

Характер приложения (деформируемый или жесткий) можно указать в соответствующем выпадающем списке.

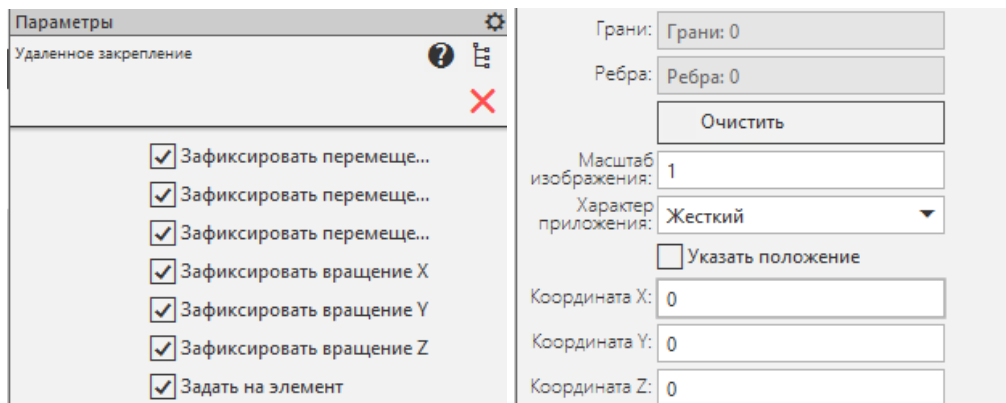



Рис. 3.24. Задание удаленного закрепления

 **Цилиндрическое закрепление** – команда предназначена для создания закрепления к цилиндрическим граням (Рис. 3.25). Применяется только к цилиндрическим граням оболочечных и твердотельных моделей.

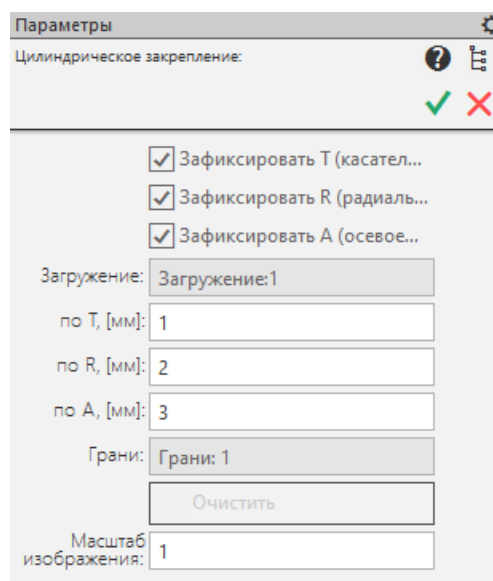


Рис. 3.25. Задание цилиндрического закрепления и перемещения

Соответствующими флажками можно зафиксировать касательное T (Tangent), радиальное R (Radial) и осевое A (Axial) перемещения. В выпадающем списке *Загружение* выбирается нагружение, в которое будет добавлено закрепление.

Помимо закрепления данной командой могут быть заданы перемещения. Для этого в соответствующих полях *по T*, *по R*, *по A* вводятся значения смещений. При этом в дерево прочностного анализа помимо цилиндрического закрепления будет добавлен под выбранным нагружением дополнительный узел *Перемещение* (Рис. 3.26). В данном случае *Перемещение* зависит от *Цилиндрического закрепления*, поэтому, если удалить *Цилиндрическое закрепление*, то автоматически удалится и перемещение.

В поле *Грани* отображаются выбранные грани, к которым будет приложено закрепление.

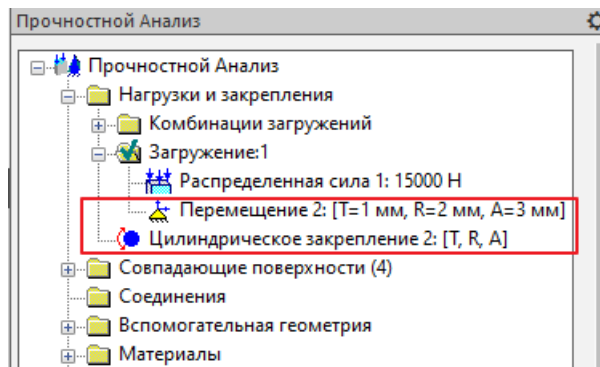


Рис. 3.26. Узлы цилиндрического закрепления и перемещения по нормали в дереве



Совпадающие поверхности – команда осуществляет автоматический поиск или ручное задание совпадающих граней (контактов) соприкасающихся деталей в сборке.

Нажатие кнопки «Автопоиск» в окне «Совпадающие поверхности» запускает автоматический поиск совпадающих поверхностей (Рис. 3.27). После автоматического поиска все найденные совпадающие грани будут размещены в дереве прочностного анализа.

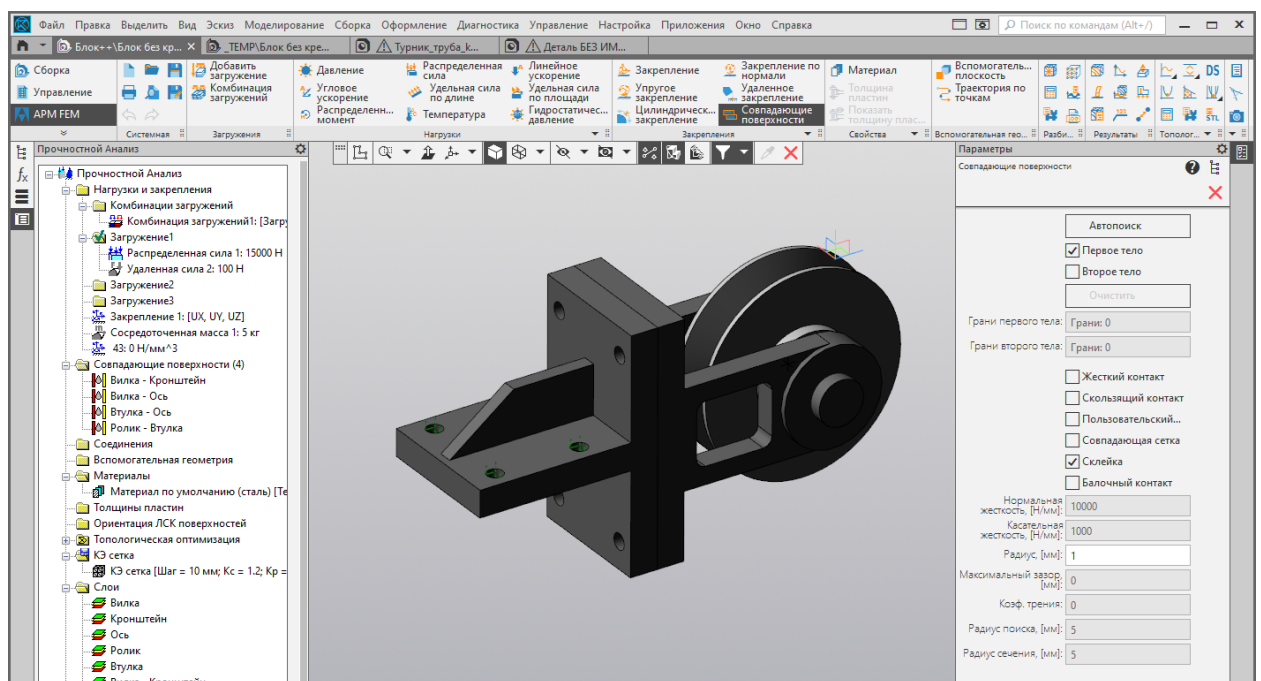


Рис. 3.27. Параметры команды *Совпадающие поверхности*

При ручном задании совпадающих поверхностей необходимо указать сначала первое тело, выделив его в сборке, при этом остальные тела станут прозрачными (Рис. 3.28). На этом теле указываются те грани, которые будут находиться в контакте с другими телами.

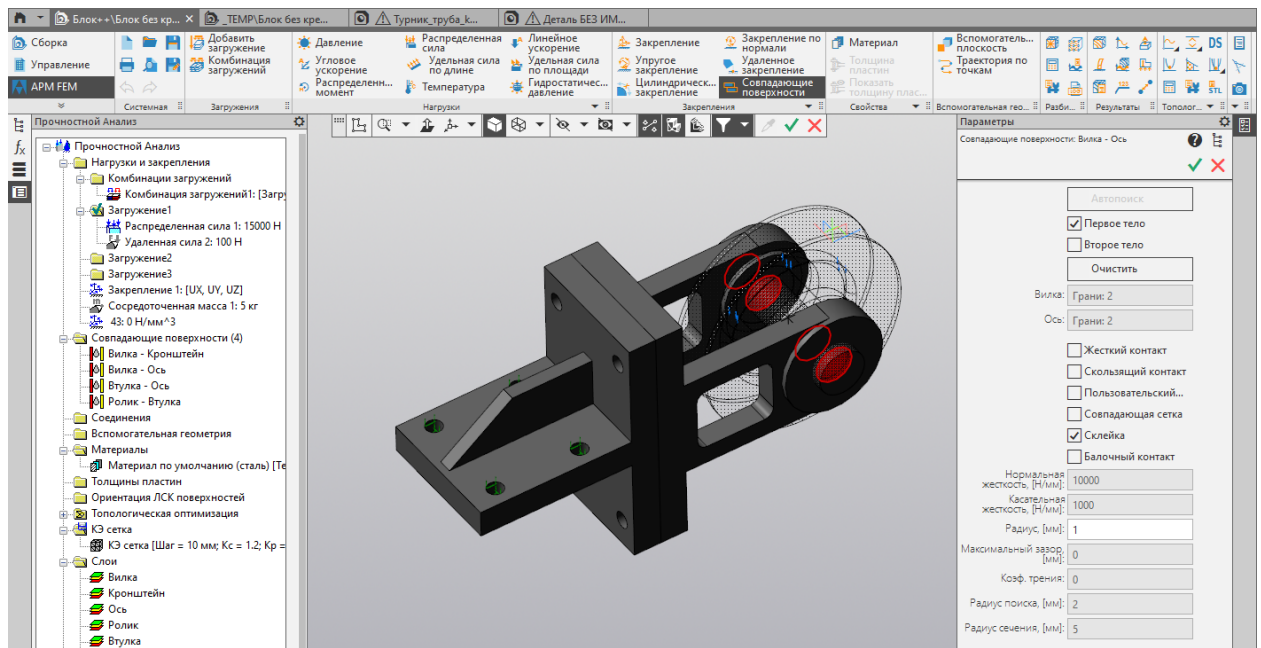


Рис. 3.28. Задание совпадающих поверхностей первого тела

Нажатием кнопки *Очистить* для выбранного тела выбор этого тела будет отменен, и выделение выбранных ранее граней этого тела снимется.

Аналогичным образом выбирается второе тело и указываются на нем те грани, которые будут в контакте с первым телом (Рис. 3.29).

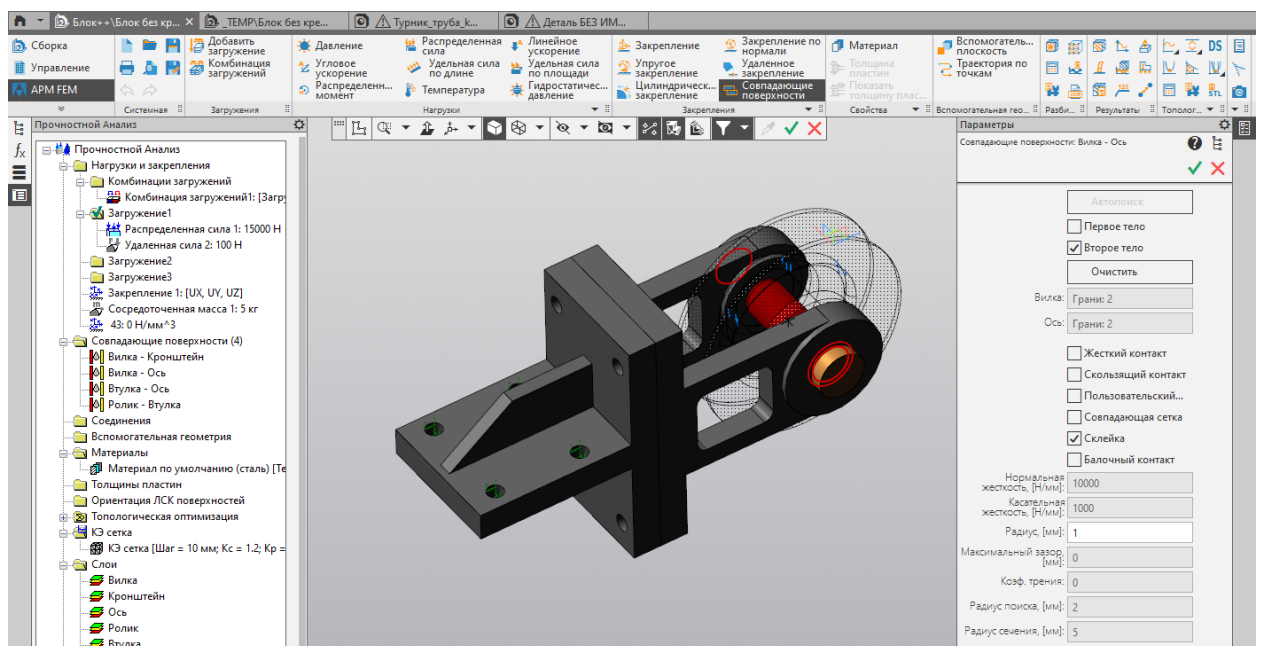


Рис. 3.29. Задание совпадающих поверхностей второго тела

Если выбраны только тела (без указания граней), то при нажатии кнопки *Автопоиск* будет осуществляться поиск совпадающих граней только среди выбранных тел.

Далее, необходимо выбрать/уточнить тип контакта (Рис. 3.30).

<input type="checkbox"/>	Жесткий контакт
<input type="checkbox"/>	Скользкий контакт
<input type="checkbox"/>	Пользовательский...
<input type="checkbox"/>	Совпадающая сетка
<input checked="" type="checkbox"/>	Склейка
<input type="checkbox"/>	Балочный контакт
Нормальная жесткость, [Н/мм]:	10000
Касательная жесткость, [Н/мм]:	1000
Радиус, [мм]:	1
Макс. возможное проникновение, [мм]:	0
Козф. трения:	0
Радиус поиска, [мм]:	5
Радиус сечения, [мм]:	5

Рис. 3.30. Выбор типа контакта

Типы контактов.

Жесткий – смещения деталей в контактной зоне друг относительно друга вызывает деформации контактирующих деталей. Определяется нормальной и тангенциальной жесткостями. При расчете жесткости определяются автоматически через жесткости контактирующих элементов.

Скользкий – допускает возможность перемещения одной детали относительно другой в зоне контакта в касательной плоскости. Определяется нормальной жесткостью, которая определяется автоматически через жесткости контактирующих элементов.

Пользовательский – определяется нормальной и тангенциальной жесткостями, которые задаются вручную.

Совпадающая сетка – в контактной зоне на контактных деталях строится совпадающая сетка, при этом детали работают как единое целое. Контактная зона «Совпадающая сетка» накладывает более жесткие ограничения на точность расположения деталей друг относительно друга (допустимый зазор/проникновение). Параметр *Радиус* рекомендуется выставлять значительно меньше размеров минимальных ребер в зоне контакта.

Склейка – тип аналогичный жесткому контакту. Имеет на несколько порядков большую жесткость и, в отличие от жесткого контакта, в нелинейных расчетах обеспечивает связь деталей независимо от того, есть между ними реальный контакт или нет.

Балочный контакт – каждый узел контактной зоны свяжется с узлами целевой зоны, находящимися на расстоянии не более параметра *Радиус поиска* через стержневой элемент (Рис. 3.31). Радиус сечения стержневого элемента задается параметром *Радиус сечения*. Рекомендуется использовать этот тип контактной зоны, если другие типы использовать не представляется возможным. Например, когда детали находятся на существенном расстоянии друг от друга.

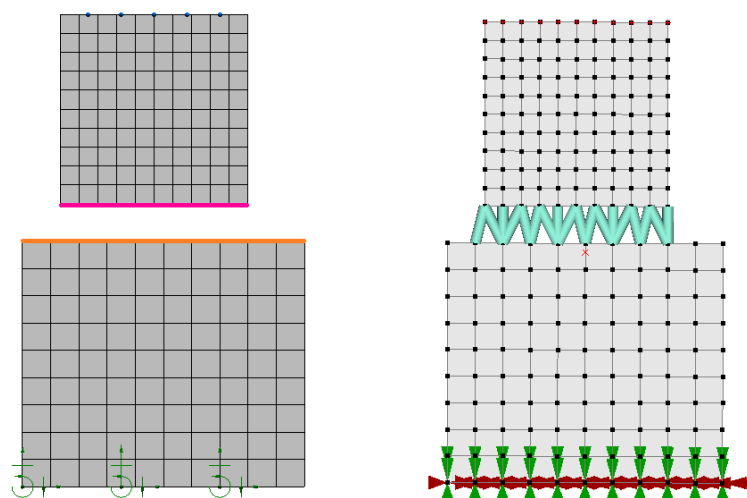


Рис. 3.31. Пример расчетной модели при использовании балочного контакта (исходная модель с наложенной сеткой слева, расчетная КЭ модель справа)


Параметры контактов.

Радиус – участвует в автоматическом поиске контактных граней. Между гранями, находящимися на расстоянии меньшем заданного радиуса, при автоматическом поиске создаются контактные зоны. Кроме того, этот параметр используется при создании контактных элементов для связывания деталей в сборке. Если расстояние между контактным узлом и целевой площадкой из одной зоны меньше данного параметра, то контактный элемент не создается. Такой алгоритм используется в анализах, не связанных с контактной задачей, например в статике, где контактные зоны используются для связывания деталей в сборке, или для типа «склейка».

Нормальная и Касательная жесткости – жесткостные характеристики фиктивных элементов, связывающих контактирующие детали. Предпочтительно выбирать жесткость, близкую по величине к жесткости поверхностного слоя контактирующих деталей.

Максимально возможное проникновение – параметр точности, указывающий максимальный зазор, при котором считается, что детали находятся в контакте. Этот параметр актуален при расчетах, включающих учет реального контакта между деталями. Во многих контактных задачах важно, чтобы на первом шаге расчета/в начальный момент времени детали уже находились в контакте. При моделировании часто детали из-за математических погрешностей находятся на некотором, пусть и небольшом расстоянии друг от друга. Этот параметр позволяет устранить указанную проблему. Рекомендуется задавать его не нулевым, например 0.001, в контактных задачах.

Следует отметить, что полноценный расчет задачи контактного взаимодействия (определение зоны контакта, величины проникновения поверхности одной детали в другую и напряжений, возникающих в контакте для каждой из деталей) возможен только в результате специального нелинейного расчета, который может быть проведен только в более «мощном» модуле прочностного расчета *APM Structure3D*, после передачи в него КЭ сетки с нагрузками.

 **Соединения** – команда позволяет задать соединение между деталью и землей или между двумя деталями (Рис. 3.32).

Выбор тел и их граней аналогичен тому, как это реализовано в команде **Совпадающие поверхности**.

В поле *Тип соединения* можно выбрать между какими объектами задаётся соединение:

Тело-Тело – соединение между двумя деталями (сборка);

Тело-Земля – соединение применяется к одной детали.

В полях *Грани первого тела* и *Грани второго тела* отображается количество граней соответствующих деталей.

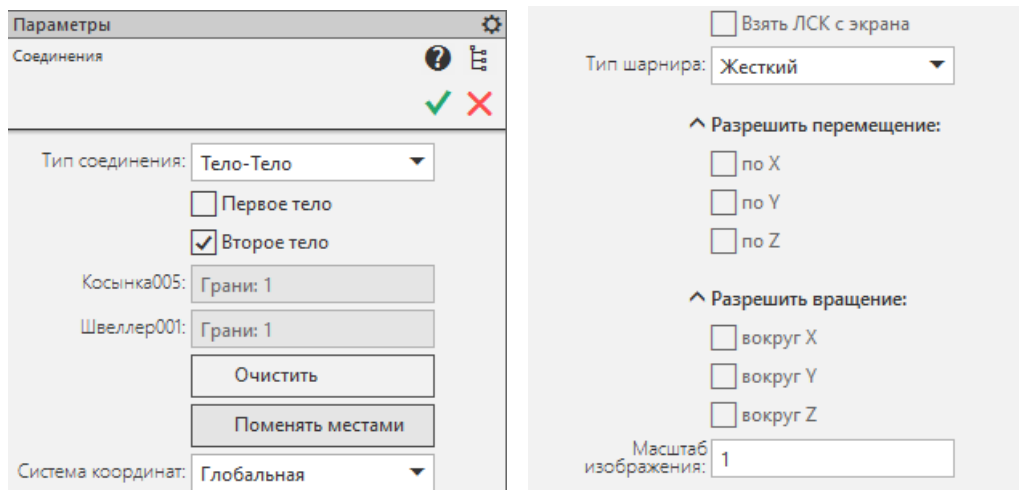


Рис. 3.32. Задание параметров соединения

Кнопкой *Очистить* исключается деталь и все ее грани из списка выбранного тела.

Кнопкой *Поменять местами* первое тело становится вторым, а второе – первым.

В поле *Система координат* из раскрывающего списка можно выбрать, в какой системе координат (СК) будет выполнено соединение.

Глобальная – расчеты будут вестись в глобальной системе координат (ГСК).

Локальная – расчеты будут вестись в локальной системе координат (ЛСК). В случае сборки количество вариантов выбора ЛСК в выпадающем списке будет равно количеству деталей (в скобках выводится название соответствующей детали).

Установив флажок *Взять ЛСК с экрана* можно выбрать ЛСК, щёлкнув по ней левой кнопкой мыши (предварительно необходимо убедиться, что видимость на экране для системы координат в соответствующей панели инструментов фильтров вида КОМПАС'а включена, и соответствующая ЛСК создана). Выбранная ЛСК подсветится зелёным цветом и будет выделена в выпадающем списке (Рис. 3.33).

В поле *Тип шарнира* можно выбрать тип шарнира для соединения: *Жесткий*, *Поворотный Z*, *Поступательный X*, *Пазовый X*, *Цилиндрический Z*, *Универсальный*, *Сферический*, *Плоскостной XY*, *Общий*.

В полях *Разрешить перемещение* и *Разрешить вращение* можно разрешить перемещение и вращение вдоль или вокруг соответствующих осей, если выбран тип шарнира *Общий*. Для остальных типов разрешённые параметры будут выбраны автоматически.

После нажатия кнопки *ОК* созданное соединение будет добавлено в папку *Соединения* в дереве объектов. При щелчке правой кнопкой мыши на папке *Соединения* вызывается контекстное меню (Рис. 3.34), в котором можно скрыть, показать или удалить все соединения. А также, скрыть/показать все специальные элементы (представляют собой уравнения связи/ограничения, которые определяют отношение смещения между соответствующими узлами после их определения).

Контекстное меню и просмотр специальных элементов доступно как при отображении модели, так и при отображении КЭ сетки.

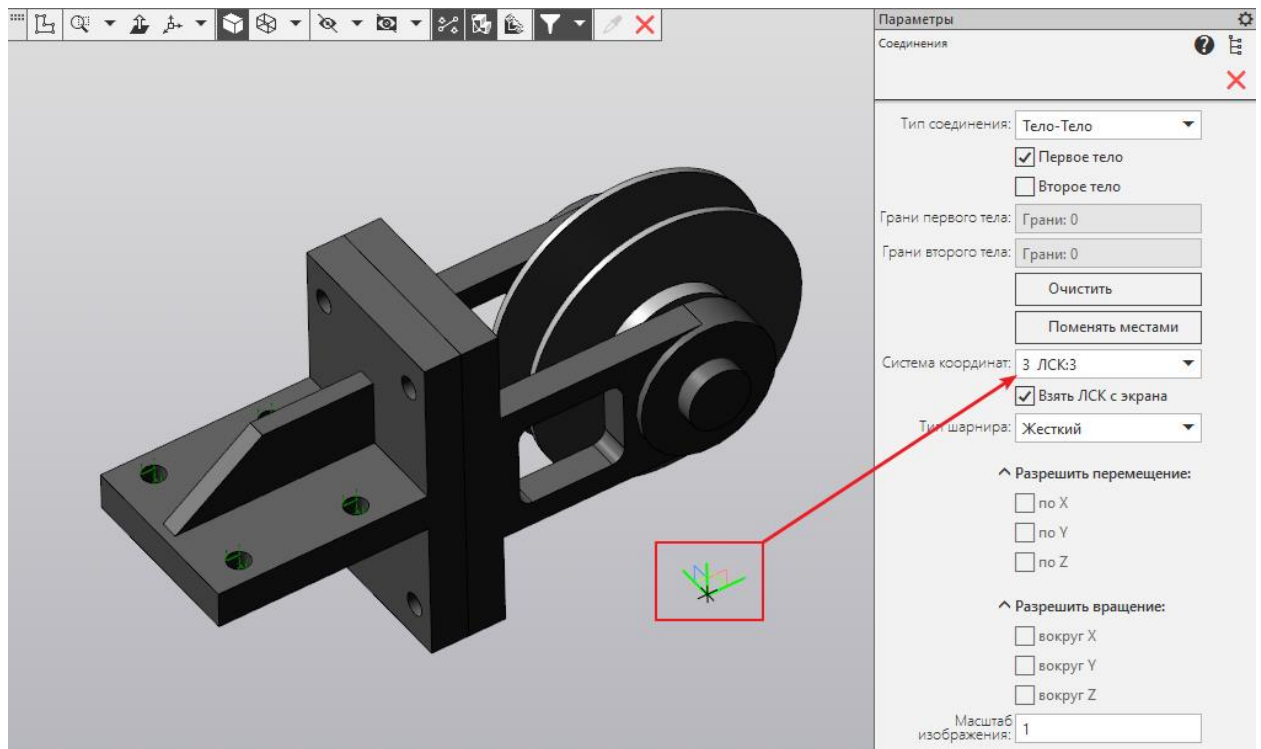


Рис. 3.33. Выбор ЛСК с экрана

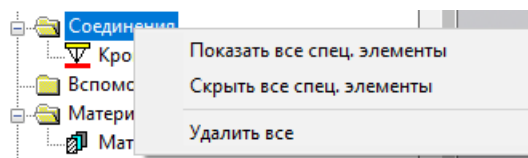


Рис. 3.34. Контекстное меню папки Соединения

3.2 Задание свойств объектов модели

Команды панели **Свойства** предназначены для задания свойств объектам модели.

Материал – команда предназначена для задания элементам модели материала средствами самой библиотеки *APM FEM* (без привлечения инструментария *библиотеки Материалов и Сортаментов*).

Для задания материала необходимо выбрать тела или поверхности (в случае поверхностной модели), которым будет задан материал. После чего выбранное тело или поверхность будут занесены в соответствующий список тел или граней и будут выделены цветом (Рис. 3.35).

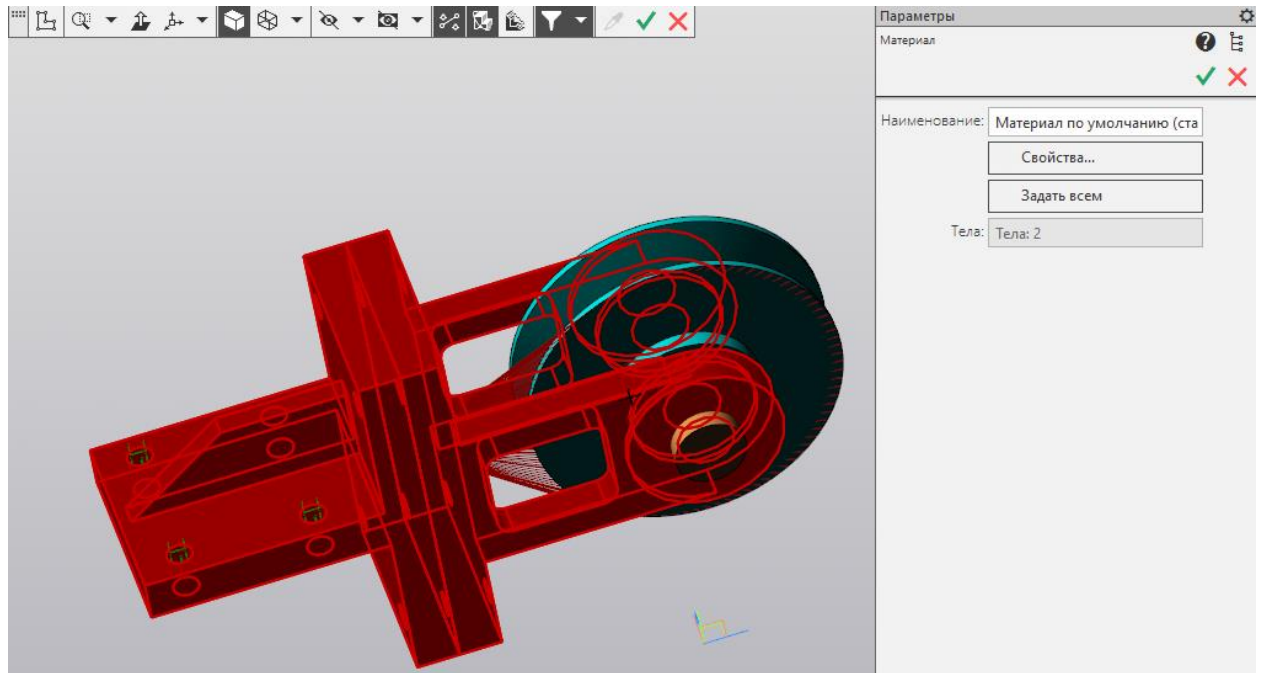


Рис. 3.35. Указание тел, которым будет задан материал

В поле *Наименование* можно задать название материала.

Кнопка *Задать всем* задает материал всем телам или поверхностям одной детали или сборки.

Кнопка *Свойства* вызывает диалоговое окно, в котором можно задать параметры материала (Рис. 3.36). По умолчанию задаются параметры, соответствующие материалу Сталь 3кп (с пределом текучести 235 МПа).

Параметры материала ✕

На основе существующего в модели материала:

Загрузить

Модуль упругости нормальный, [Н/мм ²]	200000
Коэффициент Пуассона, [-]	0.3
Плотность, [кг/мм ³]	7.8000011114
Температурный коэффициент линейного расширения, [1/°C]	1.2e-05
Теплопроводность, [Вт/(°C*мм)]	5.5e-05
Предел прочности при сжатии, [Н/мм ²]	410
Предел прочности (Временное сопротивление), [Н/мм ²]	410
Предел текучести, [Н/мм ²]	235
Предел выносливости при растяжении, [Н/мм ²]	209
Предел выносливости при кручении, [Н/мм ²]	139

OK

Отмена

Рис. 3.36. Параметры материала

По кнопке *Загрузить* из модели считываются все заданные средствами КОМПАС материалы. Список названий материалов помещается в выпадающий список *На основе существующего в модели материала* (Рис. 3.37). Выбрав соответствующий материал в списке, его параметры будут перенесены в поля диалогового окна. При необходимости их можно отредактировать.

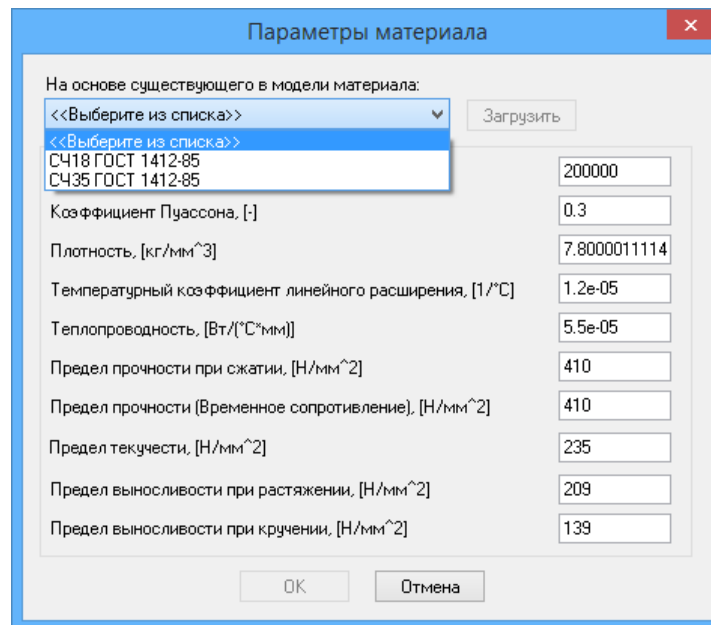


Рис. 3.37. Список загруженных материалов

После нажатия кнопки *ОК* будет создан новый материал с соответствующими параметрами и его название появится в поле *Наименование* (Рис. 3.38).

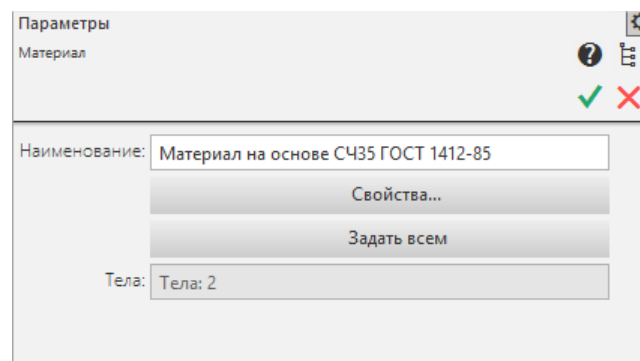


Рис. 3.38. Наименование материала, созданного на основе существующего

Созданный в результате работы команды материал помещается в дерево прочностного анализа (Рис. 3.39).

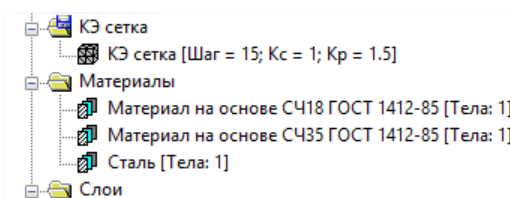



Рис. 3.39. Список материалов в дереве прочностного анализа

 **Толщина пластин** – команда предназначена для задания поверхностям параметра *Толщина*. Команда доступна только для поверхностной модели.

Для задания толщины необходимо выбрать соответствующую поверхность (грань), которая будет занесена в список граней и выделена цветом (Рис. 3.40), ввести значение толщины в поле *Толщина пластин* и подтвердить действие.

Кнопкой *Задать всем* выбираются все грани всех тел.

При отмеченной опции *Выбрать грань* будут выбираться отдельные указанные грани, а при варианте *Выбрать тело* – все грани указанного тела.

В поле *Грани* отображается количество выбранных граней.

Опцией *Привязка пластины* включается возможность изменения плоскости привязки пластины. По умолчанию плоскость привязки расположена посередине, но из раскрывающегося списка можно выбрать также другие варианты: *Сверху +Z(ЛСК)*, *Снизу -Z(ЛСК)*, *Задана пользователем*. При выборе варианта *Задана пользователем* становится доступно поле *Смещение по оси Z(ЛСК)*, где вводится значение смещения по оси Z локальной системы координат (ЛСК) соответствующей грани.

Заданная толщина будет учитываться при последующем КЭ анализе.

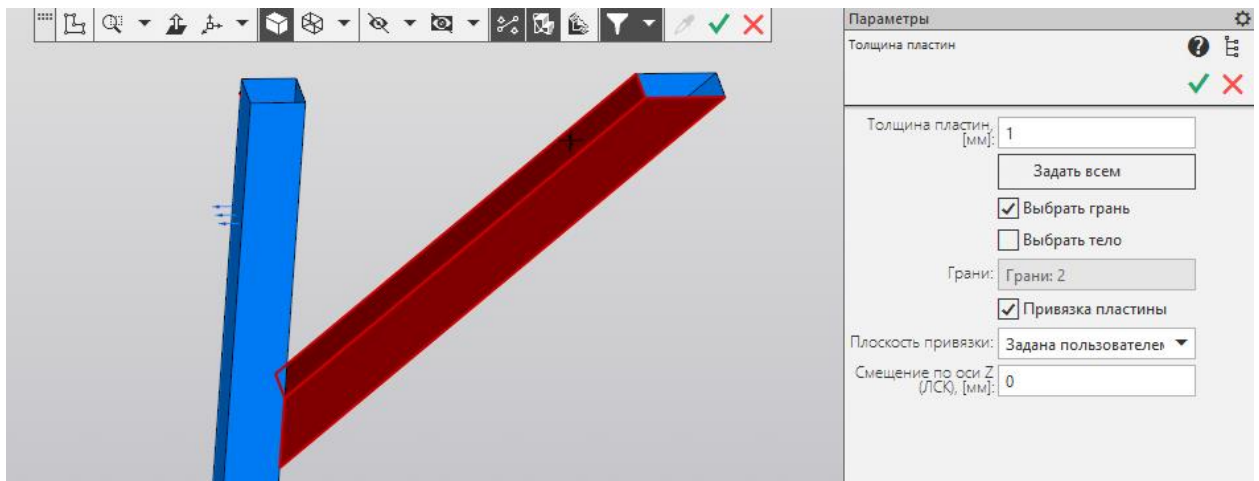


Рис. 3.40. Указание поверхностей, которым будет задана толщина

Показать толщину пластин – команда предназначена для визуального просмотра заданной поверхностям толщины. Команда доступна только для поверхностной модели. После вызова команды модель будет перекрашена в цвета, соответствующие заданным толщинам пластин (Рис. 3.41). По цветовой шкале можно определить конкретное значение толщины.

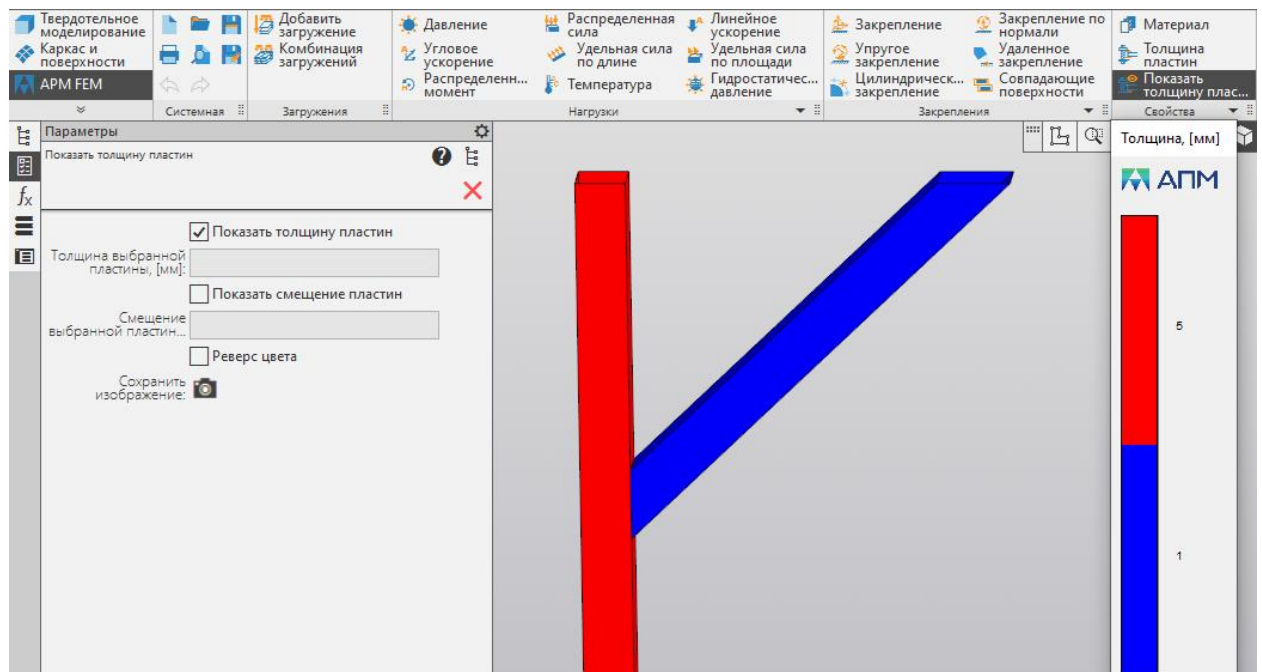


Рис. 3.41. Отображение толщин пластин

При выборе мышью поверхности на экране, её толщина будет отображаться в поле *Толщина выбранной пластины*, а при отмеченной опции *Показать смещение* в поле *Смещение выбранной пластины* будет отображаться смещение плоскости привязки пластины.

Параметр *Реверс цвета* меняет цвета местами.

Команда *Сохранить изображение* аналогична соответствующей команде, расположенной в группе *Настройки* ленты команд.



Ориентация ЛСК поверхностей – команда позволяет менять положение локальной системы координат (ЛСК) пластин. Работает для пластинчатых моделей.

Ориентировать ось.

В полях *Ось X*, *Ось Y*, *Ось Z*, соответственно, отмечается та ось поверхности, которую необходимо ориентировать (Рис. 3.42). Отмеченное свойство *Указать грань* означает, что программа находится в режиме выбора граней, количество которых отображается в поле *Грани*.

Направляющий объект.

Отмеченное свойство *Указать положение* означает, что программа находится в режиме указания направляющего объекта. Для выбора *способа задания ЛСК* необходимо отметить соответствующие свойства *По точке* или *По направлению*. В случае *По точке* можно указать точку в поле модели или ввести её координаты в полях *Координата X*, *Координата Y*, *Координата Z*. В случае *По направлению* указывается ребро или две точки, соответствующее нужному направлению.

При необходимости сменить направление на противоположное отмечается свойство *Инвертировать вектор*.

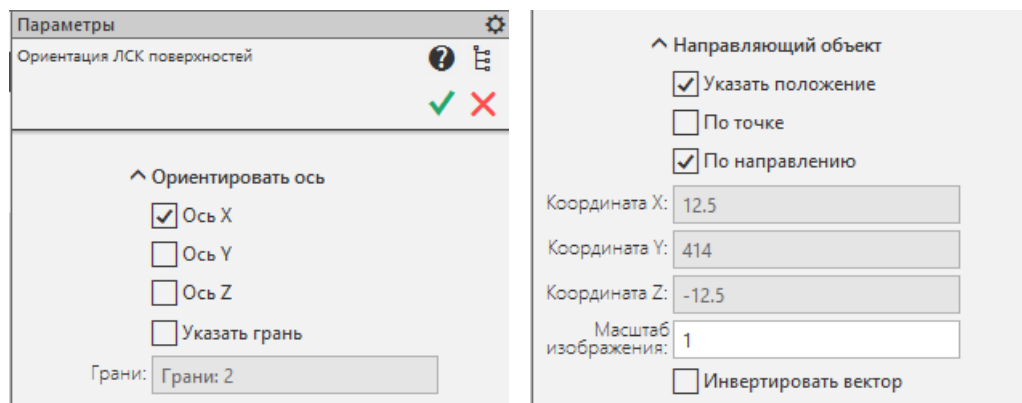


Рис. 3.42. Ориентация ЛСК поверхностей

3.3 Работа с деревом прочностного анализа

Дерево модели **Прочностной анализ** является отдельной вкладкой и содержит следующие группы объектов: *Нагрузки и крепления*, *Совпадающие поверхности*, *Соединения*, *Вспомогательная геометрия*, *Материалы*, *Толщины пластин*, *Ориентация ЛСК поверхностей*, *Топологическая оптимизация*, *КЭ сетка*, *Слои*, *Карты результатов* и *Эпюры по траектории*.

Для работы с группами (Рис. 3.43) и объектами (Рис. 3.44) дерева модели используются контекстные меню. Команды контекстного меню группы применимы ко всем объектам группы.

Команды контекстного меню для работы с группой объектов.

Скрыть все – команда скрывает отображение всех объектов группы на 3D модели.

Показать все – команда включает отображение всех объектов группы на 3D модели.

Исключить из расчета все – команда исключает все объекты группы из расчета.

Включить в расчет все – команда включает все объекты группы в расчет.

Удалить все – команда удаляет все объекты группы.

Команды контекстного меню для работы с отдельным объектом.

Скрыть/Показать – команда позволяет включить/выключить отображение объекта на модели.

Исключить из расчета/ Включить в расчет – команда исключает/включает объект из расчета.

Редактировать – команда открывает панель свойств объекта для редактирования параметров выделенного объекта.

Удалить – команда удаляет объект.

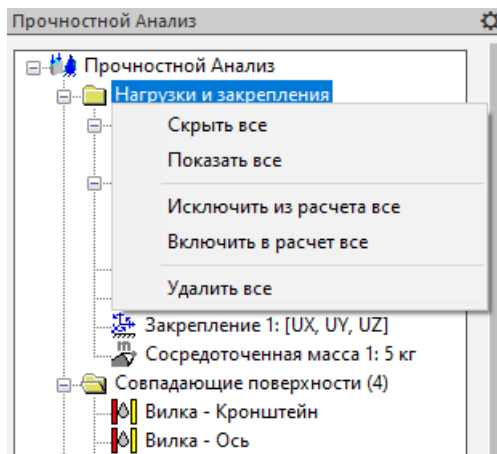


Рис. 3.43. Контекстное меню по работе с группой объектов

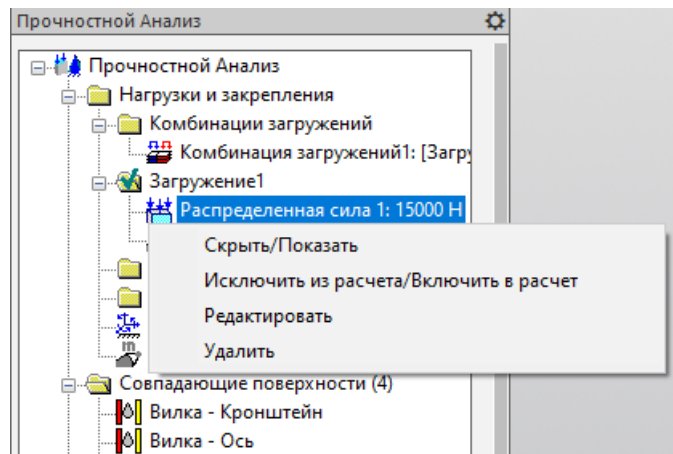


Рис. 3.44. Контекстное меню по работе с отдельными объектами

Для обновления дерева модели используется команда **Обновить все**, доступная из контекстного меню узла *Прочностной Анализ*.

Для объектов дерева доступны следующие горячие клавиши:


Shift + Левая кнопка мыши – выбор подряд нескольких объектов в дереве.

Ctrl + Левая кнопка мыши – выбор объектов в дереве по отдельности.


Del – удаление выбранного объекта.

Двойной клик левой кнопкой мыши – редактирование выбранного объекта.

Проверка на валидность – данный функционал предназначен для проверки на валидность/невалидность объектов в дереве.

Объекты в дереве привязаны к тому или иному элементу модели (узлу, ребру, грани, телу). Когда какой-либо элемент исключается из расчета или делается невидимым средствами *Компаса*, объекты в дереве необходимо проверить на валидность. В случае, когда какой-либо объект в дереве ссылается на несуществующий элемент модели, он становится невалидным. И наоборот, когда какой-либо объект в дереве ссылается на существующий элемент – он является валидным. Проверка на валидность позволяет определить такие элементы и автоматически запускается каждые 10 секунд. Невалидные элементы отображаются в дереве треугольником с восклицательным знаком .

3.4 Генерация КЭ сетки

Генерация конечно-элементной сетки (КЭ сетки) осуществляется с помощью команды  **Генерация КЭ сетки** панели инструментов *Разбиение и расчет*.

APM FEM поддерживает совместную работу с объемными (твердотельными) и поверхностными (пластинчатыми) телами, и, соответственно, генерацию сетки на такие модели. Параметры объемной и поверхностной сеток задаются в полях соответствующих групп элементов (Рис. 3.45).

Максимальная длина стороны элемента – максимально допустимая длина стороны конечного элемента на поверхности (для твердотельного разбиения – на оболочке). Значение максимальной длины стороны элемента следует подбирать, исходя из характерных частей конструкции. Для более точного расчёта требуется более «густая» сетка (с меньшей максимальной длиной).

Минимальная длина стороны элемента – минимально допустимая длина стороны конечного элемента на поверхности (для твердотельного разбиения – на оболочке). Рекомендуется выставлять в 5 раз меньше максимальной длины.

Максимальный коэффициент сгущения на поверхности – коэффициент определяет, насколько следующий элемент можно сделать (где необходимо) меньше. Таким образом при переходе к более мелким частям конструкции, генератор КЭ сетки получает право создавать конечный элемент в k раз меньше, по сравнению с предыдущим КЭ. При значении 1 – получаем так называемое «неадаптивное» (равномерное) разбиение. В этом случае элементы конструкции с меньшими, чем заданная максимальная длина размерами будут «проглатываться» или

огрубляться. Задание значения больше 1 ведёт к генерации «адаптивного» разбиения. При этом КЭ сетка будет максимально точно отражать геометрию «узких мест». Обратной стороной точности будет увеличение общего количества КЭ и времени расчета.

Учёт кривизны – опция позволяет автоматически сгущать сетку у криволинейных поверхностей.

Угловой шаг – параметр, определяющий угол между нормальными элементами у криволинейной поверхности. Чем меньше значение, тем более точно будет описывать криволинейные поверхности КЭ сетка, но количество конечных элементов возрастет.

Игнорировать угловой шаг на малых гранях – при включении этой опции на узких и сильно искривленных в «поперечном» направлении поверхностях-скруглениях будет закругляться критерий выбора углового шага. Это может предотвратить чрезмерное сгущение сетки на таких поверхностях.

Объединять близкорасположенные элементы модели – опция позволяет в автоматическом режиме объединять элементы, расположенные на расстоянии, задаваемом в поле *Размер допуска на слияние*. Настройка позволяет игнорировать некоторые ошибки геометрии.

Проверять наличие материала у деталей – при включении этой опции при разбиении на КЭ будет проверяться, присвоен ли материал деталям. В случае, если для детали или каких-то деталей из сборочной единицы материал из библиотеки *Материалов и Сортаментов* или *ПОЛИНОМ:MDM* не задан, то будет выдано соответствующее предупреждение (Рис. 1.6) со списком этих деталей (см. п.1.4).

Обеспечить совместимость порядка КЭ – опция предназначена для приведения порядка КЭ к одному порядку, соответствующему основной сетке. Если, например, КЭ сетка на часть модели создана из элементов второго порядка (10-узловых тетраэдров), а основная сетка – из элементов первого порядка (4-узловых тетраэдров), то после разбиения вся сетка будет состоять из элементов первого порядка (4-узловых тетраэдров).

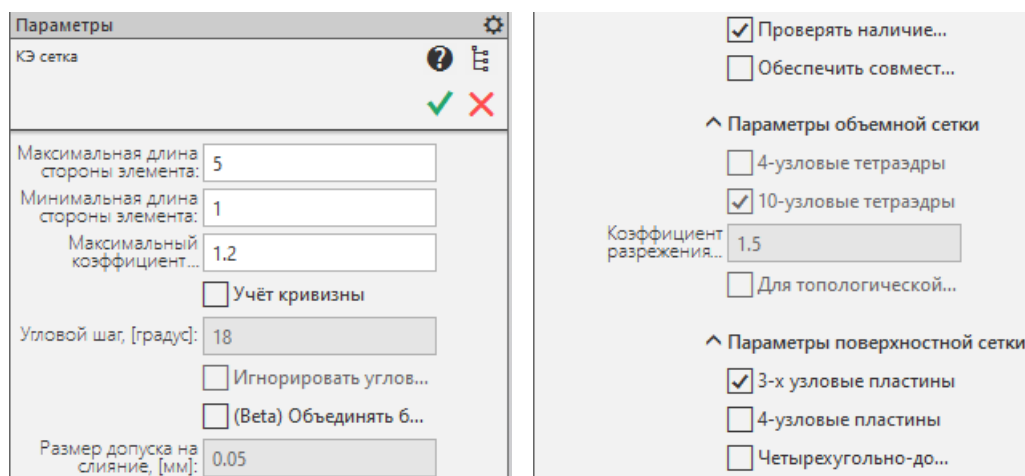


Рис. 3.45. Параметры команды генерации КЭ сетки

Если данная опция отмечена, то перед созданием основной сетки будет выведено диалоговое окно с предупреждением об её автоматической конвертации. При подтверждении сетка будет автоматически преобразована, при отмене – нет, и сетка на всю модель создана не будет. Если опция не отмечена, то программа выведет предупреждение о необходимости конвертации сетки или в ручном режиме или в автоматическом (отметкой опции *Обеспечить совместимость порядка КЭ*).

Параметры объемной сетки.

4- или 10-узловые тетраэдры – опции позволяют выбрать тип конечного элемента для объемного тела. Использование 10-узловых тетраэдров позволяет использовать больший шаг разбиения по сравнению с 4-узловыми, что экономит память и ресурсы компьютера при обеспечении точности расчёта.

Коэффициент разрежения в объеме – коэффициент, позволяющий увеличивать КЭ в глубине тела с целью уменьшения их общего количества и ускорения расчета.

Для топологической оптимизации – при установке этой опции при генерации сетки вглубь объема твердотельной модели размеры КЭ увеличиваться не будут, а останутся примерно одинаковыми. Это необходимо для корректного расчёта топологической оптимизации.

Параметры поверхностной сетки.

3- или 4-узловые пластины – опции позволяют выбрать тип конечного элемента для поверхностного тела. Использование 4-узловых пластин, в виду их большей точности, позволяет делать больший шаг разбиения по сравнению с 3-узловыми, что экономит память и ресурсы компьютера при обеспечении точности расчёта.

Четырёхугольно-доминантная сетка – при выбранной опции сетка будет создаваться из 3- и 4-узловых пластин.

Для контроля качества конечно-элементного разбиения часть сетки может быть скрыта с помощью установки *Глубины просмотра* (Рис. 3.46). По умолчанию, плоскость разреза совпадает с плоскостью вида. Для установки пользовательской плоскости разреза следует повернуть модель так, чтобы планируемая плоскость разреза совпала с плоскостью текущего вида и нажать кнопку «Установить плоскость разреза». Глубина просмотра регулируется с помощью соответствующей полосы прокрутки.

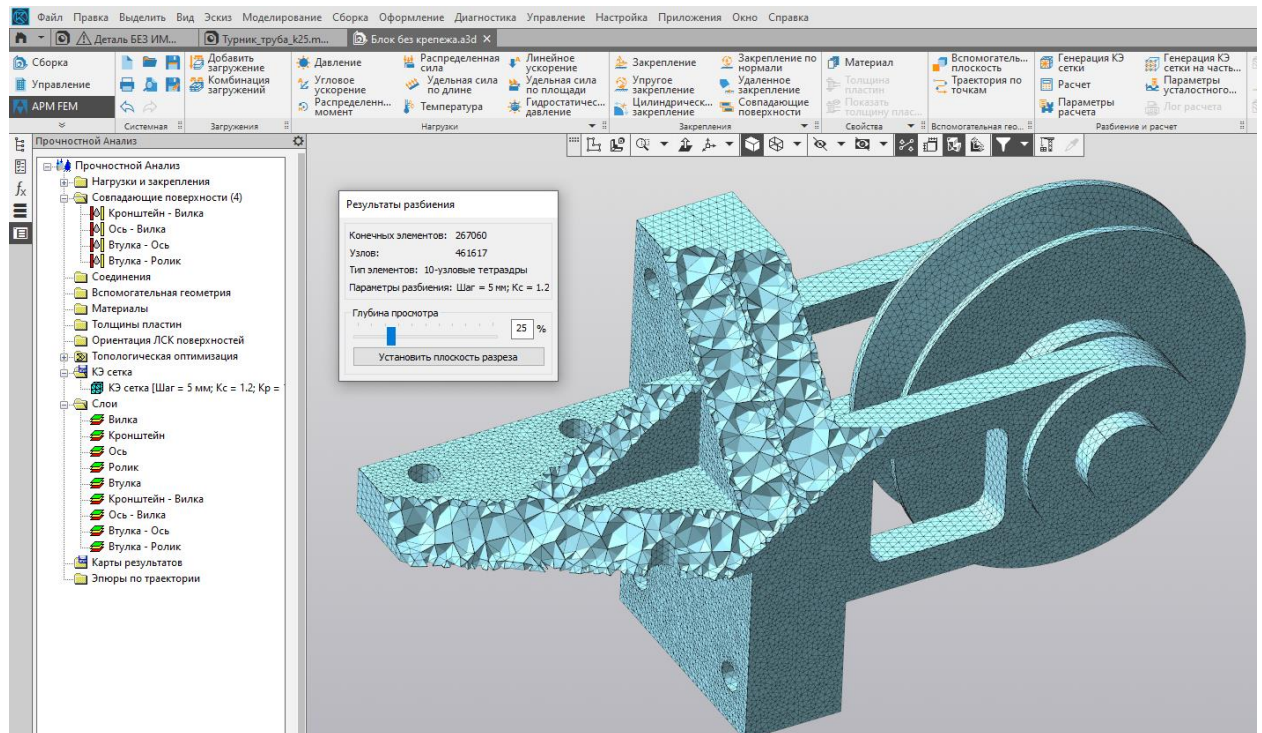


Рис. 3.46. Установка глубины просмотра

Работа со сгенерированной КЭ сеткой предусмотрена через контекстное меню дерева прочностного анализа. Для сохранения КЭ сетки в файл КОМПАС-3D необходимо включить данную опцию в контекстном меню папки *КЭ сетка*. Это может значительно увеличить размер файла, но исключит необходимость повторного разбиения на конечные элементы после открытия файла (Рис. 3.47).

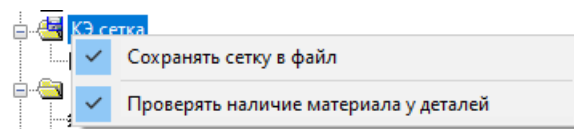


Рис. 3.47. Сохранение КЭ сетки в файл КОМПАС-3D

Кроме того в этом же контекстном меню можно включить/выключить опцию по проверке наличия материала у деталей (см. п.1.4).



Рис. 3.48. Вид иконки группы КЭ сетка в зависимости от опции сохранения

Иконка папки отображает состояние флажка: включено или выключено сохранение (Рис. 3.48).

Если вызвать контекстное меню непосредственно КЭ сетки, то будут доступны команды: *Скрыть/Показать*, *Пересоздать сетку*, *Использовать существующую сетку*, *Удалить*, *Сохранить файл APM Structure3D...* (Рис. 3.49).

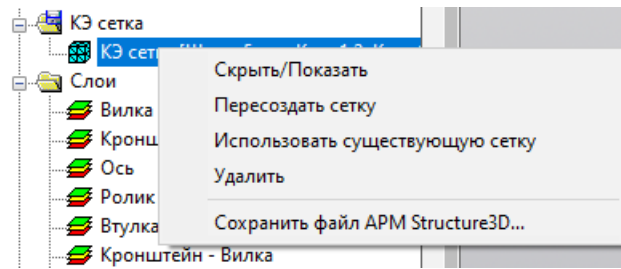


Рис. 3.49. Контекстное меню по работе с КЭ сеткой

Команда *Пересоздать сетку* производит перестроение существующей сетки с параметрами, которые использовались при создании текущей сетки. Эту команду необходимо применять, если изменилась геометрия модели или была загружена модель с выключенной опцией *Сохранять сетку в файл*.

Команда *Использовать существующую сетку* производит переприменение нагрузок к существующей сетке. Эту команду необходимо применять, если изменились нагрузки и/или граничные условия без изменения геометрии модели. При невозможности использования существующей сетки для заданных граничных и начальных условий (или при отсутствии сетки) разбиение на конечные элементы будет выполнено автоматически с параметрами, сохранёнными при создании текущей сетки.

Команда *Удалить* удаляет КЭ сетку из модели.

Командой *Сохранить файл APM Structure3D...* сгенерированная сетка может быть сохранена в файл формата *.frm программы *APM Structure3D*. Сетка может сохраняться без результатов или с результатами после выполнения расчета. Необходимость сохранения может быть обусловлена разными причинами:

- Подготовка КЭ-моделей, состоящих из разных типов конечных элементов, включающих стержневые.
- Редактирование модели средствами *APM Structure3D*. Например, задание узловой нагрузки или закрепления.
- Выполнение расчета, который не предусмотрен в *APM FEM*. Например, расчет на вынужденные колебания.



Генерация КЭ сетки на часть модели – команда позволяет задать сетку на часть модели. Сетку можно создать на отдельном теле или грани. Команда имеет к параметрам, используемым в аналогичной команде *Генерация КЭ сетки*, несколько дополнительных: *Выбрать тела* и *Выбрать грани*, для создания сетки на телах и гранях, соответственно (Рис. 3.50).

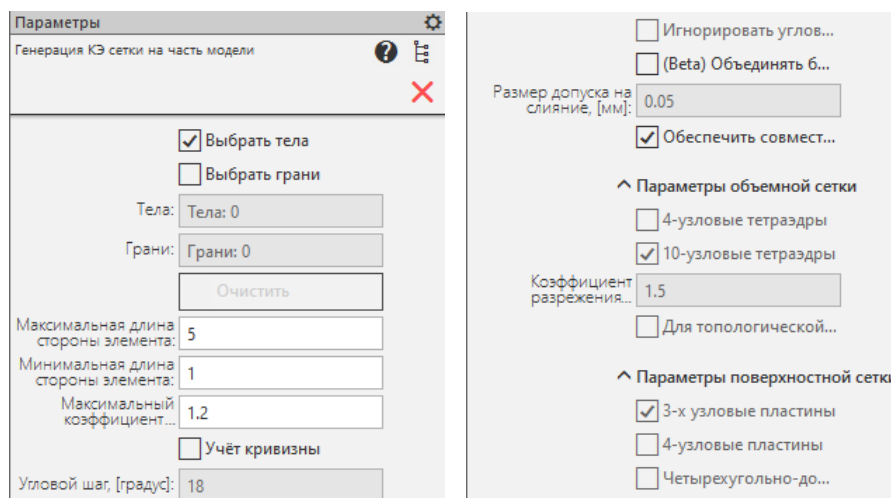


Рис. 3.50. Параметры команды генерации КЭ сетки на часть модели

3.5 Выполнение расчета

Для выполнения расчета служит команда **Расчет** панели инструментов *Разбиение и расчет*. Перед выполнением расчета следует обратить внимание на параметры расчета.

После вызова команды на экране появляется диалоговое окно (Рис. 3.51), в котором выбирается тип расчета. В этом окне можно также выбрать загрузку, для которого будет выполнен расчет.

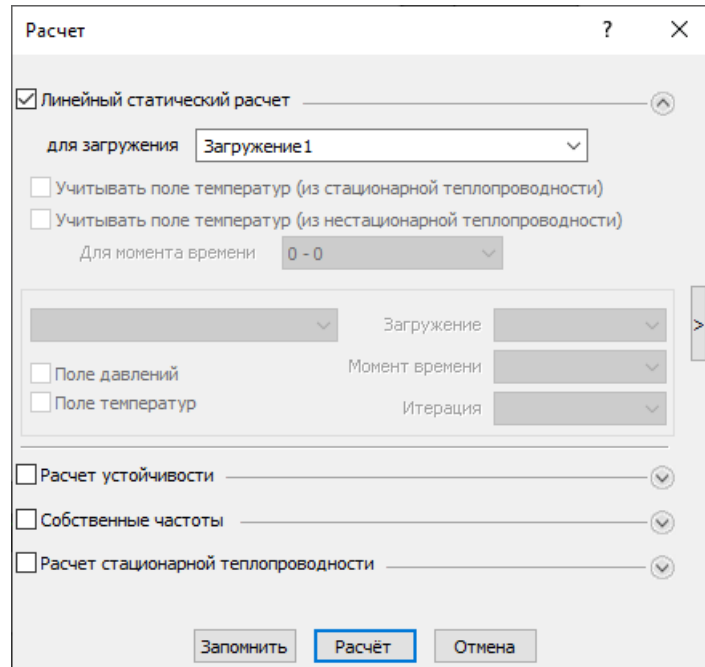


Рис. 3.51. Окно Расчет

При необходимости можно раскрыть правую часть окна для задания настроек текущего расчета (Рис. 3.52).

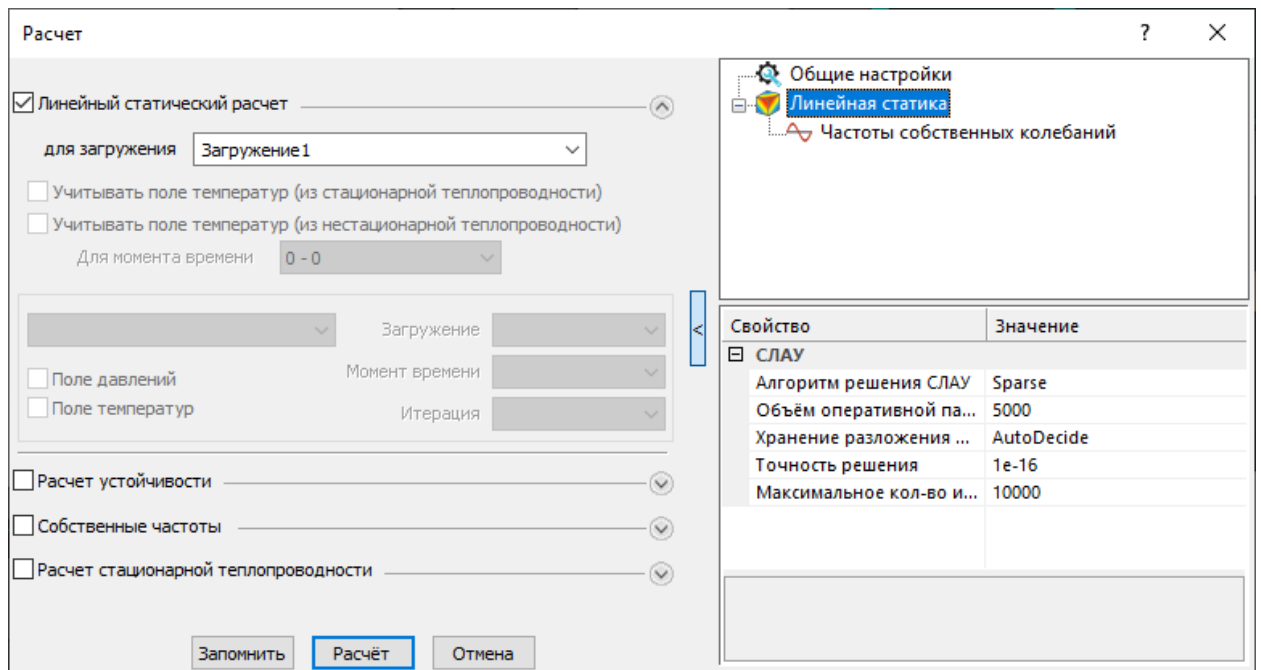



Рис. 3.52. Настройки текущего расчета

3.6 Параметры расчета

 **Параметры расчета** – команда вызывает диалоговое окно с настройками программы и установками для расчетов. Расположена на панели инструментов *Разбиение и расчет*.

Настройки программы – при выборе данного узла можно изменить свойство *Снимать выделение после операции*.

Вкладки узла *Настройки программы* (Рис. 3.53) отвечают за параметры использования многоядерного процессора (доступно, если процессор компьютера является многоядерным), а также за директорию для временных файлов расчета. При работе с большими моделями (или при выполнении некоторых видов расчёта) для выполнения расчета может потребоваться до нескольких десятков гигабайт свободного места. Необходимость изменения директории для временных файлов расчета возникает, если на системном диске (по умолчанию) недостаточно свободного места для выполнения расчета.

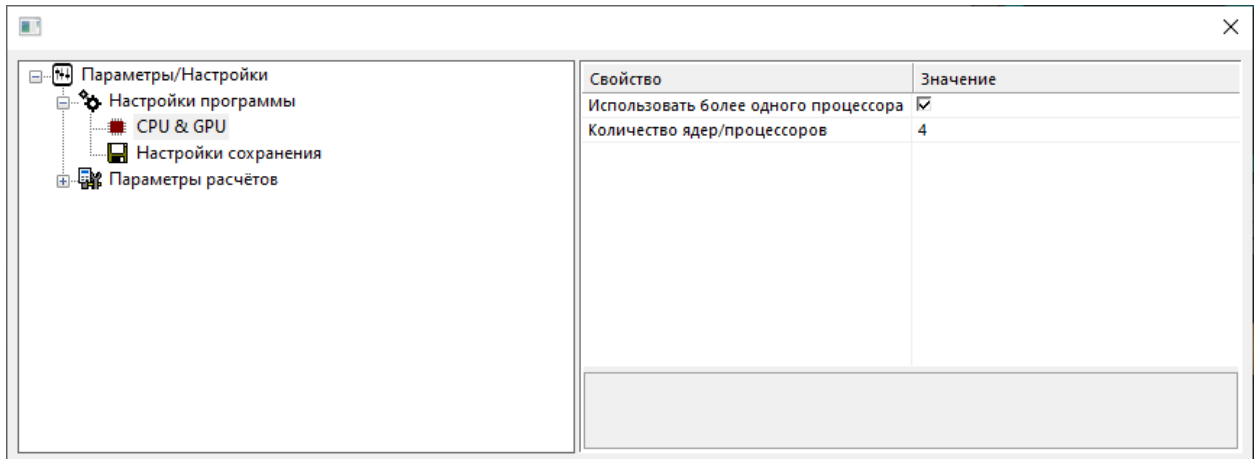


Рис. 3.53. Настройки программы

Параметры расчетов.

Вкладка *Общие настройки*.

Здесь задаются значения ускорения свободного падения (по умолчанию ~ 9810 мм/с²) и температура относительно нуля (по умолчанию 20 °С).

Вкладка *Линейная статика* (Рис. 3.54).

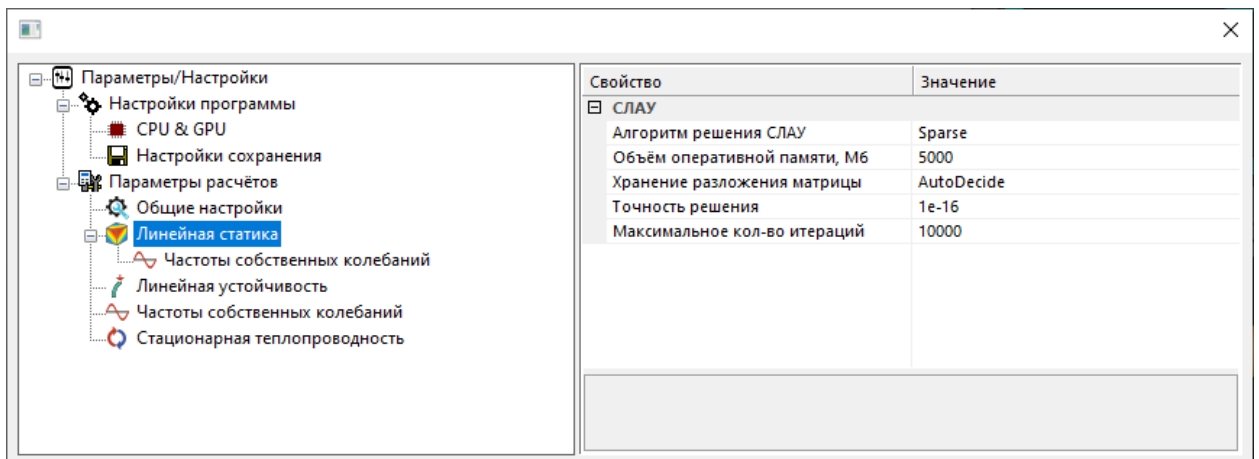


Рис. 3.54. Настройки линейного статического расчета

Поле *Алгоритм решения СЛАУ* позволяет выбрать наиболее подходящий метод решения.

Sparse – улучшенный метод работы с разреженными матрицами, обеспечивающий высокую скорость вычислений. При расчетах методом *Sparse* в матрице жесткости хранятся только ненулевые элементы, а временные файлы размещаются на жестком диске. Предназначен для моделей с большим количеством конечных элементов и с большой полушириной матрицы жесткости. Метод *Sparse* используется по умолчанию.

Вкладка **Линейная устойчивость** (Рис. 3.55).

Для расчёта устойчивости есть возможность выбора метода решения.

ПКД(Sparse) – поиск корней детерминанта, адаптированный для работы с разреженными матрицами.

Метод **Ланцоша** также адаптирован для работы с разреженными матрицами и эффективен для расчета больших моделей. Метод позволяет определить в рамках одного расчета несколько форм потери устойчивости. Кроме того, он позволяет находить собственные значения вблизи заданного (пользователем) значения. Метод также хорошо работает с плохо обусловленными матрицами.

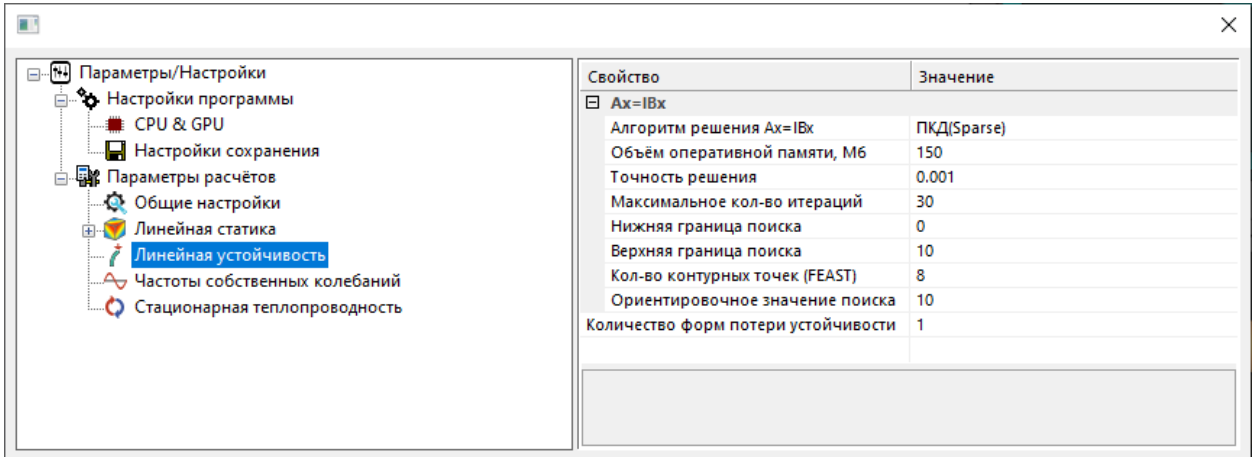


Рис. 3.55. Настройки расчета линейной устойчивости

Метод **FEAST** – набор высокопроизводительных численных процедур для решения стандартных симметричных $Ax = \lambda x$ или обобщённых симметрично-определённых задач $Ax = B\lambda x$ нахождения всех собственных значений λ и собственных векторов x в заданном диапазоне поиска $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$. Решатель основан на инновационном быстром и устойчивом численном алгоритме [E. Polizzi], принципиально отличающимся от традиционных итераций подпространств Крылова (алгоритмы Арнольди и Ланцоша [Z. Bai, J. Demmel, J. Dongarra, A. Ruhe and H. van der Vorst]) или от других подходов Дэвидсона-Якоби [G. L. G. Sleijpen and H. A. van der Vorst].

Метод **FEAST** находит пары собственных решений, используя численно эффективный метод контурного интегрирования (используемый в квантовой механике). При этом основной решаемой задачей является решение нескольких независимых СЛАУ по контуру, и последующее решение сокращённой задачи нахождения собственных значений/векторов.

Вкладка **Частоты собственных колебаний** (Рис. 3.56).

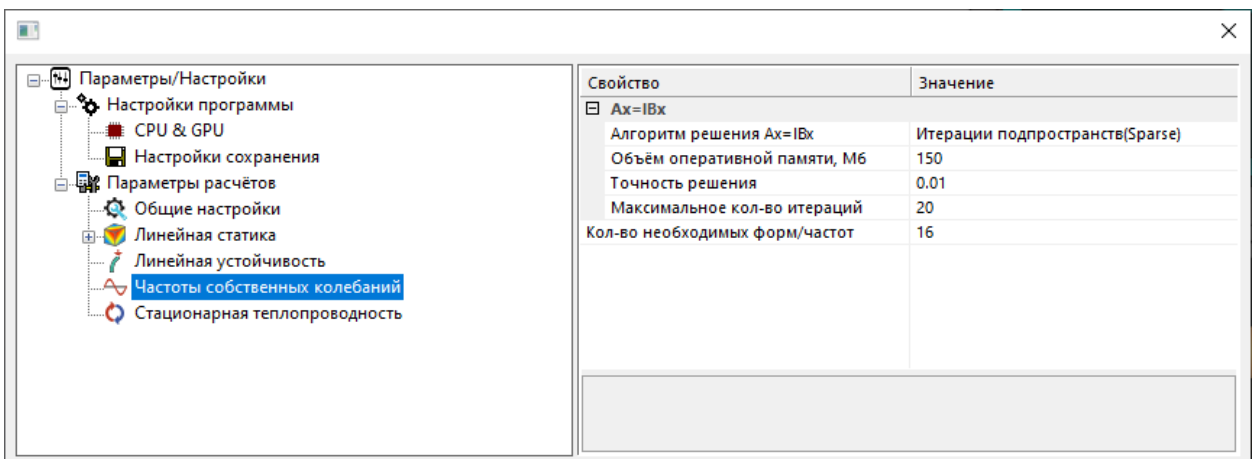


Рис. 3.56. Настройки расчета собственных колебаний

Для расчета больших моделей целесообразно использовать метод **Итерации подпространств (Sparse)**, адаптированный для работы с разреженными матрицами. Этот метод позволяет определить в рамках одного расчета несколько форм собственных частот.

Метод *Итерации подпространств (Sparse) без ортогонализации* – ускоренный метод решения задачи устойчивости по сравнению с методом Итерации подпространств (Sparse)

Метод *Ланцоша* также адаптирован для работы с разреженными матрицами и эффективен для расчета больших моделей. Метод позволяет определить в рамках одного расчета несколько форм потери устойчивости. Метод также хорошо работает с плохо обусловленными матрицами.

Вкладка **Стационарная теплопроводность** (Рис. 3.57).

Для расчетов теплопроводности используется метод *Sparse_LU*. Вводится значение необходимого объема оперативной памяти, а также выбирается метод разложения матрицы.

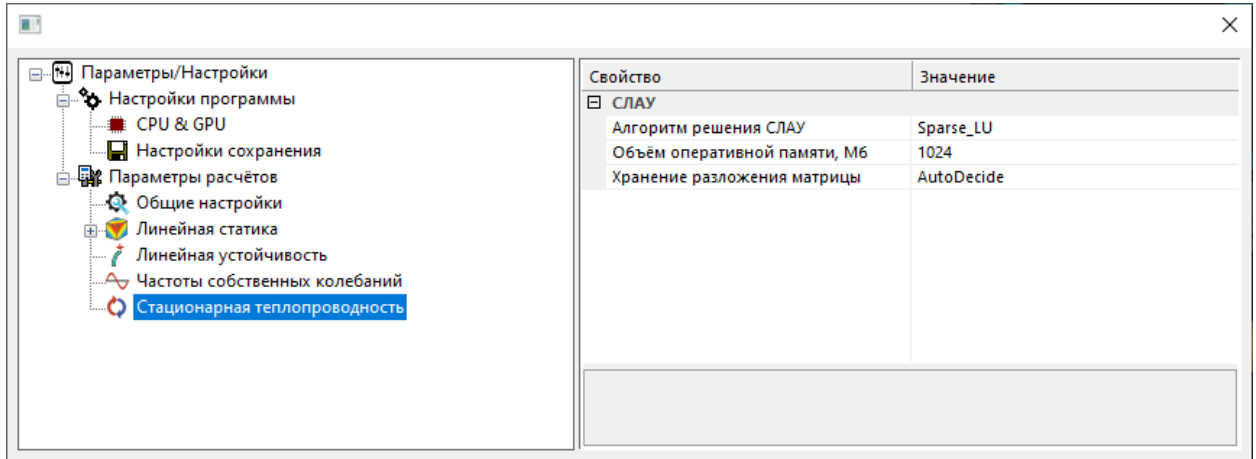


Рис. 3.57. Настройки расчета стационарной теплопроводности

Команда **Параметры усталостного расчета** панели инструментов *Разбиение и расчет* вызывает окно с установками для усталостного расчёта конструкции (Рис. 3.58). Исходными данными для расчёта усталостной прочности являются напряжённо-деформированные состояния, соответствующие максимальному и минимальному силовому воздействию на конструкцию при циклическом нагружении. Предполагается, что все силы, действующие на конструкцию, изменяются по одному закону.

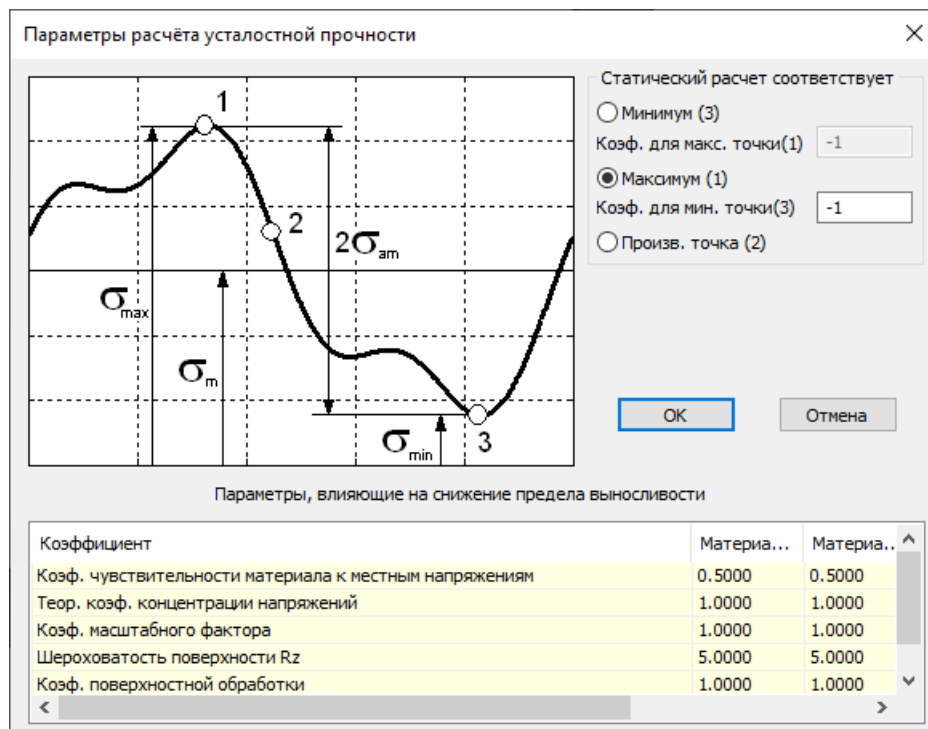



Рис. 3.58. Диалоговое окно Параметры расчёта усталостной прочности

Группа *Статический расчёт соответствует* позволяет задать максимальное и минимальное значения нагрузки, действующей на модель конструкции. Так, если статический

расчёт был проведен для среднего уровня нагрузки, то необходимо выбрать радио-кнопку *Произв. точка (2)*, а затем в полях ввода *Коэф. для макс. точки (1)* и *Коэф. для мин. точки (3)* ввести безразмерные коэффициенты, на которые необходимо умножить систему сил, чтобы получить экстремальные случаи нагружения. Если статический расчёт был проведён для уровня нагрузки, соответствующего максимальным напряжениям, то необходимо выбрать радио-кнопку *Максимум (1)* и в поле ввода *Коэф. для мин. точки (3)* указать безразмерный коэффициент, на который необходимо умножить систему сил, чтобы получить уровень нагрузки, соответствующий минимальным напряжениям.

В нижней части диалога расположена таблица коэффициентов, используемых при расчёте. Каждому материалу может быть задан определённый набор коэффициентов.

3.7 Логирование

Для контроля хода расчета используется логирование: производится запись файла-лога и вывод его содержимого на экран. Для включения логирования используется команда  **Лог расчета**. Для активации команды записи лога расчета в файл необходимо зайти в *Параметры расчета/Настройки сохранения* и отметить свойство *Сохранять файл логирования*. Файл логирования всегда будет сохраняться в папке с моделью в следующем формате: *APMFEM_XXX_Name.log*, где *XXX* – версия модуля APMFEM; *Name* – имя модели.

Если лог-файл с данным именем уже существует, он всегда будет дозаписываться.

Чтобы увидеть информацию о том, как прошел расчет, в отдельном окне необходимо, после проведения расчета активировать команду **Лог расчета**. При этом после проведения первого расчета появится окно *Лог расчета* (Рис. 3.59).

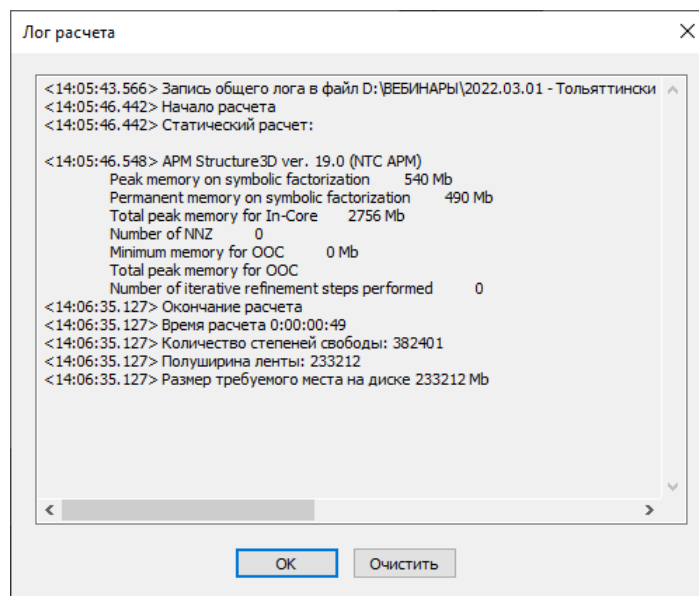



Рис. 3.59. Окно лога расчета

С каждым последующим расчетом содержимое окна будет дополняться новой информацией. Если нужно стереть информацию по предыдущим расчетам, необходимо нажать кнопку *Очистить*. При следующем заходе в *Лог расчета* окно будет содержать информацию по последнему проведенному расчету.

Команда **Лог расчета** доступна, если содержимое лога не пустое.

3.8 Результаты расчета

Команда  **Карта результатов** панели инструментов *Результаты* вызывает диалоговое окно для выбора результатов расчета и дальнейшего их просмотра. Кроме того, в этом окне можно устанавливать различные опции представления результатов (Рис. 3.60).

В поле *Тип расчета* можно выбрать параметры какого произведенного расчета отобразить в диалоговом окне.

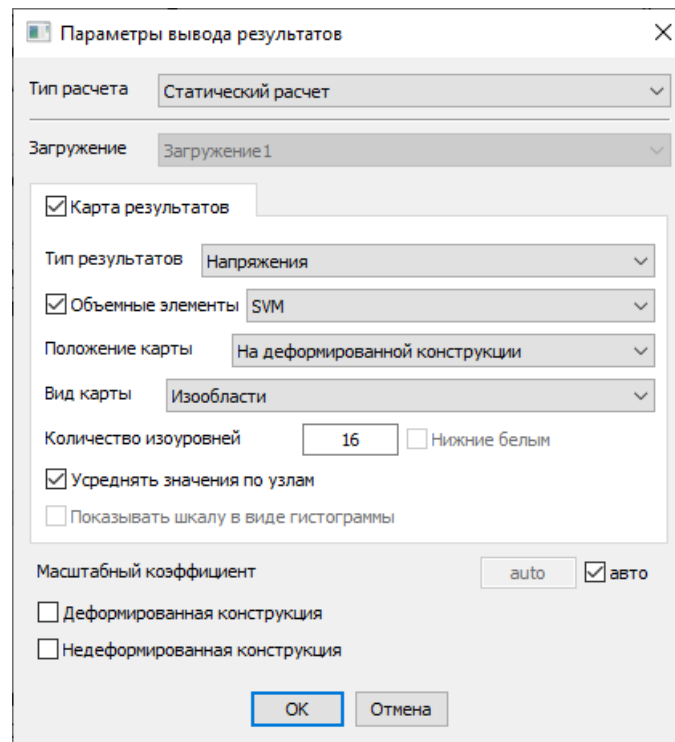


Рис. 3.60. Диалоговое окно *Параметры вывода результатов*

В поле *Тип результатов* выбирается тип результатов для построения карты результатов. В списке *Объемные элементы* выбирается конкретный параметр для просмотра.

Ниже приводится описание некоторых параметров:

- UX – перемещение по оси X глобальной системы координат;
- USUM – суммарное линейное перемещение;
- SX – нормальное напряжение по оси X локальной системы координат элемента;
- SXY – касательное напряжение в площадке с нормалью X и в направлении Y системы координат элемента;
- SVM – эквивалентное напряжение по Мизесу.


В окне ввода *Масштабный коэффициент* задается коэффициент масштабирования перемещений для отрисовки деформированной конструкции. В случае установки флажка *авто* программа вычислит данный параметр автоматически.

Опция *Усреднять значения по узлам* относится к построению карты результатов в виде изообластей. Если эта опция включена, то значения выбранного параметра в узле будут усредняться по всем элементам, имеющим этот узел.

После нажатия кнопки *OK* отображается цветовая карта выбранного параметра. С помощью элементов диалогового окна *Параметры отображения* можно управлять режимами построения карты (Рис. 3.61).

Для просмотра результатов внутри твердотельной модели часть карты может быть скрыта с помощью установки *Глубины просмотра*. По умолчанию, плоскость разреза совпадает с плоскостью вида (плоскостью экрана). Глубина просмотра регулируется с помощью соответствующего бегунка прокрутки. Также, значение глубины в процентах можно задать в соседнем поле ввода (установка введённого значения осуществляется по клавише *ENTER*).

В выпадающем списке выбирается необходимая плоскость разреза, созданная командой

Вспомогательная плоскость, а кнопка  *Установить плоскость разреза* применяет выбранную плоскость. Если отмечена дополнительная опция *Результаты в сечении*, то карта результатов будет отображаться только в сечении, созданном выбранной плоскостью.

Вариант *В плоскости экрана* устанавливает плоскость разреза в плоскость текущего вида. Для этого следует повернуть модель так, чтобы планируемая плоскость разреза совпала с плоскостью текущего вида (плоскостью экрана), и нажать кнопку «*Установить плоскость разреза*».

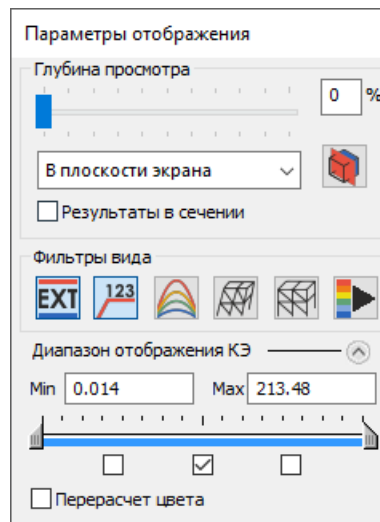








Рис. 3.61. Параметры отображения карт результатов

С помощью *Фильтров вида* можно включать/выключать отображение различных элементов карты:

-  – указателей максимальных-минимальных значений;
-  – выносок;
-  – построение карты результатов в виде изолиний;
-  – каркас деформированной конструкции;
-  – каркас недеформированной конструкции;
-  – переход в режим показа анимации (Рис. 3.66).

Для отображения дополнительных инструментов необходимо щелкнуть по стрелочке *Диапазон отображения КЭ*.

Min и *Max* – минимальное и максимальное значения диапазона результатов для задания значения пользователем. Установка введённого значения осуществляется по клавише *ENTER*. Синий цвет шрифта – значение корректно и находится в процессе ввода, красный – некорректное значение. В случае его задания (по *ENTER*), будет установлено максимально (минимально) допустимое (Рис. 3.62).

Установка диапазона результатов посредством шкалы. При совмещении ползунков (или задании одинакового значения в полях минимума и максимума) выводится одна изоповерхность, соответствующая конкретному значению. Совмещённые ползунки можно перемещать едино. При этом изоповерхность будет перестраиваться соответственно выбранному значению.

Вкл./выкл. отображения элементов на модели *до*, *внутри* и *за* пределами выставленного в предыдущих пунктах диапазона.

При включении флажка *Перерасчёт цвета* синему и красному цветам карты результатов станут соответствовать заданные минимум и максимум.

Для карт результатов сборок можно отключать элементы, соответствующие отдельным деталям. Для этого в дереве модели в папке *Слои* необходимо включить/выключить с помощью контекстного меню слой, соответствующий детали (Рис. 3.63).

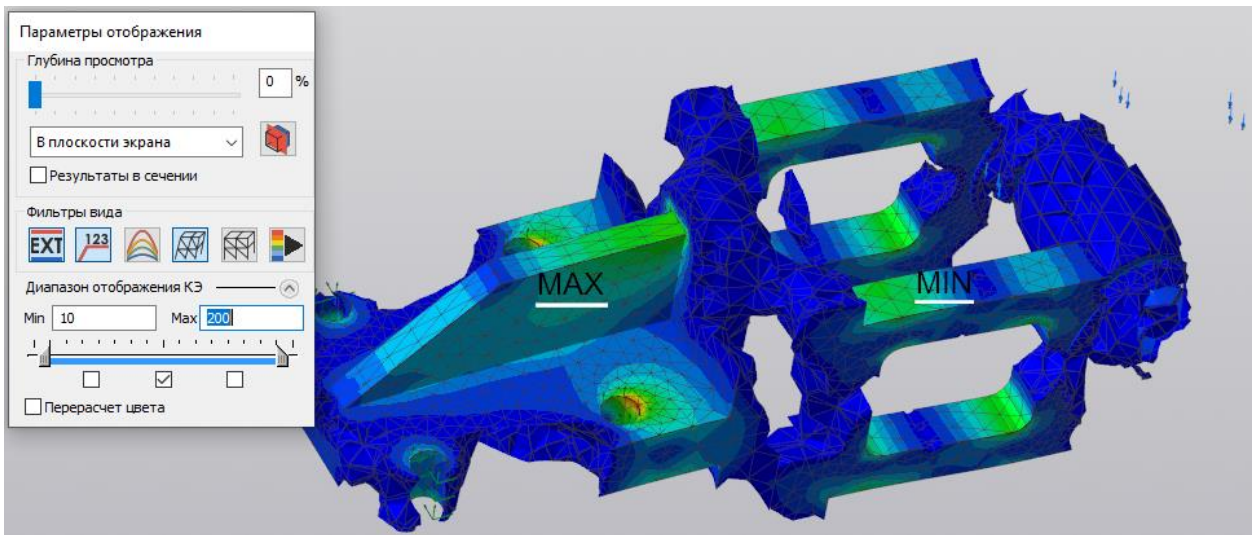


Рис. 3.62. Карта напряжений с заданным диапазоном вывода результатов: показаны только элементы со значениями от 10 до 200 МПа

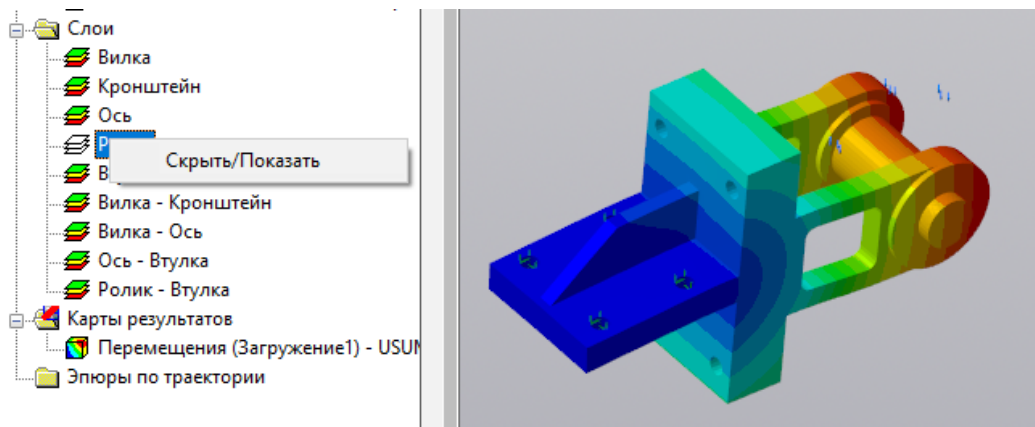


Рис. 3.63. Карта перемещений для сборки с отключёнными слоями

После вызова результаты доступны в дереве прочностного анализа. Настройка отображения результатов, диапазон и параметры редактирования доступны через команды контекстного меню (Рис. 3.64).

Диапазон результатов

Команда контекстного меню позволяет задать диапазон вывода результатов при отрисовке цветовой карты (Рис. 3.65).

Параметры вывода результатов

Команда контекстного меню вызывает диалоговое окно (см. Рис. 3.60) для выбора результатов расчета и дальнейшего их просмотра. Кроме того, позволяет устанавливать различные опции представления результатов.

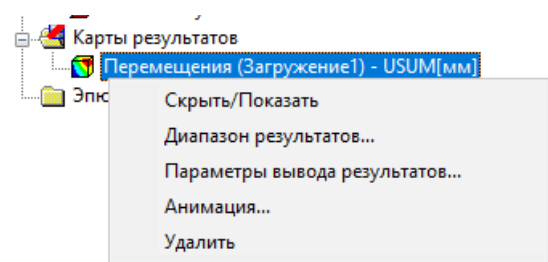


Рис. 3.64. Контекстное меню результатов

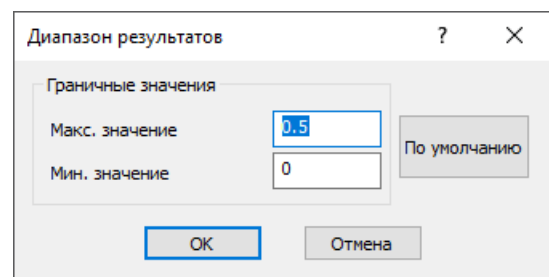


Рис. 3.65. Диалоговое окно Диапазон результатов

Анимация

Команда контекстного меню вызывает диалоговое окно для показа анимации (Рис. 3.66). В поле *Период анимации* задается длительность создаваемой анимации. В полях *Начальный момент времени* и *Конечный момент времени* выбирается период анимации из доступного диапазона. Кнопка *Записать в AVI* позволяет сохранить анимацию в отдельный видео-файл. При сохранении необходимо настроить параметры сжатия видео в соответствующем диалоговом окне.

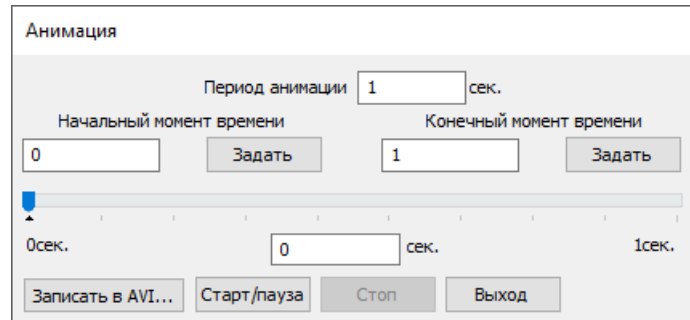


Рис. 3.66. Диалоговое окно Анимация

Команда **Реакции опор** вызывает диалоговое окно, в котором можно просмотреть реакции в опорах (Рис. 3.67). В верхней части окна расположены выпадающие списки, позволяющие выбрать тип расчета и загрузку для отображения результатов. В таблице отображаются результаты расчета для всех закреплений, созданных в модели. В нижней части окна показываются суммарные реакции для выделенных закреплений. Все закрепления можно выбрать, нажав комбинацию клавиш Ctrl+A, несколько закреплений – используя левую клавишу мыши совместно с SHIFT или CTRL.

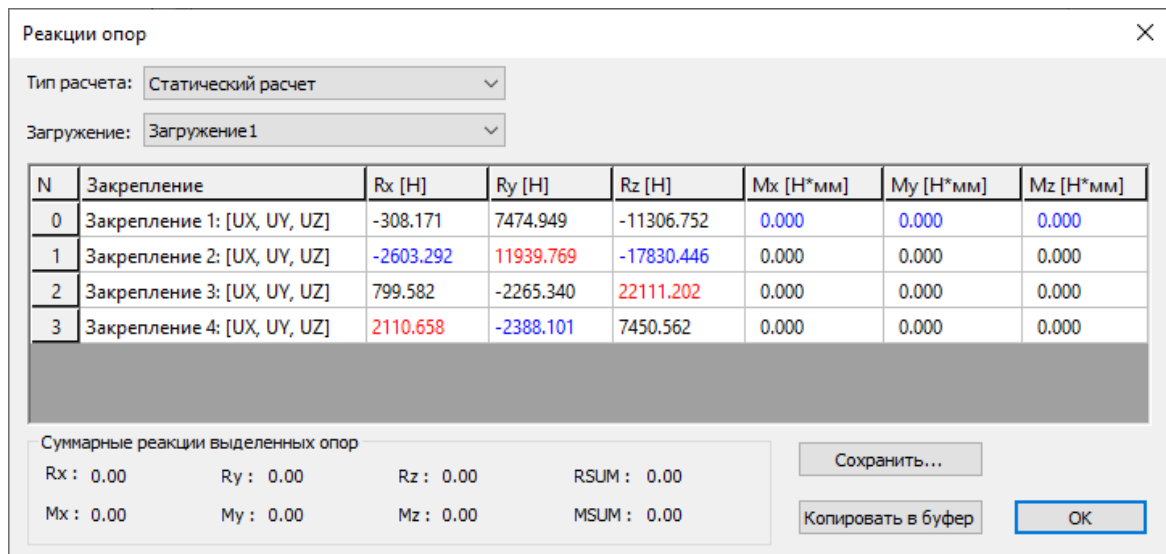


Рис. 3.67. Окно Реакции опор

По кнопке *Сохранить* можно сохранить таблицу в формате csv. Кнопка *Копировать в буфер* копирует содержимое таблицы в буфер обмена.

Команда **Устойчивость** выводит окно с коэффициентом запаса устойчивости, получаемым в результате расчета на устойчивость (Рис. 3.68).

Кнопкой *Форма* выводится форма потери устойчивости (Рис. 3.69).

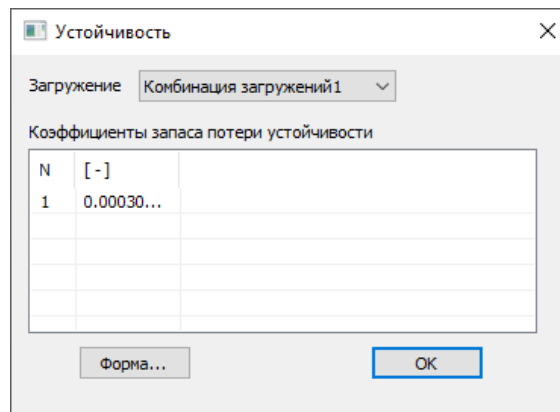


Рис. 3.68. Диалоговое окно Устойчивость

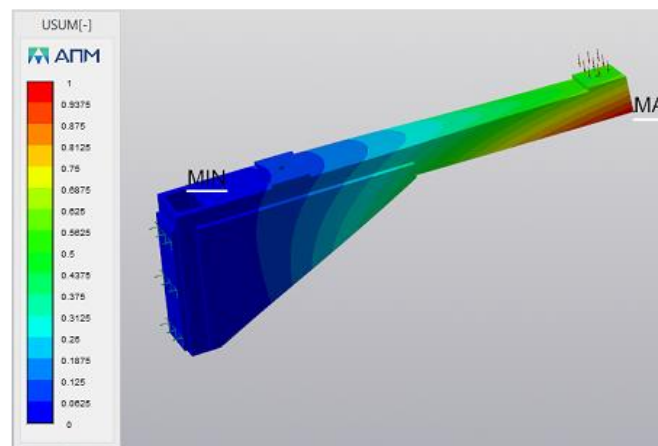


Рис. 3.69. 1-я форма потери устойчивости

Команда **Собственные частоты** выводит окно с частотами собственных колебаний и модальными массами конструкции (Рис. 3.70). Кнопка *Форма* предназначена для просмотра формы колебаний выбранной частоты (Рис. 3.71).

Собственные частоты				Модальные массы (м.м.) и суммы модальных масс (с.м.м.) по направлениям						
N	[рад/с]	[Гц]	[с]	м.м. X [%]	с.м.м. X [%]	м.м. Y [%]	с.м.м. Y [%]	м.м. Z [%]	с.м.м. Z [%]	
1	1273.52	202.686	0.00493373	1.65e-09	1.65e-09	47	47	1.39e-07	1.39e-07	
2	2117.57	337.022	0.00296717	0.0819	0.0819	8.13e-07	47	24.2	24.2	
3	3763.15	598.924	0.00166966	1.92e-06	0.0819	16.2	63.2	1.81e-05	24.2	
4	5133.89	817.083	0.00122387	0.0483	0.13	0.000136	63.2	0.985	25.2	
5	6032.9	960.166	0.00104149	9.88e-07	0.13	3	66.2	1.17e-05	25.2	
6	7154.93	1138.74	0.000878...	1.07e-06	0.13	1.32	67.5	0.000723	25.2	
7	8129.02	1293.77	0.000772...	3.24	3.37	2.87e-05	67.5	22.6	47.8	
8	9976.91	1587.87	0.000629...	0.582	3.95	0.0171	67.5	0.0153	47.8	
9	10104.6	1608.2	0.000621...	0.00217	3.95	3.6	71.1	0.000106	47.8	
10	11140.4	1773.04	0.000564...	5.11e-05	3.95	4.91	76	4.04e-06	47.8	
11	14000.4	2211.44	0.000446...	0.700	4.75	4.11e-05	76	0.0402	47.8	

Рис. 3.70. Диалоговое окно Частоты собственных колебаний

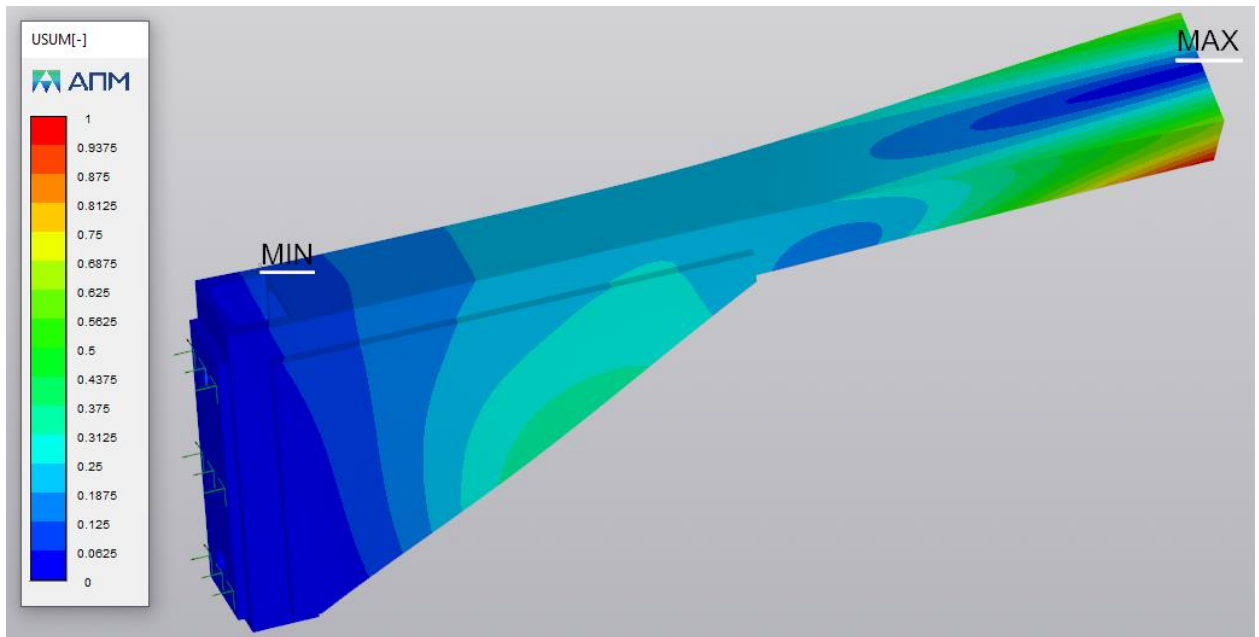



Рис. 3.71. 3-я форма собственных колебаний

Команда  **Инерционные характеристики модели** выводит диалоговое окно с информацией о массе модели, центре тяжести модели, моментах инерции модели и суммарных реакциях в опорах (Рис. 3.72). При активации команды сначала выводится окно выбора загрузки или комбинации нагрузок, для которых должны быть выведены характеристики.

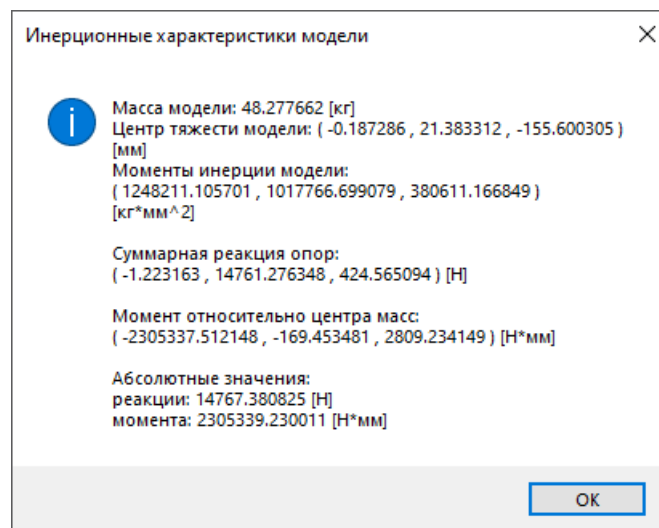



Рис. 3.72. Диалоговое окно Инерционные характеристики модели

Команда  **Сохранить отчет** позволяет настроить и сформировать файл отчета с исходными данными и результатами расчета в формате html или xml. Отчет в формате html может быть просмотрен в любом web-браузере (Internet Explorer, Google Chrome, Opera и т.п.) и выведен на печать. Отчет в формате xml может быть открыт текстовым редактором MS Word (или аналогичным ему) и в нём же доработан.

После вызова команды открывается диалоговое окно (Рис. 3.73), в котором можно настроить информацию, выводимую в отчёт.

Кнопка **Запомнить** запоминает настройки окна для следующего вызова, **Выбрать все** – выбирает все доступные параметры, **По умолчанию** – возвращает настройки по умолчанию. По кнопке **OK** начинается формирование отчета.

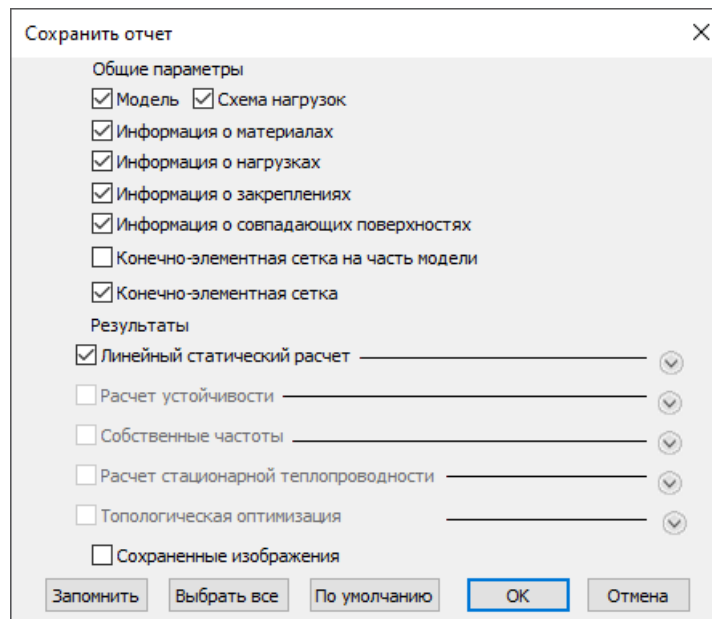



Рис. 3.73. Диалоговое окно Сохранить отчет

Команда  **Выноска** предназначена для установки выносок со значениями непосредственно на карте результатов. Для установки выноски необходимо привести указатель мыши на характерную точку карты результатов и зафиксировать положение нажатием левой кнопки мыши. Затем следует отвести указатель мыши в сторону и зафиксировать место расположения выноски вторым нажатием левой кнопки мыши (Рис. 3.74).

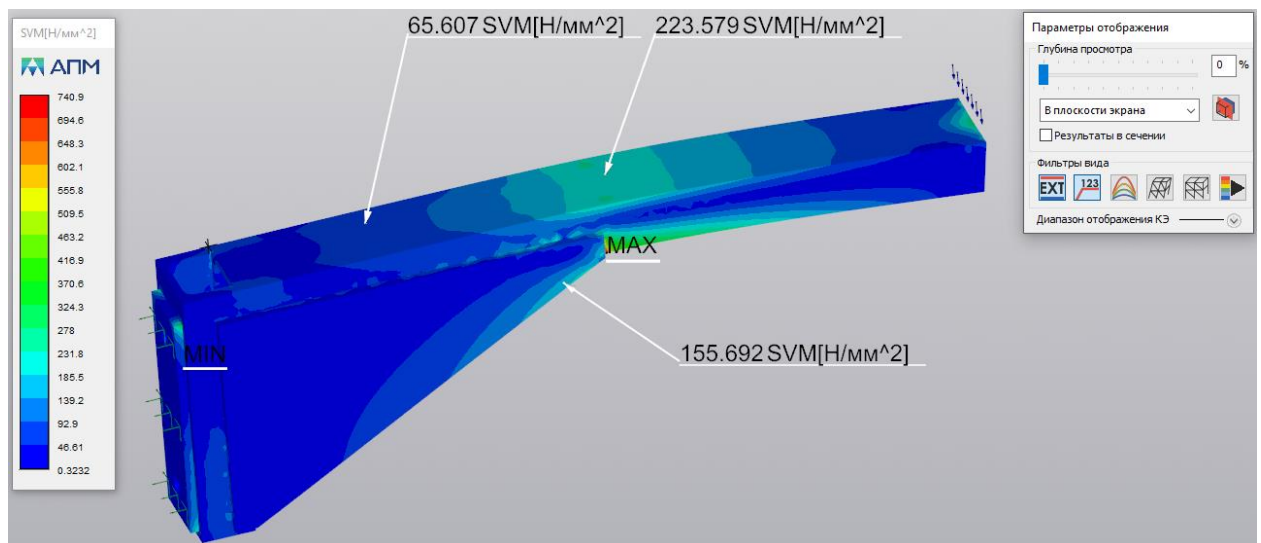



Рис. 3.74. Простановка выносок на карте результатов

Для текущего положения указателя мыши значение выводится динамически при включенной опции *Динамическое определение* на панели свойств. Для предотвращения замедления при работе с конечно-элементными моделями значительной размерности опция *Динамическое определение* может быть отключена.

При включении опции *Координаты выноски* рядом со значением будут выводиться координаты точки начала выноски (возможно только на карте недеформированной конструкции).

Кнопки на панели свойств команды **Выноска** позволяют также *Удалить все выноски* или *Удалить последнюю выноску*.

Команда  **Расстояние между точками** позволяет найти расстояние между произвольными точками расчетной модели. Команда доступна при просмотре карты результатов и может использоваться при работе как на деформируемой, так и на недеформируемой карте. Для

измерения расстояния необходимо левой кнопкой мыши указать первую и вторую точки, при этом точки соединяются отрезком. При повторном указании другой точки начальной считается последняя отрисованная.

На Рис. 3.75 представлено окно свойств команды. Точка P1 – координаты первой точки; Точка P2 – координаты второй точки; Расстояние между точками L – расстояние между точками; dX – расстояние между точками по оси X; dY – расстояние между точками по оси Y; dZ – расстояние между точками по оси Z.

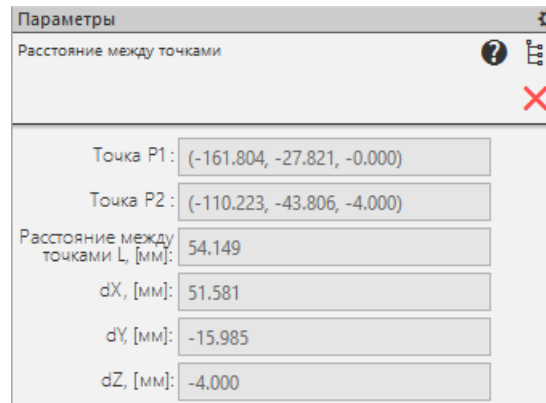


Рис. 3.75. Окно свойств команды Расстояние между точками

Сохранение результатов расчета

Для папки *Карты результатов* доступен флажок *Сохранять результаты в файл*. При включённом режиме сохранения расчетная модель и результаты расчета хранятся в файле КОМПАС-3D (Рис. 3.76). Иконка папки отображает состояние флажка: включено или выключено сохранение (Рис. 3.77).

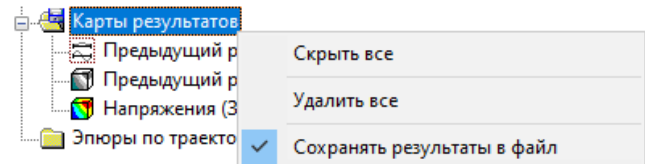


Рис. 3.76 Сохранение результатов в файл КОМПАС-3D




Рис. 3.77. Вид иконки группы Карты результатов в зависимости от флажка сохранения

Сохранение результатов предыдущего расчета

Если внести изменения в нагрузки и крепления или просто перестроить КЭ сетку и повторить расчет, то в дереве останутся карты результатов одного предыдущего расчета, которые будут помечены префиксом «Предыдущий расчёт».

Это дает возможность сравнения результатов двух расчетов в рамках одной сессии работы с библиотекой *APM FEM*. В файл сохраняются результаты только последнего расчета.

3.9 Вспомогательная геометрия и дополнительные результаты

Команда  **Вспомогательная плоскость** применяется при просмотре результатов расчета. Она позволяет посмотреть результаты в произвольной плоскости. Доступна для твердотельных моделей. Команда расположена в группе *Вспомогательная геометрия*. Параметры команды представлены на Рис. 3.78. Кнопка *Добавить все* позволяет добавить все (не добавленные ранее) плоскости.

При повторной активации команды программа покажет только те плоскости, которые ранее не были добавлены в дерево. Если свободных плоскостей нет, кнопка *Добавить все* не будет доступна.

Выбранные вспомогательные плоскости доступны в окне *Параметры отображения* при просмотре карты результатов. Название плоскости в списке, с которой происходит работа в текущий момент, обозначается черным цветом, все остальные названия добавленных плоскостей – серым (Рис. 3.79).

Ползунок во вспомогательном окне *Параметры отображения* в блоке *Глубина просмотра* позволяет менять глубину просмотра для выбранной плоскости.

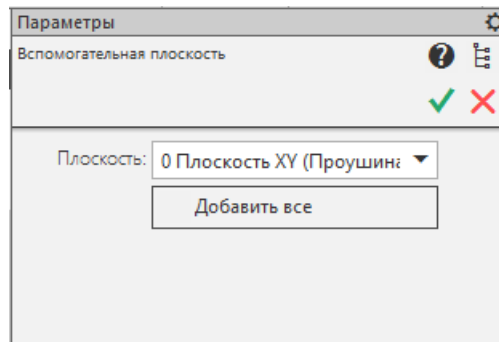


Рис. 3.78. Параметры команды *Вспомогательная плоскость*

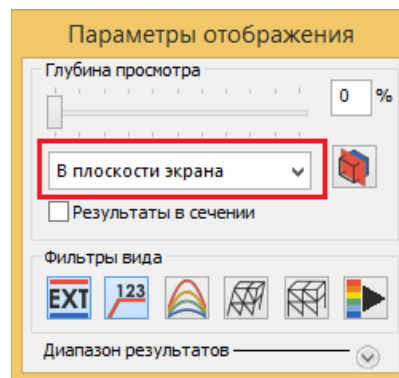


Рис. 3.79. Доступные вспомогательные плоскости

Пример.

Средствами *Компаса* создадим вспомогательную плоскость, например, через ребро и вершину. В окне *Вспомогательная плоскость* выберем *Плоскость через ребро и вершину* (Рис. 3.80).

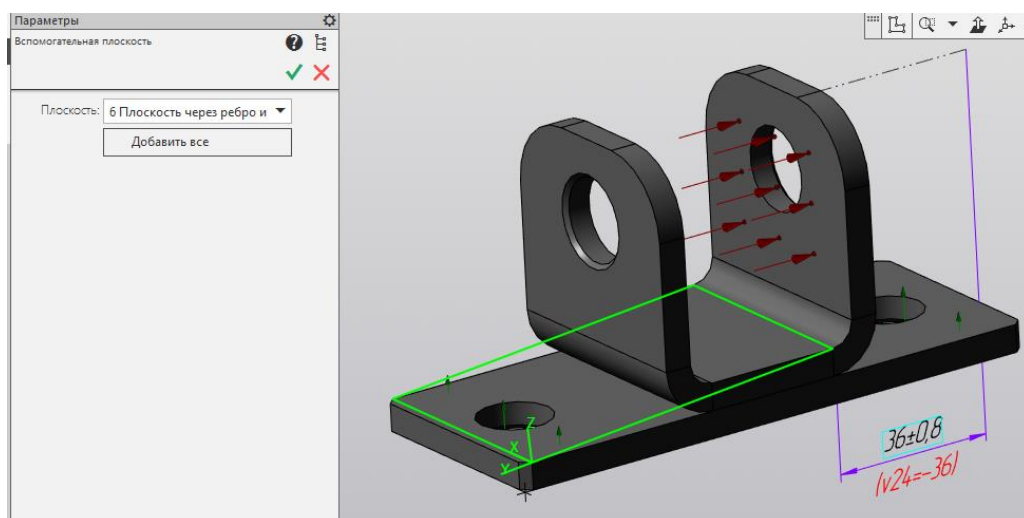


Рис. 3.80. Выбор вспомогательной плоскости

Проведем линейный статический расчет. Откроем карту результатов. В окне *Параметры отображения* текущей является плоскость по умолчанию *В плоскости экрана* (Рис. 3.81).

В раскрывающемся списке выберем *Плоскость через ребро и вершину*: (Рис. 3.82). Плоскость пока не является активной, поэтому её название отображается серым цветом.

Чтобы начать работу с выбранной плоскостью, необходимо нажать на кнопку *Установить плоскость разреза* (Рис. 3.83). Результат нажатия кнопки *Установить плоскость разреза* показан на Рис. 3.84. Выбранная плоскость стала активной и ее название в списке отображается черным цветом. На Рис. 3.85 показаны результаты для позиции ползунка в 37% (выше выбранной плоскости сечения).

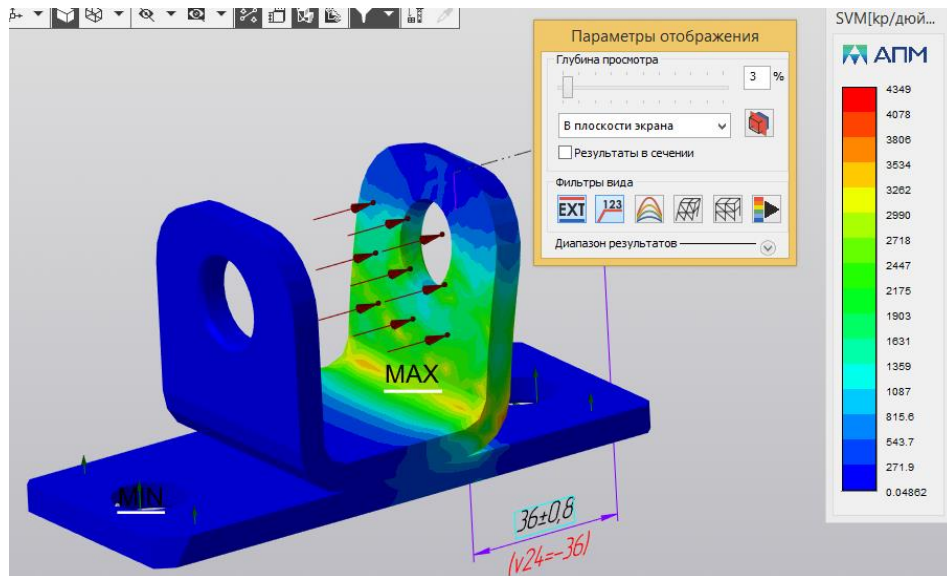


Рис. 3.81. Выбор вспомогательной плоскости для результата

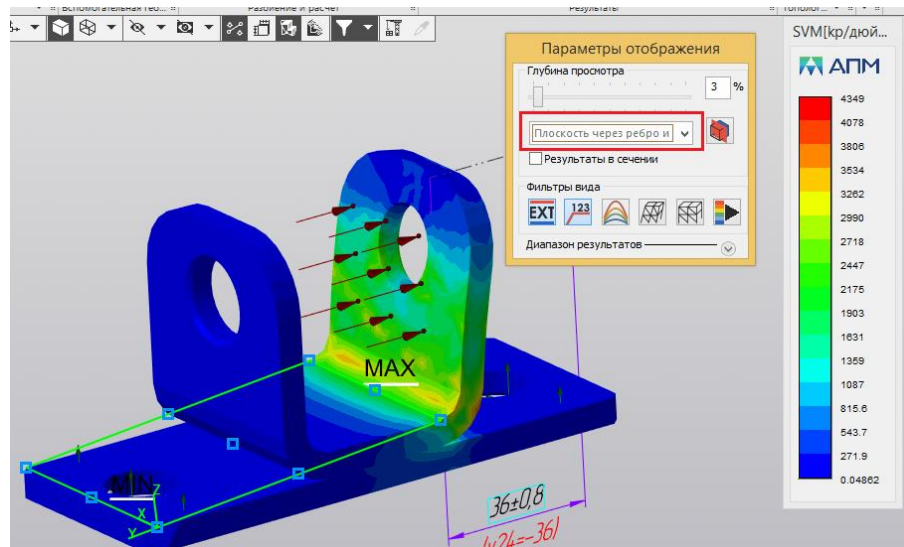


Рис. 3.82. Плоскость через ребро и вершину

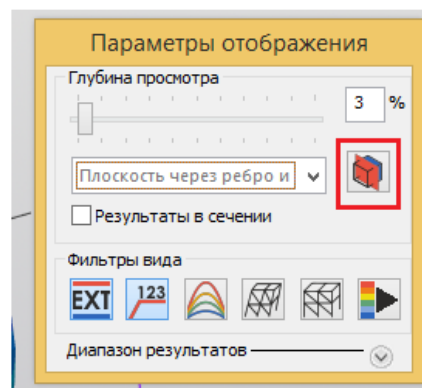


Рис. 3.83. Кнопка Установить плоскость разреза

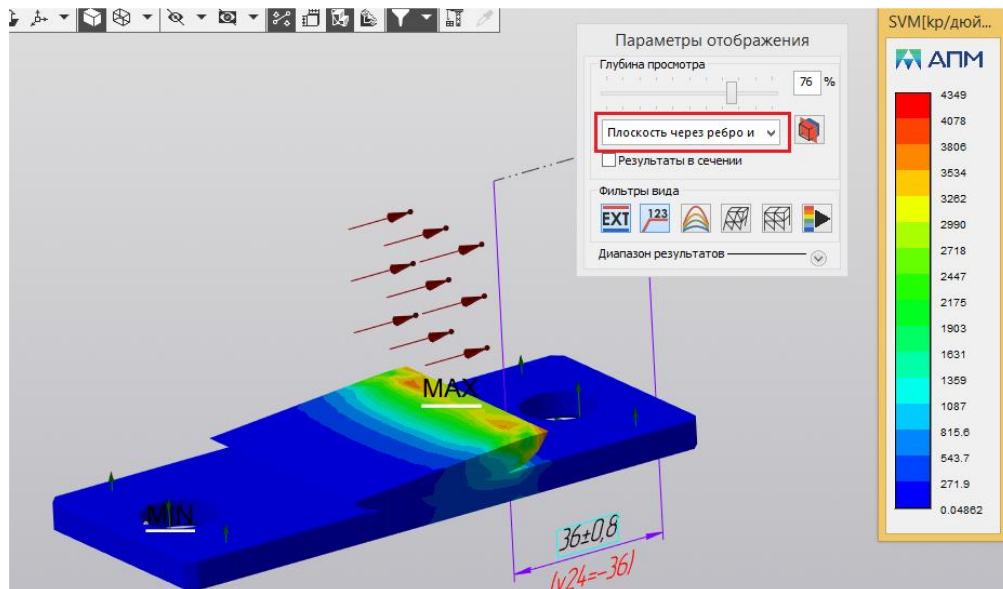


Рис. 3.84. Результаты во вспомогательной плоскости сечения

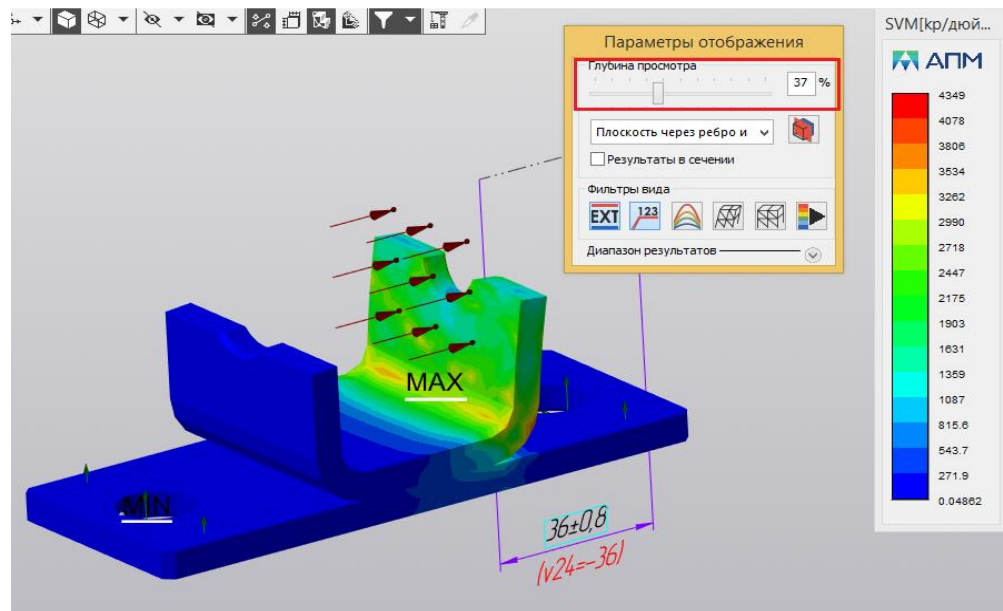


Рис. 3.85 Результаты с глубиной просмотра 37%

Команда **Траектория по точкам** предназначена для создания траектории, по которой будет строиться график результатов расчета командой *Результаты по траектории* (Рис. 3.86). После активации команды необходимо последовательно указать узлы, по которым будет идти траектория. Траектория отрисовывается красными линиями, последовательно соединяющими указанные точки. Точки траектории индексируются в порядке выбора. Для подтверждения создания траектории необходимо нажать зеленую галочку.

Кнопкой *Начать выбор заново* текущая несохраненная траектория сбрасывается и построение начинается сначала. В выпадающем списке можно выбрать любую доступную траекторию и отредактировать. Созданная траектория добавляется в раздел *Дерева Вспомогательная геометрия*.

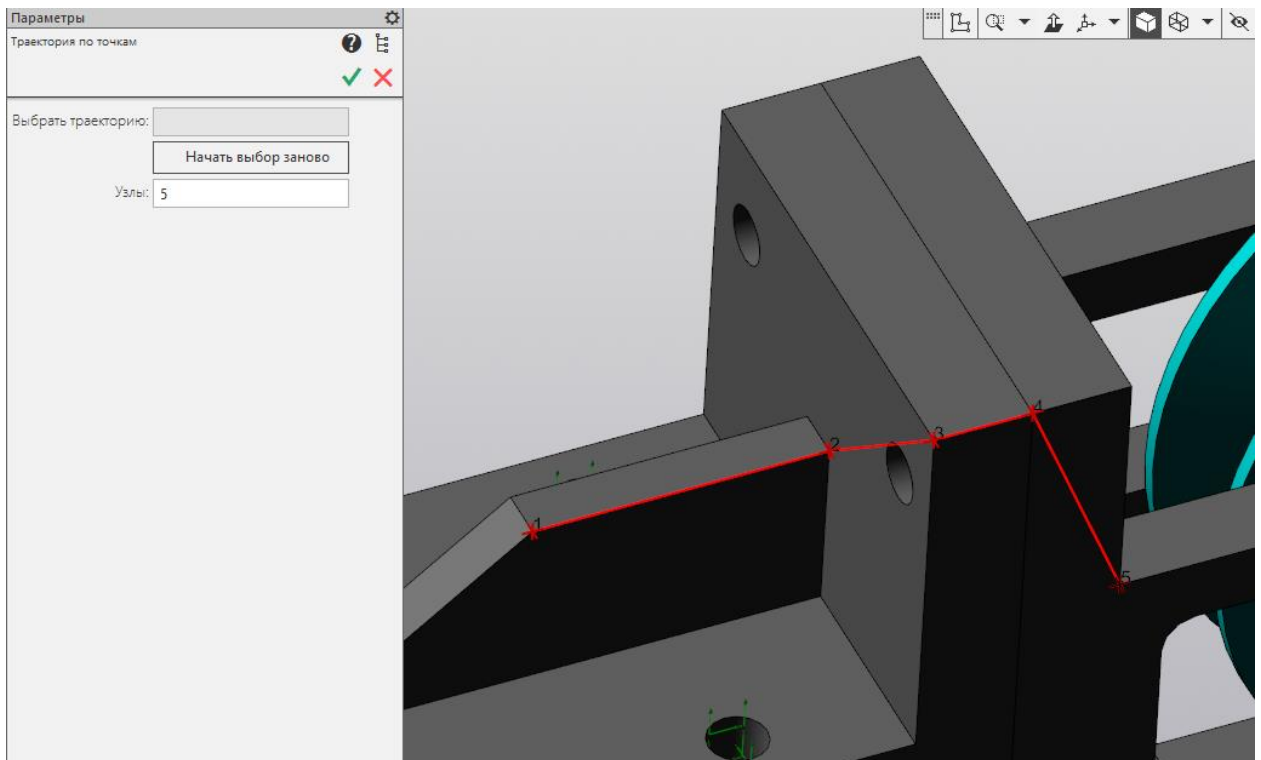


Рис. 3.86. Построение Траектории по точкам

Команда **Результаты по траектории** предназначена для построения графика результатов расчета по траектории, созданной командой *Траектория по точкам*. После активации команды из выпадающего списка необходимо выбрать предварительно созданную траекторию и нажать кнопку *Выбрать результат* (Рис. 3.87). При этом открывается окно *Результаты по траектории* (Рис. 3.88).

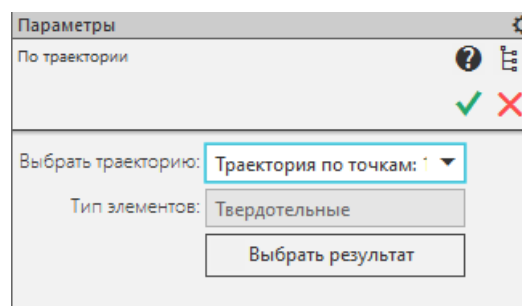


Рис. 3.87. Параметры команды *Результаты по траектории*

Здесь из соответствующих выпадающих списков начала выбираются тип расчета, загрузка, тип и подтип результатов, результат в элементах, а также указывается количество точек – число дополнительных промежуточных точек, которые будут учитываться при построении графика. Построение графика осуществляется следующим образом. Находится минимальный отрезок в построенной заранее траектории по точкам, и его длина делится на число, указанное в поле *Количество точек*. Полученное значение является опорным значением (шагом) при построении промежуточных точек других отрезков траектории.

Для построения графика необходимо нажать кнопку *Построить*.

Для сохранения результатов построения необходимо нажать кнопку *ОК* окна *Результаты по траектории*, и далее на панели параметров подтвердить операцию соответствующей кнопкой . При этом в *Дереве* в папке *Элюры по траектории* появится соответствующий узел (Рис. 3.89) в имени которого будет указаны тип и подтип результатов. Если в окне *Результаты по траектории* нажать кнопку *Отмена*, то результаты построения сохранены не будут. Также можно создать узел без результатов, а результаты добавить позже. Такие узлы будут называться «По траектории» с добавлением порядкового номера, и команда *Показать...* контекстного меню будет недоступна.

Для созданных узлов из контекстного меню доступны дополнительные команды:

- *Показать...* – открывает диалоговое окно *Результаты по траектории*;
- *Редактировать* – открывает панель параметров;
- *Удалить* – удаляет узел *Дерева* с соответствующими результатами.

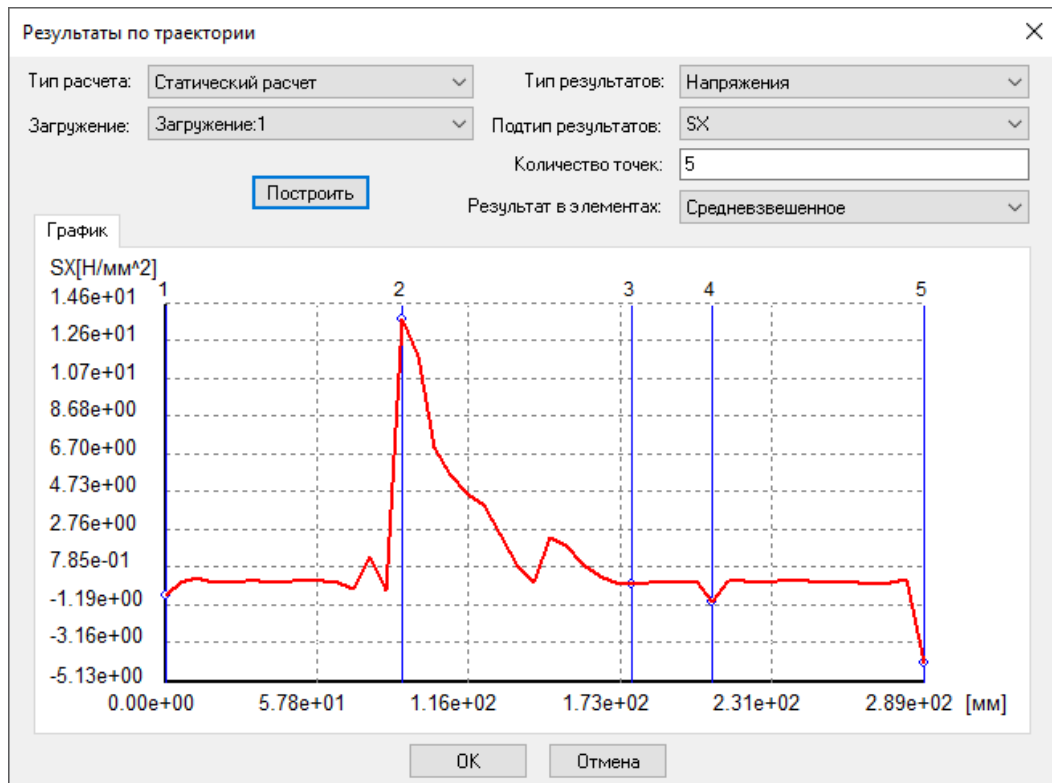


Рис. 3.88. Окно *Результаты по траектории*

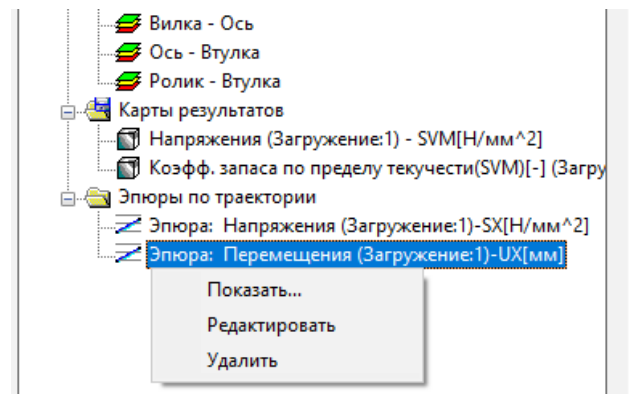


Рис. 3.89. Узлы результатов (эпюр) по траектории

Если после выбора траектории был произведен еще один расчет, то для узла со старыми результатами по траектории в начале имени добавляется текст «Предыдущий расчет».

Глава 4. Расчет топологической оптимизации конструкций

4.1 Добавление, редактирование и удаление откликов

Добавление откликов производится с помощью команд выпадающего меню в панели инструментов (Рис. 4.1). Необходимо выбрать соответствующую команду, а потом выбрать необходимые для отклика параметры. Как только выполнены минимальные требования для формирования отклика, появляется возможность добавить его в дерево.

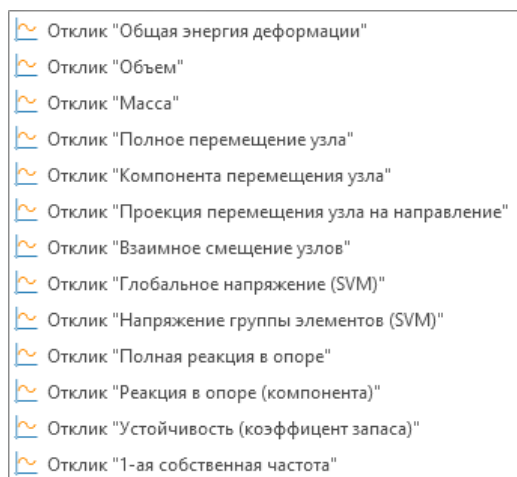


Рис. 4.1. Группа команд задания откликов

Отклик **Общая энергия деформации** возвращает суммарную энергию деформации конструкции для выбранных загрузок (Рис. 4.2). Единица измерения возвращаемой величины – мДж.

Типичное применение отклика – в качестве целевой функции для поиска конструкции максимальной жесткости.

Логика работы данного отклика такова, что суммирование будет производиться по всем активным загрузкам для оптимизационной задачи. К примеру, если в отклике указано активными 2 загрузки из 3, а в каком-либо другом отклике будет использоваться не выбранное загрузке, то оно так же будет учитываться для расчёта энергии деформации.

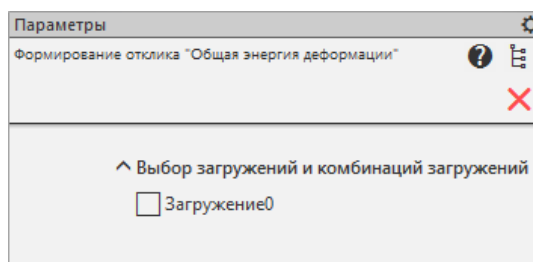


Рис. 4.2. Параметры отклика **Общая энергия деформации**

Отклик **Объем** не требует никаких дополнительных параметров и всегда возвращает одно значение. Возвращаемое значение – объем выбранной области проектирования с учётом распределения объемных долей. Как правило, используется либо в качестве целевой функции, либо ограничения. Задание ограничения для отклика производится в процентах от начального объема выбранной области проектирования.

Отклик **Масса** не требует никаких дополнительных параметров и всегда возвращает одно значение. Возвращаемое значение – масса выбранной области проектирования с учётом распределения объемных долей. Как правило, используется либо в качестве целевой функции, либо ограничения. Единица измерения отклика – грамм.

Отклик **Полное перемещение узла** возвращает значение полного перемещения узла (Рис. 4.3). Для успешного формирования необходимо выбрать одну или несколько контрольных точек, для которых будет рассчитываться величина перемещения, загрузки и вектор проекции. Единица измерения возвращаемой величины – мм.

Количество возвращаемых значений соответствует количеству заданных загрузок, умноженному на количество заданных узлов.

Типичное применение отклика – ограничение перемещения в узле заданным значением.

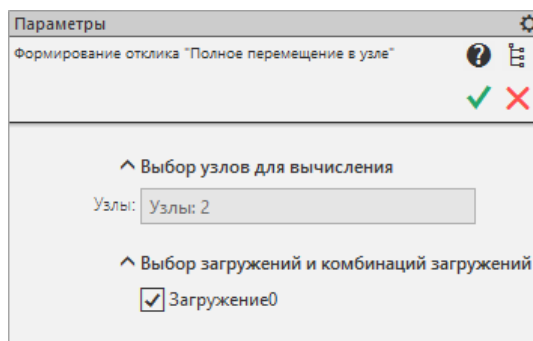


Рис. 4.3. Параметры отклика Полное перемещение узла

Отклик **Компонента перемещения узла** возвращает значение проекции перемещения узла на одну из осей ГСК (Рис. 4.4). Для успешного формирования необходимо выбрать одну или несколько контрольных точек, для которых будет рассчитываться величина перемещения, загрузки и ось проекции. Единица измерения возвращаемой величины - мм.

При необходимости возвращать абсолютное значение величины, можно поставить соответствующую опцию. Количество возвращаемых значений соответствует количеству заданных загрузок, умноженному на количество заданных узлов.

Типичное применение отклика – ограничение перемещения в узле заданным значением.

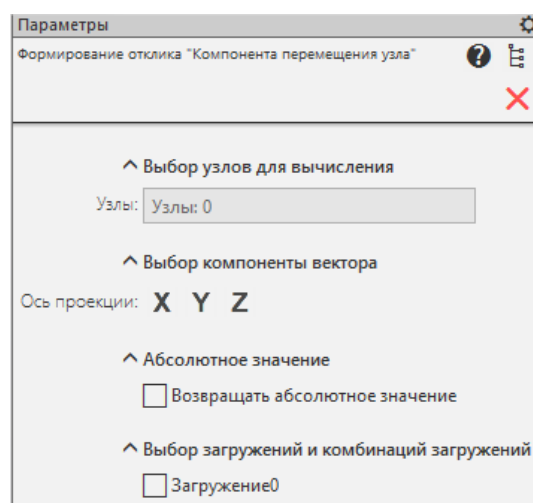


Рис. 4.4. Параметры отклика Компонента перемещения узла

Отклик **Проекция перемещения узла на направление** возвращает значение проекции перемещения узла на указанный вектор (Рис. 4.5). Для успешного формирования необходимо выбрать одну или несколько контрольных точек, для которых будет рассчитываться величина перемещения, загрузки и вектор проекции. Единица измерения возвращаемой величины – мм.

При необходимости возвращать абсолютное значение величины, можно поставить соответствующую опцию. Количество возвращаемых значений соответствует количеству заданных загрузок, умноженному на количество заданных узлов.

Типичное применение отклика – ограничение перемещения в узле заданным значением.

Функционал «Взять вектор с отрезка» позволяет не задавать компоненты вектора для проекции, а указать направление с помощью одного из прямолинейных ребер на модели. При нажатии на опцию «Взять вектор с отрезка» происходит переход в режим выбора отрезка, и другие

команды меню становятся недоступными. Чтобы вернуться к редактированию параметров отклика, необходимо отключить эту опцию.

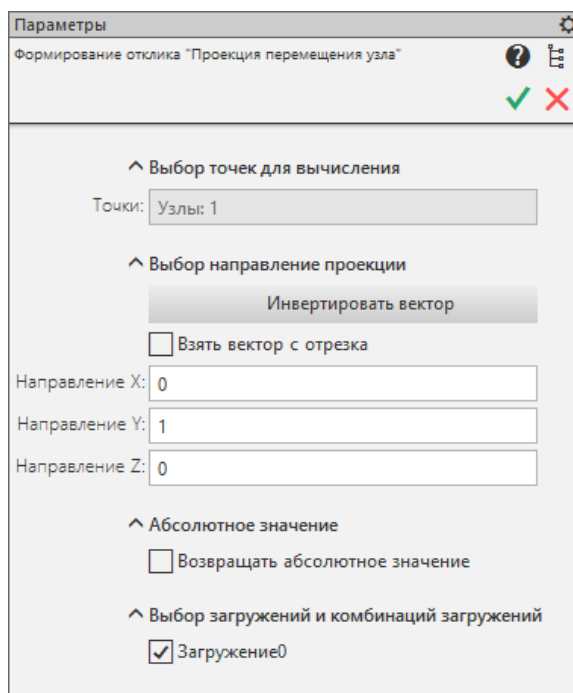


Рис. 4.5. Параметры отклика Проекция перемещения узла на направление

Отклик **Взаимное смещение двух узлов** возвращает значение смещение одного узла относительно другого в проекции на вектор, соединяющий два этих узла в ненагруженном состоянии (Рис. 4.6). Для успешного формирования необходимо выбрать две контрольные точки, загрузки. Единица измерения возвращаемой величины - мм.

Если есть необходимость возвращать абсолютное значение величины, то вы можете поставить соответствующую опцию. Количество возвращаемых значений соответствует количеству заданных загружений.

Типичное применение отклика – ограничение деформации в какой-либо проушине.

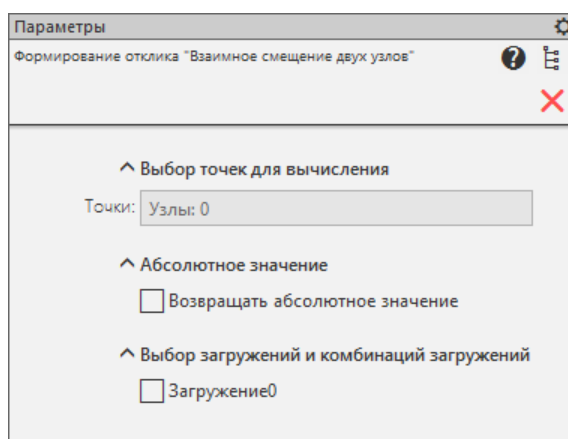


Рис. 4.6. Параметры отклика Взаимное смещение двух узлов

Отклик **Глобальное напряжение (SVM)** возвращает максимальное значение механических напряжений в области проектирования для заданных загружений (Рис. 4.7). Единица измерения возвращаемой величины – МПа.

Количество возвращаемых значений соответствует количеству заданных загружений.

Для успешного формирования необходимо выбрать только загрузки.

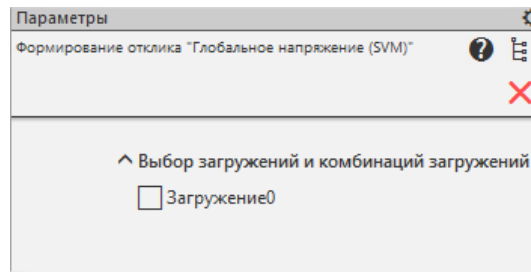


Рис. 4.7. Параметры отклика Глобальное напряжение (SVM)

Отклик **Напряжение группы элементов (SVM)** возвращает максимальное значение механических напряжений для выбранных элементов конструкции для заданных загружений (Рис. 4.8). Единица измерения возвращаемой величины – МПа.

Количество возвращаемых значений соответствует количеству заданных загружений.

Для успешного формирования необходимо выбрать загрузки и тела, в которых необходимо контролировать напряжения.

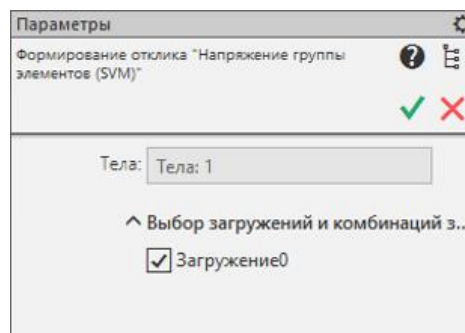


Рис. 4.8 Параметры отклика Напряжение группы элементов (SVM)

Отклик **Полная реакция в опоре** возвращает полные суммарные реакции (Н) по выбранному направлению для заданных опор и загружений (Рис. 4.9).

Применяется, если необходимо ограничить реакцию в опоре на выбранной площадке, к примеру, для обеспечения прочности болтового соединения, уровня напряжений на сопрягаемых поверхностях.

Для успешного формирования необходимо выбрать загрузки и закрепления, в которых необходимо контролировать усилия.

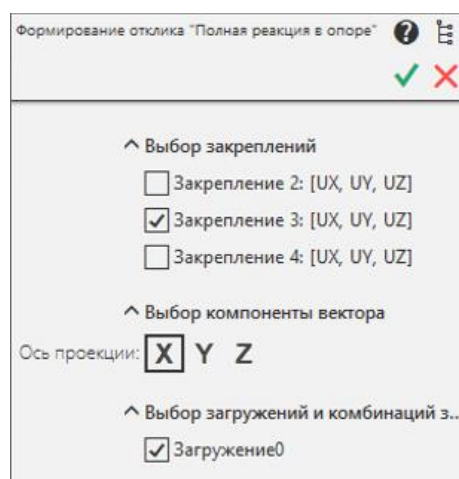


Рис. 4.9. Параметры отклика Полная реакция в опоре

Отклик **Реакция в опоре (компонента)** возвращает суммарные реакции (Н) по выбранным направлениям для заданных опор и загружений (Рис. 4.10).

Применяется, если необходимо ограничить реакцию в опоре на выбранной площадке, к примеру, для обеспечения прочности болтового соединения, уровня напряжений на сопрягаемых поверхностях.

Для успешного формирования необходимо выбрать загрузки и закрепления, в которых необходимо контролировать усилия, а также оси (ГСК), на которые проецируется реакция в опоре. При выборе нескольких осей будет создаваться отдельные отклики для каждой.

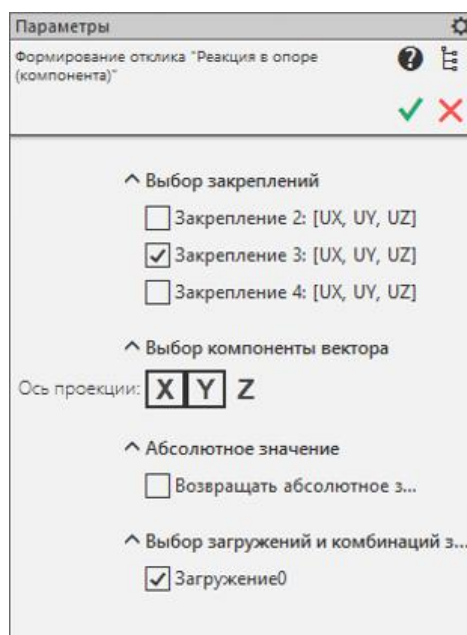


Рис. 4.10. Параметры отклика Реакция в опоре (компонента)

Отклик **Устойчивость (коэффициент запаса)** возвращает коэффициенты запаса по устойчивости конструкции для заданных загрузок (Рис. 4.11).

Применяется, если необходимо обеспечить определенный запас по устойчивости в полученной конструкции.

Для успешного формирования достаточно выбрать загрузки, в которых необходимо контролировать коэффициент запаса по устойчивости.

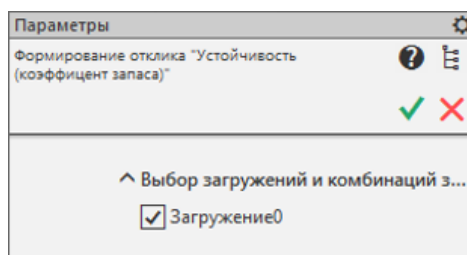


Рис. 4.11. Параметры отклика Устойчивость (коэффициент запаса)

Отклик **1-ая собственная частота** возвращает первую собственную частоту конструкции (Гц). Применяется, если необходимо увести собственную частоту конструкции от какой-либо заданной, либо наоборот.

Для формирования отклика не требуется указания дополнительных параметров, поскольку собственные частоты вычисляются без преднагружения.

Редактирование и удаление откликов

Чтобы отредактировать уже созданный отклик, необходимо кликнуть по нему в дереве правой кнопкой мыши и в выпадающем меню выбрать команду *Редактировать* (Рис. 4.12), задать необходимые параметры и нажать зеленую галочку сохранения изменений.

Удаление отклика возможно только, если он не используется ни в какой целевой функции (ЦФ) или ограничении. Если же они не являются базовыми для оптимизационной задачи, то есть возможность удалить отклик и зависящие от него ЦФ и ограничения вместе с откликом.

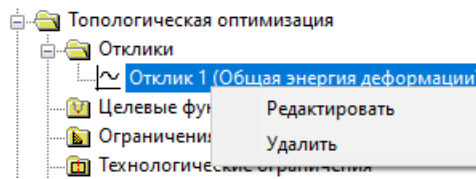


Рис. 4.12. Контекстное меню для объекта Отклик

Окно редактирования отклика может отличаться в зависимости от того, выбран ли он в качестве целевой функции (Рис. 4.14) или нет (Рис. 4.13). В первом случае логика работы окна построена так, чтобы отклик возвращал всегда только одно значение и опция сохранения изменений будет доступна только при выполнении условий для использования отклика в качестве базового для целевой функции.

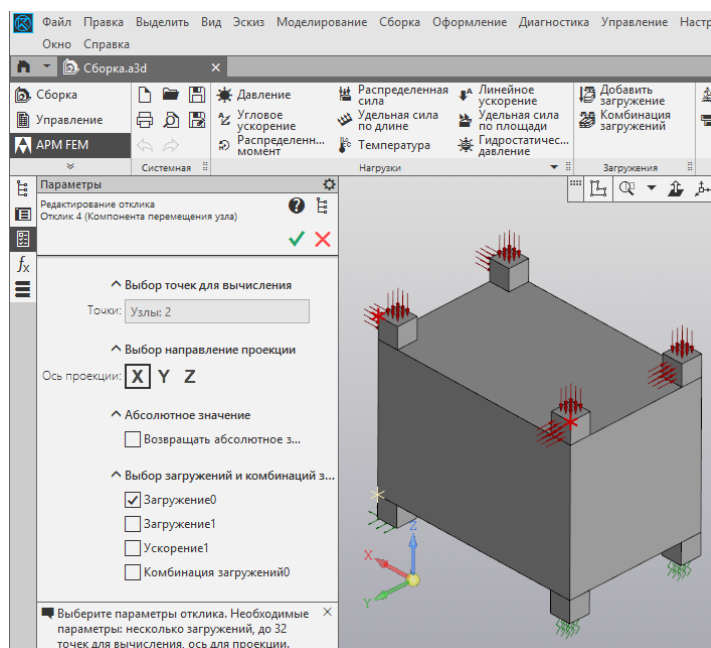


Рис. 4.13. Редактирование отклика

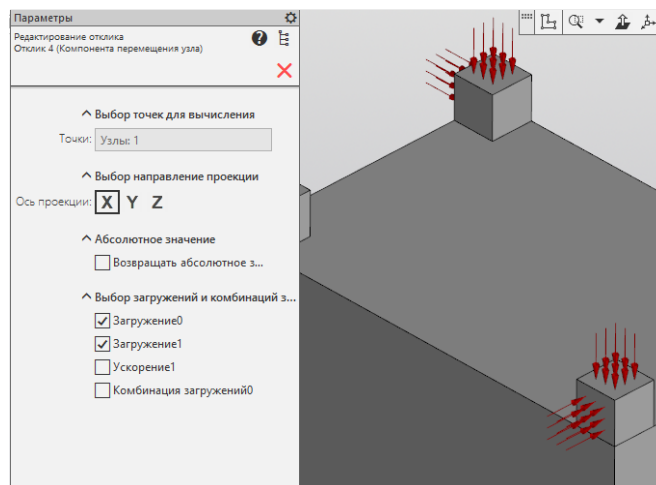



Рис. 4.14. Редактирование отклика для целевой функции

Для примера, на Рис. 4.14 выбрано два загрузения для отклика *Компонента перемещения*, из-за чего он уже не может использоваться в качестве базового для ЦФ и поэтому опция сохранения изменений отсутствует.

4.2 Добавление, редактирование и удаление конструктивных ограничений

Добавление конструктивных ограничений  производится с помощью команд выпадающего меню в панели инструментов (Рис. 4.15). Необходимо выбрать соответствующую команду, а потом выбрать необходимые параметры.

Во многих ограничениях есть возможность указать направляющий вектор с помощью операции «Взять вектор с отрезка», которая выполнена аналогично операциям взятия вектора в отклике «Проекция перемещения на нормаль» или при формировании нагрузки «Распределенная сила».

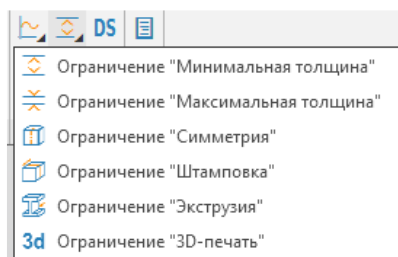


Рис. 4.15. Группа команд задания конструктивных ограничений

Ограничение **Минимальная толщина** позволяет определить минимальный размер элемента получаемой конструкции (Рис. 4.16). Это ограничение позволяет избавиться от эффекта шахматной доски на сетке первого порядка. Для эффективности рекомендуется назначать это ограничение как удвоенное расстояние между двумя максимально отстоящими друг от друга соседними конечными элементами, а при наличии ограничения по напряжениям – тройное. Иными словами, если при разбиении вы назначили максимальный шаг сетки 5 мм, то минимальную толщину стоит выбрать равной 10-15 мм.

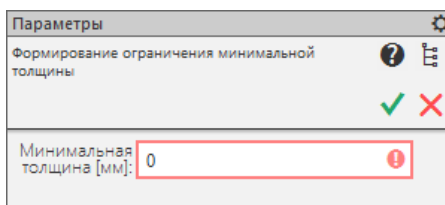


Рис. 4.16. Параметры ограничения Минимальная толщина

Ограничение **Максимальная толщина** позволяет определить максимальный размер элемента получаемой конструкции (Рис. 4.17). Такое ограничение может быть полезным, к примеру, при проектировании сложных конструкций, где нерационально использовать балки больших сечений. Лучше их разбить на несколько балок с меньшим сечением, когда имеются ограничения по толщине для конструкции, к примеру, требование равномерности толщины стенок при проектировании отливок. Рекомендуется применять его в связке с ограничением минимальной толщины и брать размер в 2-3 раза больший.

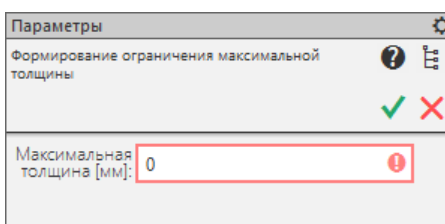


Рис. 4.17 Параметры ограничения Максимальная толщина

Ограничение **Симметрия** позволяет получить симметричную конструкцию, учитывая при этом до трёх плоскостей симметрии (Рис. 4.18). Для указания плоскостей симметрии необходимо задать направление нормалей к ним. Плоскость симметрии будет установлена автоматически в центре по одному из измерений габаритного ящика для модели. Есть возможность также определить вектор направления нормали для двух первых плоскостей симметрии с помощью взятия вектора с отрезка. Принцип работы инструмента соответствует аналогичным операциям в отклике *Проекция перемещения на направление* или при формировании нагрузки *Распределенная сила*. Положение третьей плоскости, при необходимости, рассчитывается автоматически.

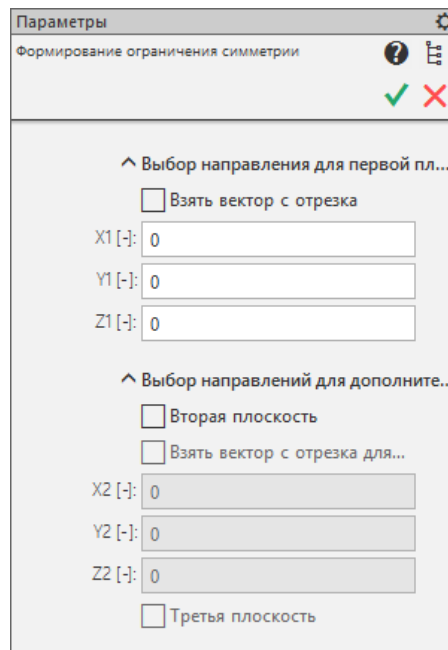


Рис. 4.18. Параметры ограничения Симметрия

Ограничение **Штамповка** позволяет сгенерировать деталь, которую возможно получить с помощью метода штамповки (Рис. 4.19). Есть два варианта реализации: без плоскости разъема и с указанием плоскости разъема. В первом случае необходимо указать только нормаль к направлению штамповки, во втором – точку на плоскости разъема. Область проектирования изначально так же должна отвечать требованиям штамповки. Если в его направлении будут скрытые полости, то скорей всего произвести оптимизацию будет невозможно.

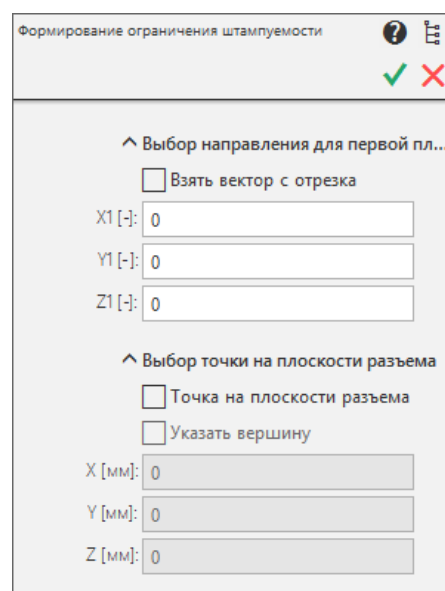


Рис. 4.19. Параметры ограничения Штамповка

Ограничение **Экструзия** позволяет реализовать модель, которую можно будет получить с помощью протяжки или выталкивания (Рис. 4.20). Единственный необходимый параметр – направление протяжки. Метод получения модели является производным от получения штампуемой детали.

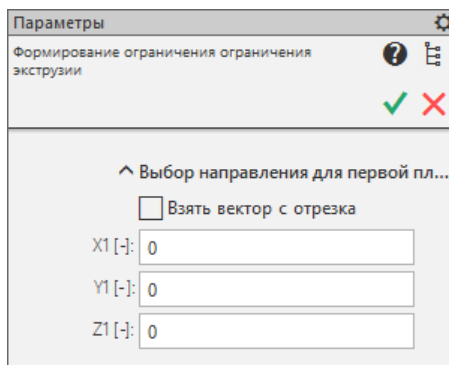


Рис. 4.20. Параметры ограничения Экструзия

Ограничение **3D-печать** позволяет получить модель, которую можно напечатать без поддержек на 3d- принтере (Рис. 4.21). Основная настройка – направление печати.

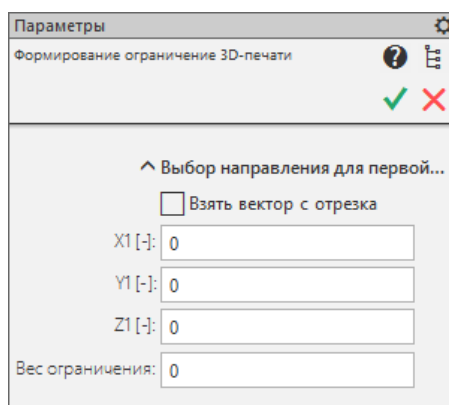


Рис. 4.21. Параметры ограничения 3D-печать

Редактирование и удаление технологических ограничений

Удаление и редактирование любого технологического ограничение производится с помощью соответствующей команды контекстного меню в дереве (Рис. 4.22). Технологическое ограничение невозможно удалить, если оно задействовано в одной из оптимизационных задач.

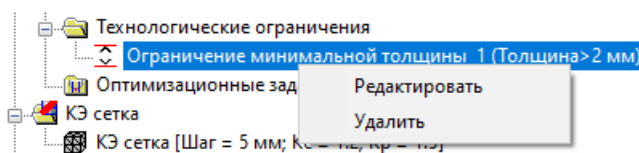


Рис. 4.22. Контекстное меню технологического ограничения

4.3 Задание области проектирования

DS Область проектирования – команда предназначена для выбора элементов области проектирования. Топологическая оптимизация производится в пространстве объектов, выбранных в качестве области проектирования.

Необходимо выбрать тела или поверхности (в случае поверхностной модели), которые будут входить в область проектирования. После чего выбранное тело или поверхность будут занесены в соответствующий список тел или граней и будут выделены цветом (Рис. 4.23).

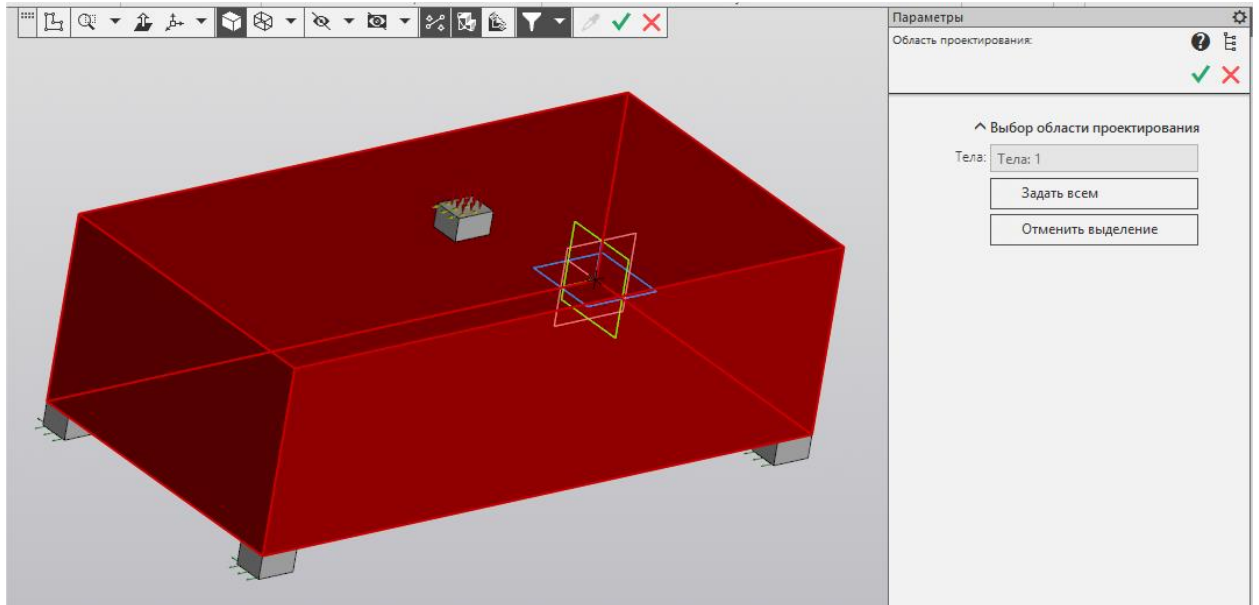



Рис. 4.23. Указание объектов, которые будут входить в область проектирования

Кнопка *Задать всем* выделяет все тела или поверхности одной детали или сборки. Кнопка *Отменить выделение* снимает выделение с ранее выделенных объектов.

Элементы, которые не следует выбирать в качестве области проектирования:

- элементы приложения нагрузок;
- элементы закрепления;
- элементы, с которыми ничего не требуется делать.

4.4 Добавление, редактирование и удаление целевой функции

Команда  позволяет добавить целевую функцию (ЦФ). Основные параметры для целевой функции – базовый отклик и выбор задачи поиска минимума или максимума значения ЦФ (Рис. 4.24). После выбора необходимо нажать на зеленую галочку для добавления нового объекта в дерево.

Базовый отклик для ЦФ не может возвращать более одного значения. И список доступных откликов формируется, исходя из этого условия.

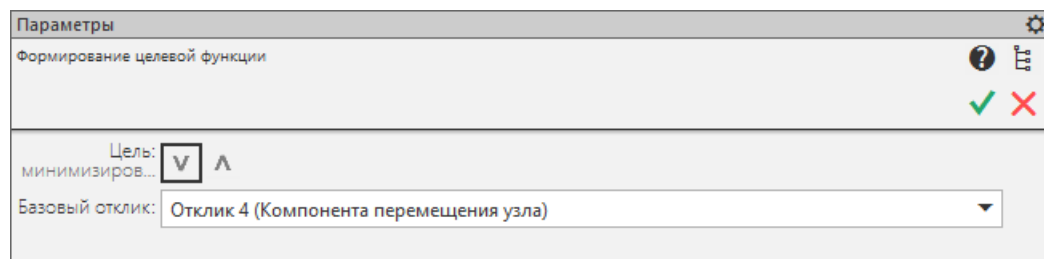


Рис. 4.24. Добавление целевой функции

Для редактирования или удаления необходимо кликнуть правой кнопкой мыши по объекту ЦФ в дереве и выбрать соответствующую команду (Рис. 4.25).

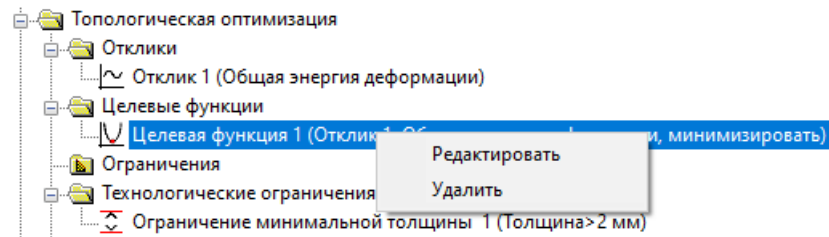


Рис. 4.25. Контекстное меню целевой функции

В случае удаления будет проведена проверка и, если ЦФ не используется ни в одной оптимизационной задаче, её можно будет удалить.

В случае редактирования пользователь попадает в режим редактирования ЦФ, которое принципиально ничем не отличается от режима создания. После выбора параметров необходимо нажать зеленую галочку для фиксации изменений.

4.5 Добавление, редактирование и удаление ограничения

Команда позволяет добавить ограничение оптимизационной задачи. Основные параметры ограничения – определение типа ограничения (больше или меньше), значение ограничения в соответствии с единицами измерения отклика, точность его соблюдения, и базовый отклик, значения которого необходимо ограничивать (Рис. 4.26). Для добавления или сохранения изменений, необходимо нажать зеленую галочку вверху.

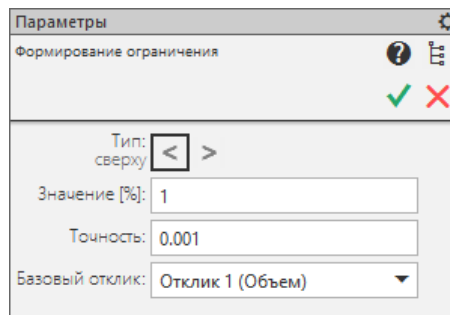


Рис. 4.26. Добавление ограничения

Для редактирования или удаления ограничения необходимо кликнуть правой кнопкой мыши по соответствующему объекту дерева и воспользоваться контекстным меню (Рис. 4.27).

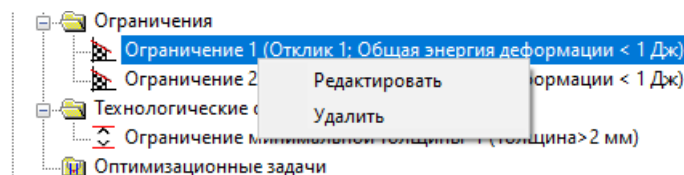


Рис. 4.27. Контекстное меню ограничения

Правила для удаления ограничения такие же, как и для ЦФ, его можно удалить только, если оно не используется в оптимизационной задаче.

4.6 Добавление, редактирование и удаление оптимизационной задачи

Добавление оптимизационной задачи производится с помощью команд выпадающего меню в панели инструментов (Рис. 4.28).

Основные параметры оптимизационной задачи – заданная ЦФ, список ограничений и технологические ограничения. В модели, для проведения топологической оптимизации, необходимо наличие активной оптимизационной задачи.

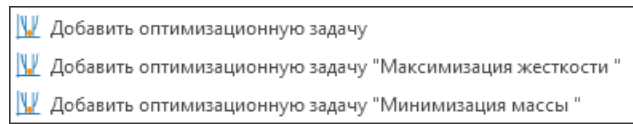


Рис. 4.28. Группа команд добавления оптимизационной задачи

По команде **Добавить оптимизационную задачу** пользователь попадает в окно формирования оптимизационной задачи (Рис. 4.29).

Основные параметры, необходимые для успешного создания оптимизационной задачи, – это наличие ЦФ и одного или более ограничений. Так же доступны для выбора технологические ограничения, но они не обязательны. По завершению формирования оптимизационной задачи необходимо нажать зеленую галочку вверху окна.

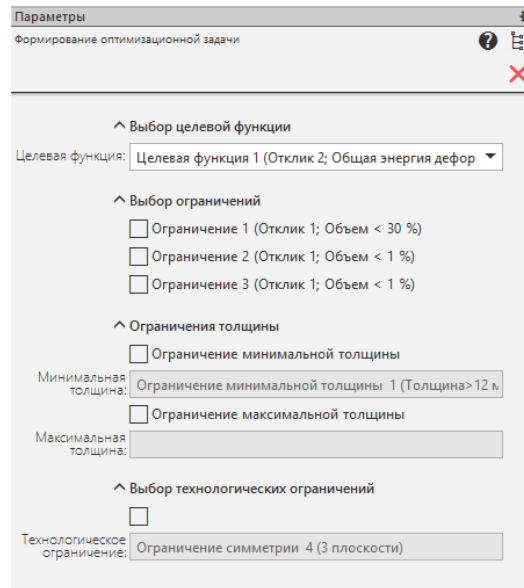


Рис. 4.29. Добавление оптимизационной задачи

Добавление предустановленной оптимизационной задачи.

С помощью команд **Добавить оптимизационную задачу «Максимизация жёсткости»** и **Добавить оптимизационную задачу «Минимизация массы»** возможно добавить предустановленную оптимизационную задачу со сформированными откликами, ограничениями, целевой функцией и, если необходимо, ограничением минимальной толщины.

Основные параметры оптимизационной задачи **«Максимизация жесткости»** – ограничение на объем и загрузки.

Основные параметры оптимизационной задачи **«Минимизация массы»** – ограничение на действующие в конструкции напряжения и загрузки для ограничения.

Во всех окнах параметров данных команд можно выбрать область проектирования. Если перед вызовом команды область уже была задана, то она будет учтена.

Редактирование и удаление оптимизационных задач

Удаление и редактирование оптимизационной задачи производится с помощью соответствующей команды контекстного меню в дереве (Рис. 4.30). Расчётная оптимизационная задача может быть только одна, соответственно, при переключении на новую расчётную оптимизационную задачу, предыдущая становится неактивной.

Окно редактирования оптимизационной задачи имеет те же параметры, что и окно создания оптимизационной задачи.

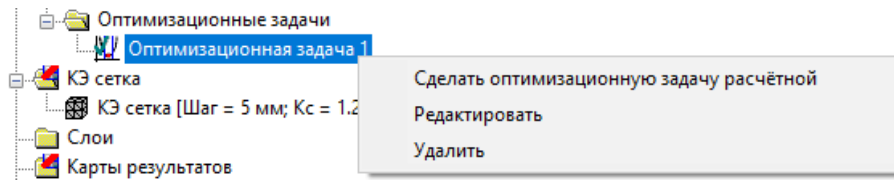


Рис. 4.30. Контекстное меню оптимизационной задачи

4.7 Расчёт

По команде запускается расчёт топологической оптимизации конструкции по заданному параметру с учетом наложенных ограничений.

В окне расчёта (Рис. 4.31) можно наблюдать за некоторыми сводными значениями топологической оптимизации. На графике черной линией выводится погрешность итерации – максимальное изменение плотности в элементах, красной – требуемое значение погрешности. Как только черная линия опустится ниже красной – расчет закончится.

В любой момент расчет можно остановить по кнопке *Остановить расчет*, что приведет к тому, что в модели будут зафиксированы значения плотностей на данном шаге.

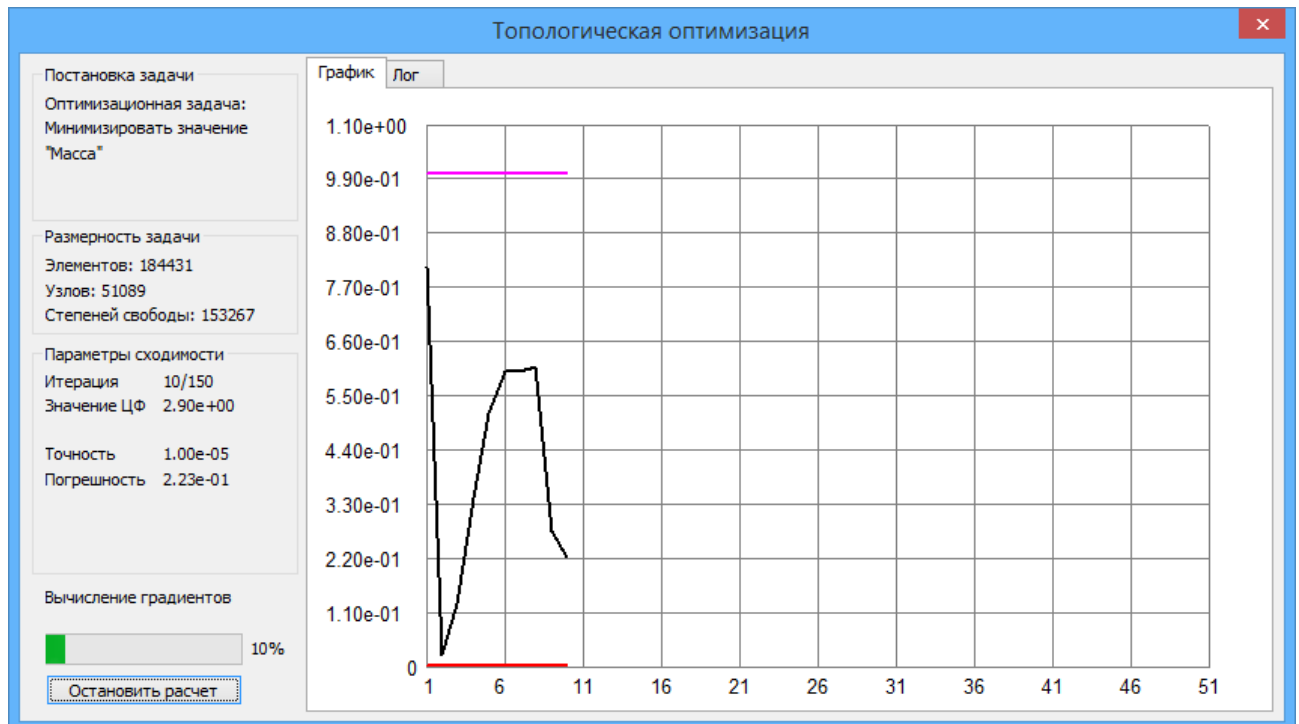


Рис. 4.31. Окно расчёта топологической оптимизации

4.8 Параметры расчёта

При вызове команды **Параметры расчёта** открывается отдельное окно, которое позволяет выбрать параметры сходимости, основными из которых являются: максимальное количество итераций, максимальное изменение проектных переменных, тип оптимизатора (Рис. 4.32).

Штраф – показатель степенной функции метода SIMP, используемого при расчёте топологической оптимизации с помощью метода конечных элементов (заключается в параметризации жесткости конечных элементов, включенных в область проектирования, с помощью так называемых плотностей в элементах).

В поле *Максимальное количество итераций* задаётся максимальное число итераций, которое будет выполнено.

В поле *Максимальное изменение переменных* задаётся такое число, что если максимальное изменение проектных переменных на некоторой итерации будет меньше этого числа, то оптимизация будет завершена.

Для решения доступно два основных *оптимизатора*: NLOPT и ОС.

Метод ОС (метод критерия оптимальности) позволяет решать задачи нахождения максимальной жесткости (минимизация общей энергии деформации с ограничением на объем сверху). В таком случае можно применить только ограничение минимальной толщины и симметрии.

NLOPT – более универсальный метод нелинейной оптимизации, позволяющий наиболее широко использовать возможности топологической оптимизации.

Интервал сохранения результатов позволяет сохранять распределение объемных долей с заданной частотой по итерациям. Если выбрано значение 0, то будет сохранен только оптимальный результат.

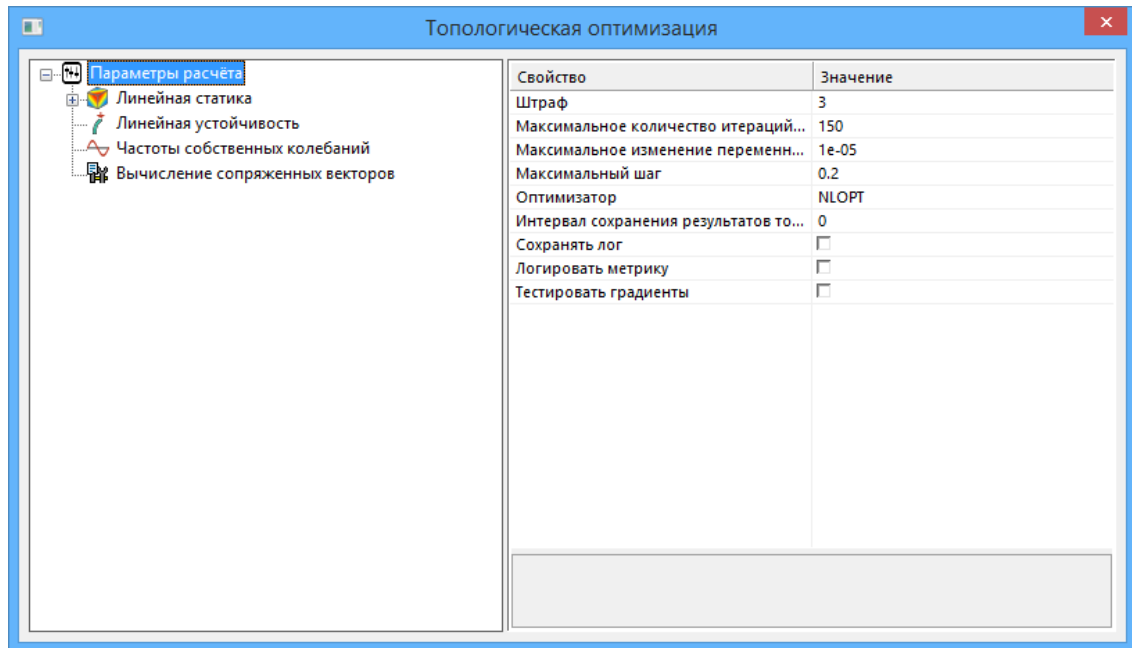



Рис. 4.32. Параметры расчёта топологической оптимизации

Параметры линейной статики и сопряженных векторов позволяют задать параметры решения СЛАУ: метод решения и объем отводимой памяти. Все эти настройки аналогичны настройкам линейного статического расчёта.

При наличии отклика «устойчивость», следует задать настройки вычисления линейной устойчивости. Предпочтительным алгоритмом решения является ПКД(Sparse). В большинстве задач необходимо указать довольно высокую верхнюю границу поиска значений коэффициентов запаса, поскольку при полностью заполненном поле объемных долей конструкция, как правило, обладает высоким уровнем устойчивости.

При наличии отклика «1-ая собственная частота», следует задать настройки вычисления линейной устойчивости. Предпочтительным алгоритмом решения является Ланцош.

4.9 Результаты топологической оптимизации

Для просмотра результатов топологической оптимизации необходимо вызвать команду  **Карта Результатов** панели инструментов *Результаты*. В диалоговом окне *Параметры вывода результатов* выбирается соответствующий тип расчета и тип результатов – *Объемная доля*. В появившемся окне *Параметры отображения* можно выбрать диапазон значений плотности и увидеть соответствующие им изоповерхности (Рис. 4.33). Под изоповерхностью здесь понимается геометрическое место точек с равным значением объемной доли. Функция *Глубина просмотра* позволяет дополнительно исследовать распределение плотности путем построения срезов пространства проектирования.

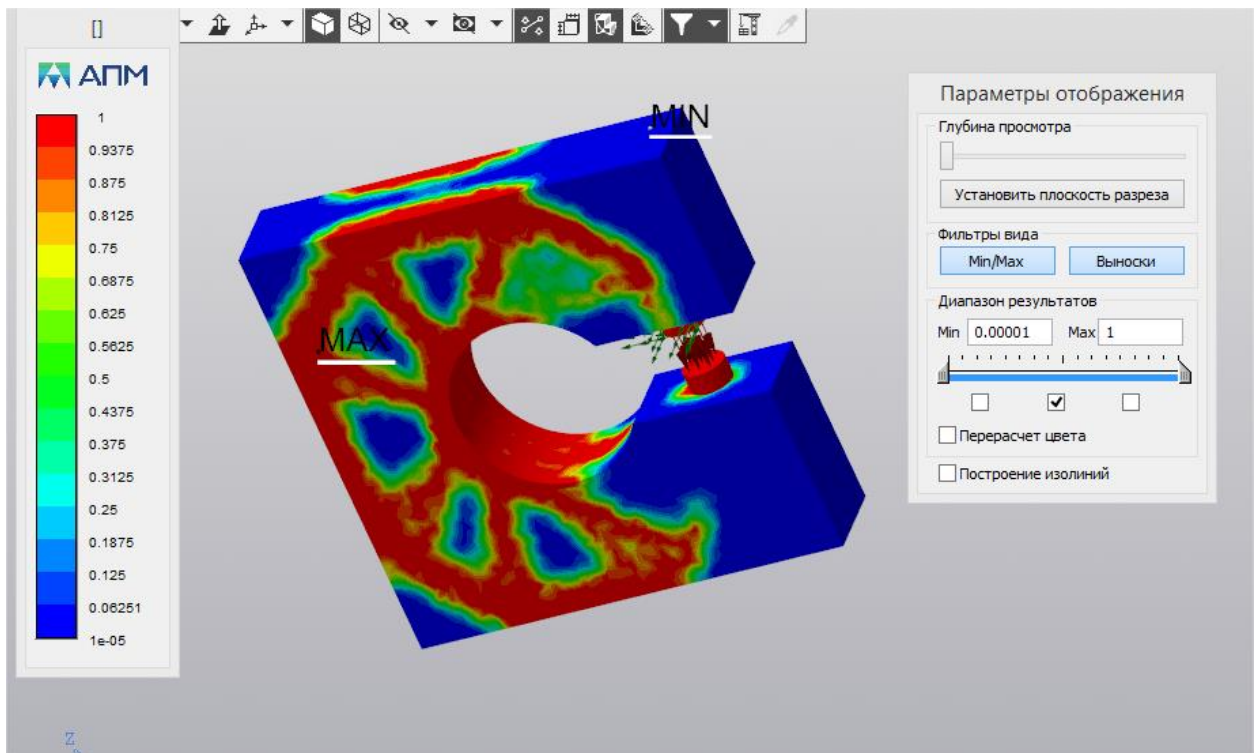


Рис. 4.33. Карта результатов топологической оптимизации

4.10 Поверхность в STL и Поверхность в КОМПАС

С помощью команд **Поверхность в STL** и **Поверхность в КОМПАС** можно произвести постобработку результатов топологической оптимизации. В ходе постобработки на основе текущей открытой карты *Объемной доли* создается полностью новая, сглаженная поверхностная сетка. Эту сетку можно либо сохранить в STL-файл, либо передать в дерево объектов исходной модели КОМПАС-3D.