

APM FEM

Руководство пользователя

APM FEM

Система прочностного анализа для КОМПАС-3D

Версия для КОМПАС-3D v20

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 – 2021 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

Содержание	3
Введение	4
<i>Основные положения</i>	4
<i>Начало работы с APM FEM</i>	4
Глава 1. Интерфейс системы APM FEM	6
1.1 <i>Общий вид APM FEM</i>	6
1.2 <i>Выбор объектов</i>	6
1.3 <i>Задание свойств материала</i>	7
1.4 <i>Особенности расчета деталей и сборок</i>	9
1.5 <i>Панель Параметры</i>	9
1.6 <i>Настройки масштаба изображения стрелок, закреплений и нагрузок</i>	9
1.7 <i>Команды панели Настройки</i>	10
Глава 2. Типы расчетов	11
2.1 <i>Статический расчет</i>	11
2.2 <i>Расчет устойчивости</i>	11
2.3 <i>Расчет частот и форм собственных колебаний</i>	11
2.4 <i>Тепловой расчет</i>	11
2.5 <i>Топологическая оптимизация</i>	11
2.6 <i>Общий порядок расчета модели</i>	12
2.7 <i>Порядок расчета модели при топологической оптимизации</i>	12
Глава 3. Команды APM FEM	13
3.1 <i>Подготовка модели к расчету</i>	13
3.2 <i>Задание свойств объектов модели</i>	30
3.3 <i>Работа с деревом прочностного анализа</i>	33
3.4 <i>Генерация КЭ сетки</i>	34
3.5 <i>Выполнение расчета</i>	36
3.6 <i>Параметры расчета</i>	37
3.7 <i>Результаты расчета</i>	40
Глава 4. Расчет топологической оптимизации конструкций	49
4.1 <i>Добавление, редактирование и удаление откликов</i>	49
4.2 <i>Добавление, редактирование и удаление конструктивных ограничений</i>	55
4.3 <i>Задание области проектирования</i>	58
4.4 <i>Добавление, редактирование и удаление целевой функции</i>	59
4.5 <i>Добавление, редактирование и удаление ограничения</i>	60
4.6 <i>Добавление, редактирование и удаление оптимизационной задачи</i>	61
4.7 <i>Расчёт</i>	62
4.8 <i>Параметры расчёта</i>	63
4.9 <i>Результаты топологической оптимизации</i>	64
4.10 <i>Поверхность в STL и Поверхность в КОМПАС</i>	64

Введение

Основные положения

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 проводится автоматически.

APM FEM позволяет провести 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.

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).

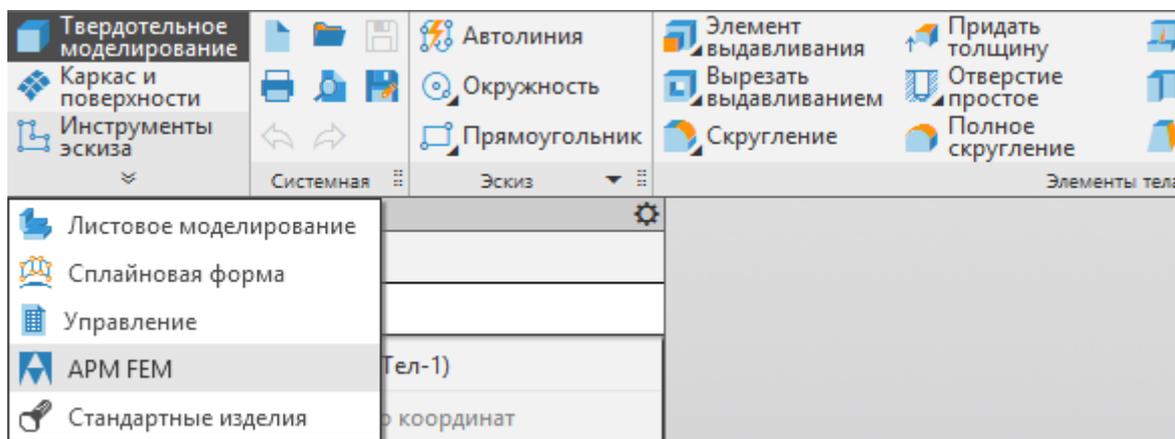


Рис. 1.1. Развёрнутый список инструментальных панелей

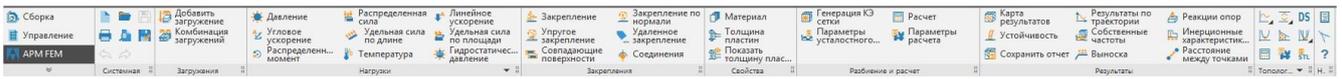


Рис. 1.2. Инструментальная панель APM FEM: Прочностной анализ

Перед началом работы с библиотекой APM FEM рекомендуется перестроить модель (клавиша F5).

Глава 1. Интерфейс системы *APM FEM*

1.1 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. 1.3:

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

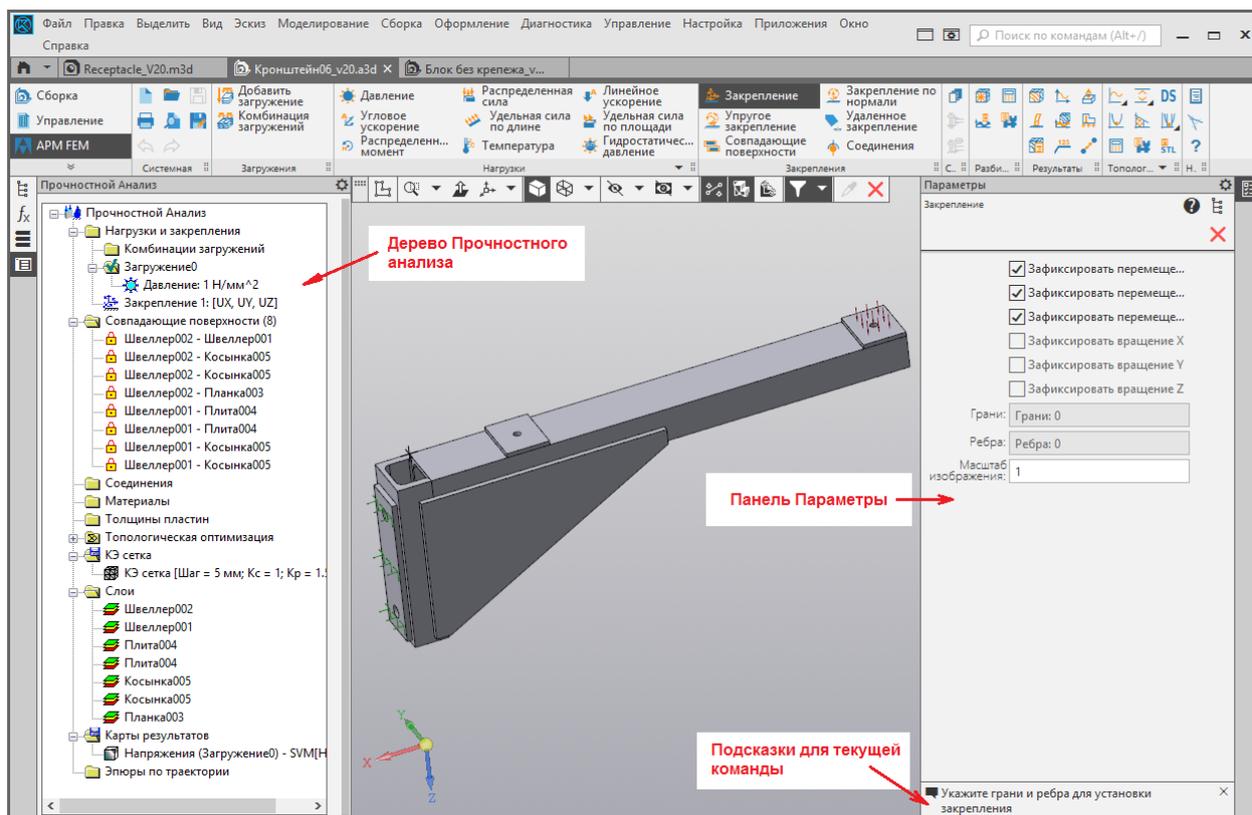


Рис. 1.3. Интерфейс *APM FEM*

1.2 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. При выборе объектов следует учитывать вид указателя мыши для граней и ребер (Рис. 1.4). Цвет выбранных граней и ребер станет красным, а на панели свойств будет указано общее количество объектов, к которым приложена нагрузка или задано закрепление (Рис. 1.5).

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

Для снятия выделения необходимо щелкнуть по объекту повторно.

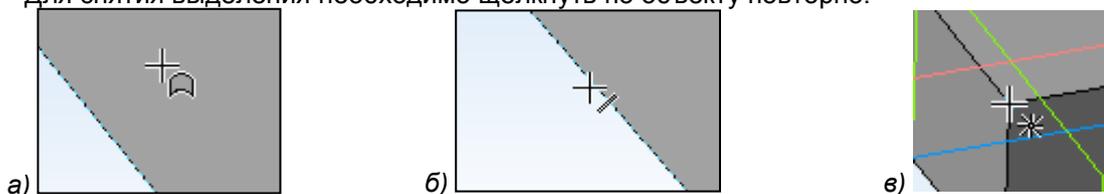


Рис. 1.4. Вид указателя мыши при выборе грани (а), ребра (б), узла (в)

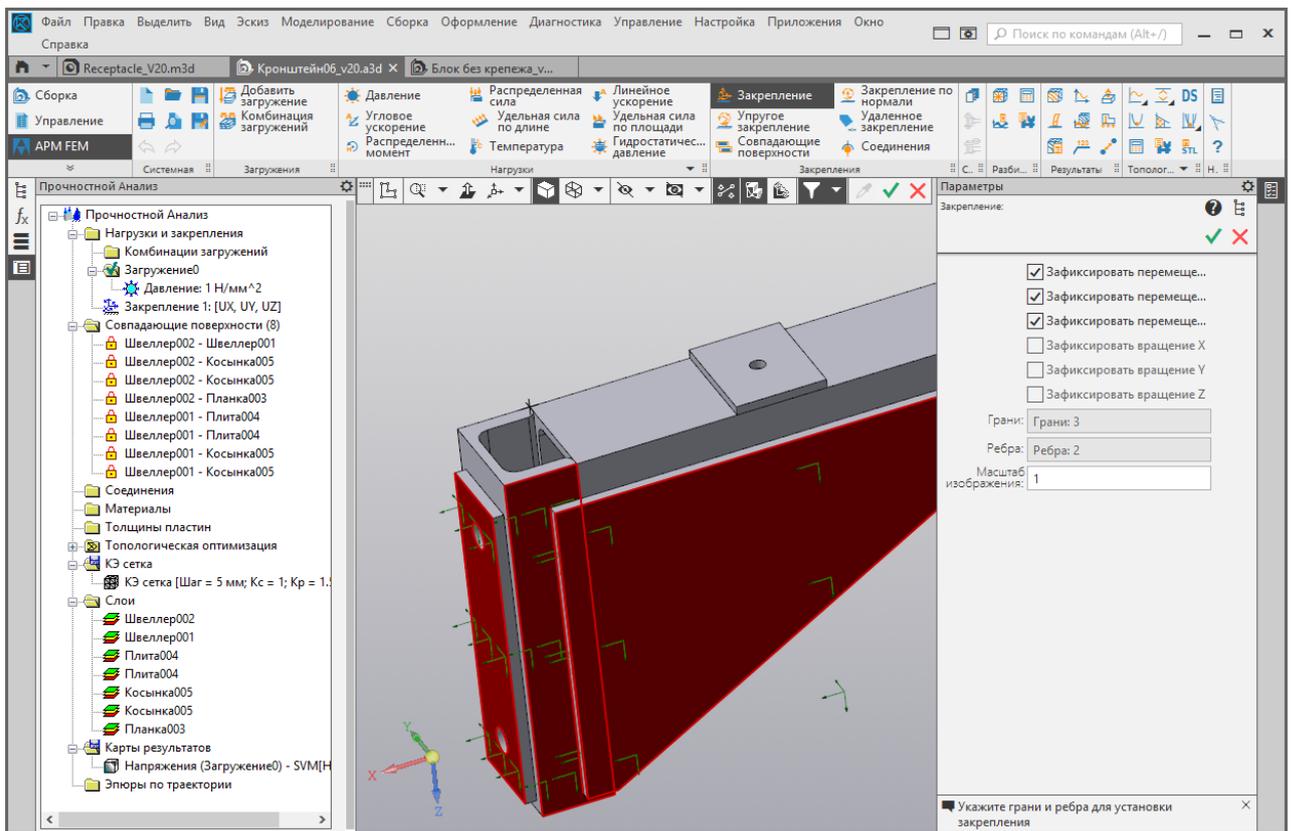


Рис. 1.5. Пример выбора граней для задания закреплений

1.3 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/(мС));*
- *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 (см. п. 3.4), появляется предупреждение (Рис. 1.6) со списком этих деталей.

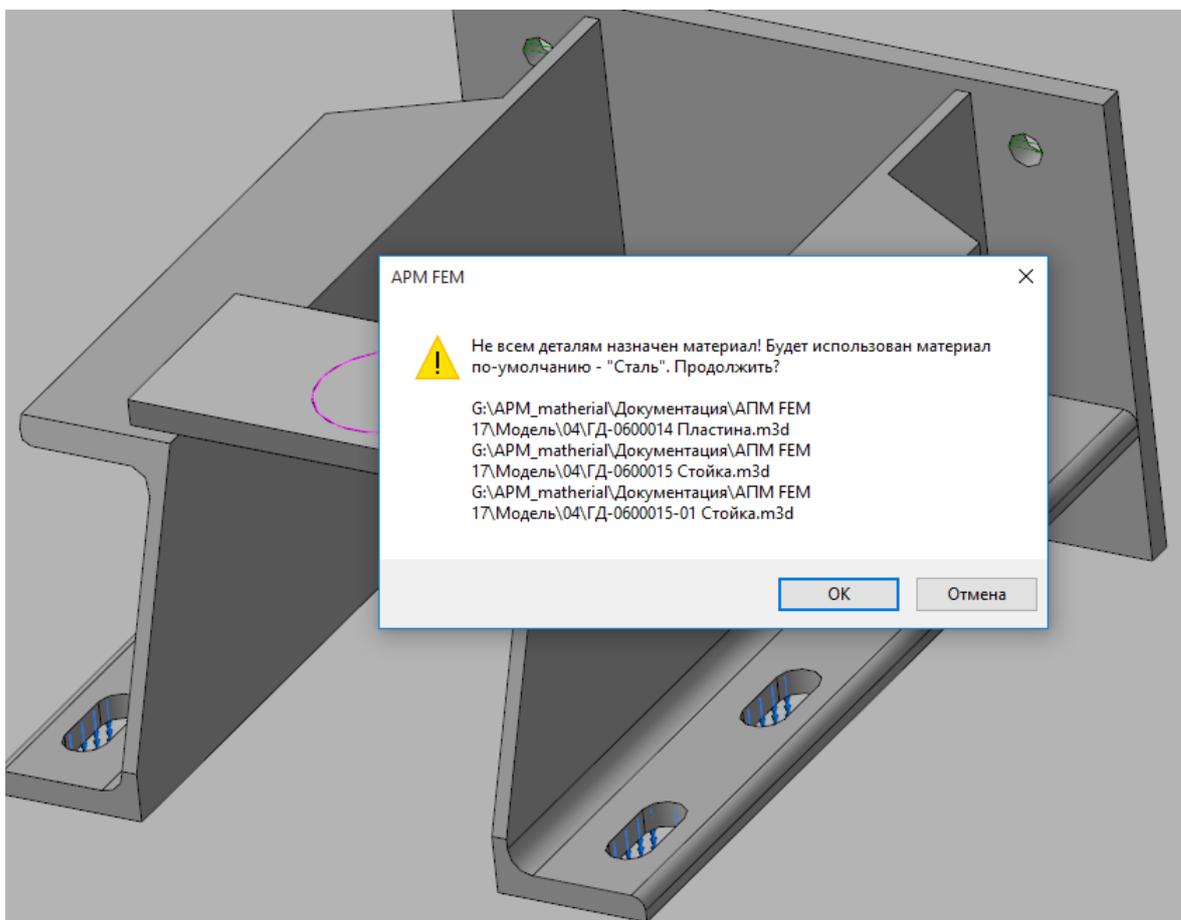


Рис. 1.6. Предупреждение о том, что перечисленным деталям не задан материал из библиотеки

При нажатии кнопки *ОК* 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 (см. Рис. 1.6) 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).

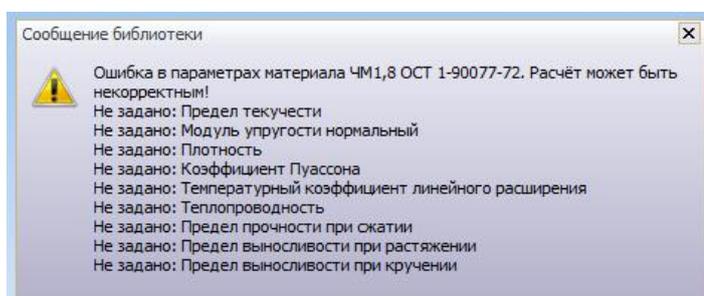


Рис. 1.7. Предупреждение о том, что перечисленные свойства материала не заданы в библиотеке

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.

1.4 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).

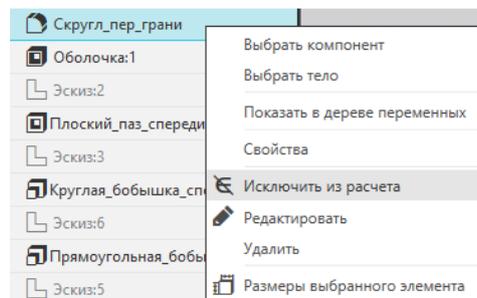


Рис. 1.8. Исключение из расчета

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.

1.5 Панель Параметры

Для задания параметров команд используется Панель параметров КОМПАС-3D. По умолчанию, панель параметров расположена на отдельной вкладке рядом с деревом операций, но для удобства эту панель можно «вытащить» и установить в удобном месте. (Рис. 1.3).

Задание нагрузки осуществляется в глобальной системе координат или по нормали к поверхности. Для изменения направления знака на противоположное необходимо изменить знак перед значением на противоположный. При этом истинное направление действия нагрузки отобразится на 3D-модели.

Для завершения ввода значений параметров нажмите кнопку  (Ctrl+Enter).

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

1.6 Настройки масштаба 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.

1.7 Команды панели Настройки

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

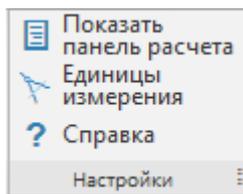


Рис. 1.9. Панель инструментов Настройки

 **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, сохранённые в этом файле.

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

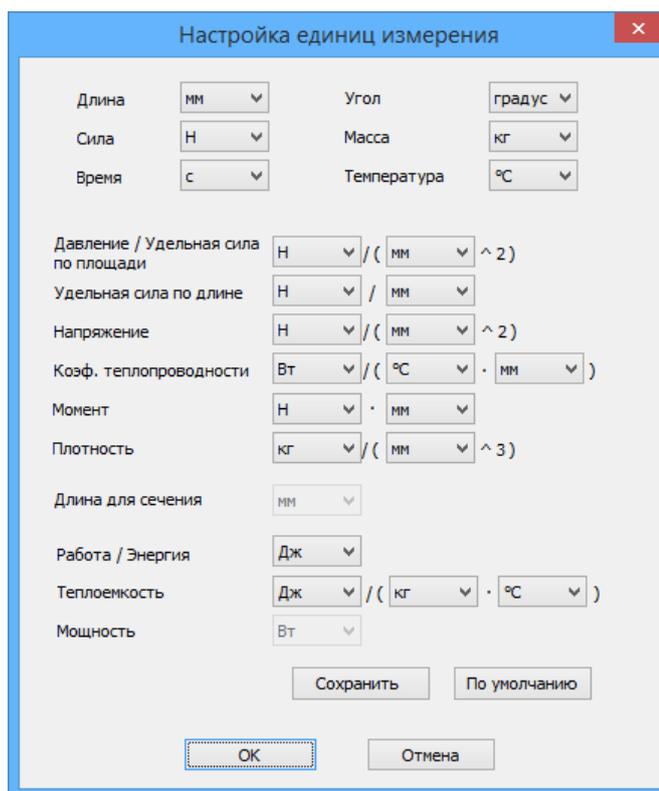


Рис. 1.10. Настройка единиц измерения

 **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, проводится 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 команду *Исключить из расчета (Включить в расчет)* для соответствующего объекта. Эту возможность можно использовать для вариации расчетных моделей.

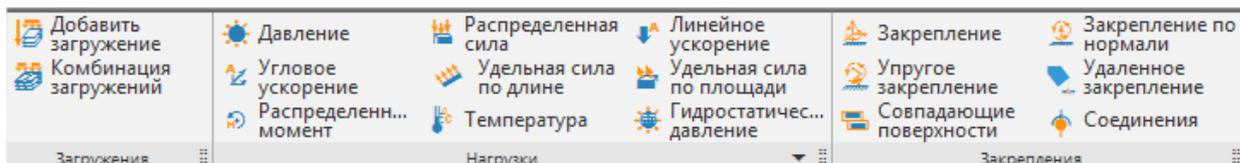


Рис. 3.1. Панели инструментов *Загрузки*, *Нагрузки* и *Закрепления*

 **Добавить загрузку** – команда добавляет новое загрузку. В папку *Нагрузки и закрепления* дерева прочностного анализа добавляется подпапка загрузка 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.

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

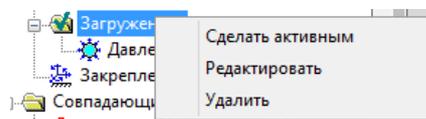


Рис. 3.2. Контекстное меню папки загрузка

При выборе команды *Редактировать* вызывается диалог *Загрузка* (Рис. 3.3) в котором можно задать название загрузка и множитель собственного веса. Множитель собственного веса - коэффициент, с которым собственный вес всей модели добавится к выбранному загрузка при расчете этого загрузка. По умолчанию равен 0. Необходимо учитывать, что вектор силы тяжести будет направлен против оси Z глобальной системы координат.

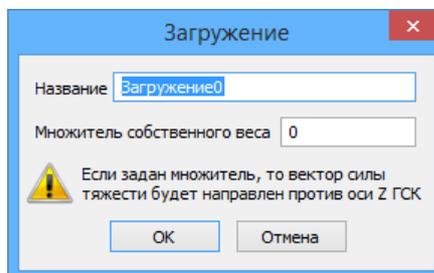


Рис. 3.3. Диалог *Загрузка*

 **Комбинация загрузок** – команда вызывает диалог *Комбинация загрузок* (Рис. 3.4). Комбинация загрузок представляет собой линейную комбинацию одновременно действующих загрузок. Возможно создание нескольких комбинаций загрузок.

В диалоговом окне можно задать название для создаваемой комбинации загрузок. Чтобы добавить загрузка в комбинацию, выберите его в выпадающем списке загрузок, задайте для него множитель и нажмите кнопку *Добавить*. Чтобы удалить загрузка из комбинации загрузок

ний, выберите требуемое загрузие в списке добавленных загрузий и нажмите кнопку *Удалить выбранное загрузие*.

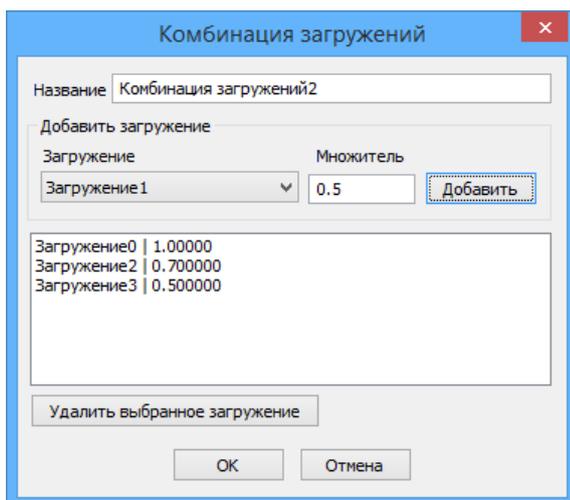


Рис. 3.4. Диалог Комбинация загрузий

После нажатия кнопки *ОК* созданная комбинация загрузий будет добавлена в папку *Комбинации загрузий*. При щелчке правой кнопкой мыши на объекте *Комбинация загрузий* в дереве вызывается контекстное меню (Рис. 3.5), в котором можно удалить или отредактировать выбранную комбинацию.

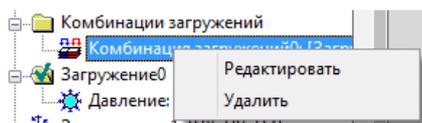


Рис. 3.5. Контекстное меню объекта Комбинация загрузий

 **Давление** – выбрав данную команду, Вы сможете приложить равномерно распределенное давление по нормали к поверхностям трехмерной модели.

Укажите поверхности, к которым будет приложено давление. После чего выбранная поверхность будет занесена в список граней, будет выделена цветом и, кроме того, на ней отрисуются стрелки красного цвета, указывающие направление действующего давления (Рис. 3.6).

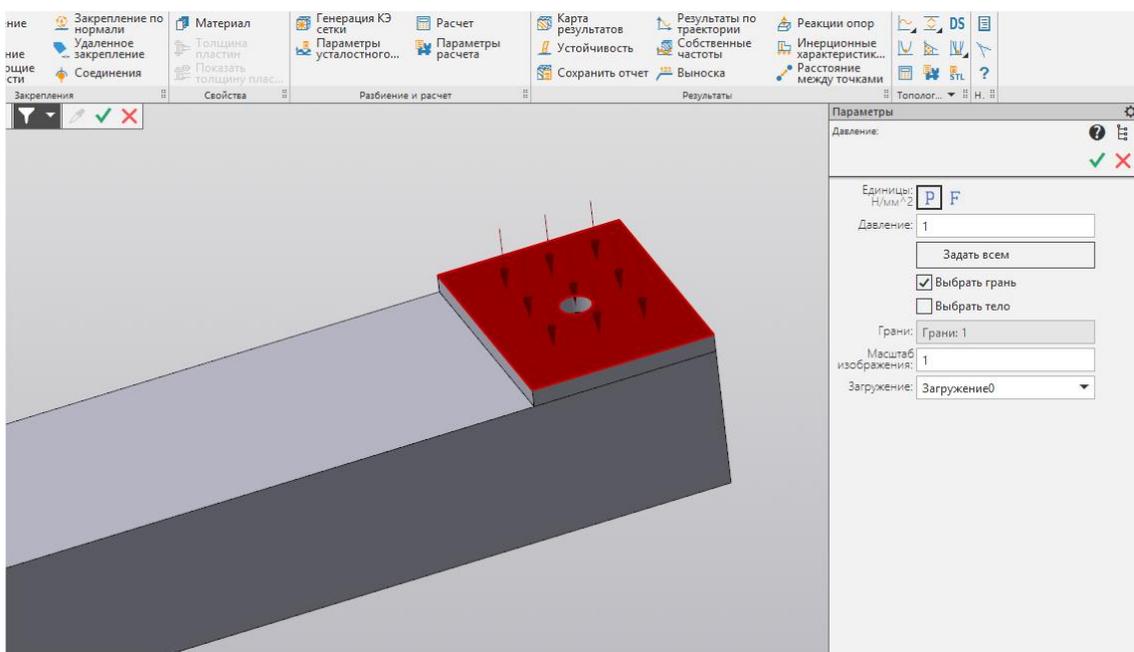


Рис. 3.6. Указание поверхности, на которую будет приложено давление

В случае, если такое же давление действует и на другие поверхности, целесообразно их добавить в список граней, аналогично тому, как это было сделано для первой поверхности.

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.

Заключительным этапом является указание значения давления, действующего на поверхность. Для этого необходимо ввести с клавиатуры числовое значение в поле рядом с надписью *Давление*. Значение нагрузки может быть задано как в виде давления, как это предлагается сделать на Рис. 3.6, так и в виде величины силы, действующей на данную грань. Для этого необходимо выбрать кнопку *P* или *F*.

При выборе способа ввода давления через силу (*F*) 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.

Важно помнить, что давление всегда моделируется как сила, действующая на выбранную поверхность и направленная по нормали к каждой точке поверхности.

Для того, чтобы убрать из списка граней ранее выбранную поверхность, выделение с нее нужно снять. Для этого нужно подвести указатель мыши к интересующей грани в рабочем окне редактора и нажать один раз левую кнопку мыши.

Чтобы поместить нагрузку в требуемое загрузке, выберите это загрузке из выпадающего списка. По умолчанию нагрузка помещается в активное загрузке.



Распределенная сила – выбрав данную команду, Вы сможете приложить равномерно распределенную силу к грани или ребру трехмерной модели (Рис. 3.7).

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. Длина вектора определится автоматически.

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

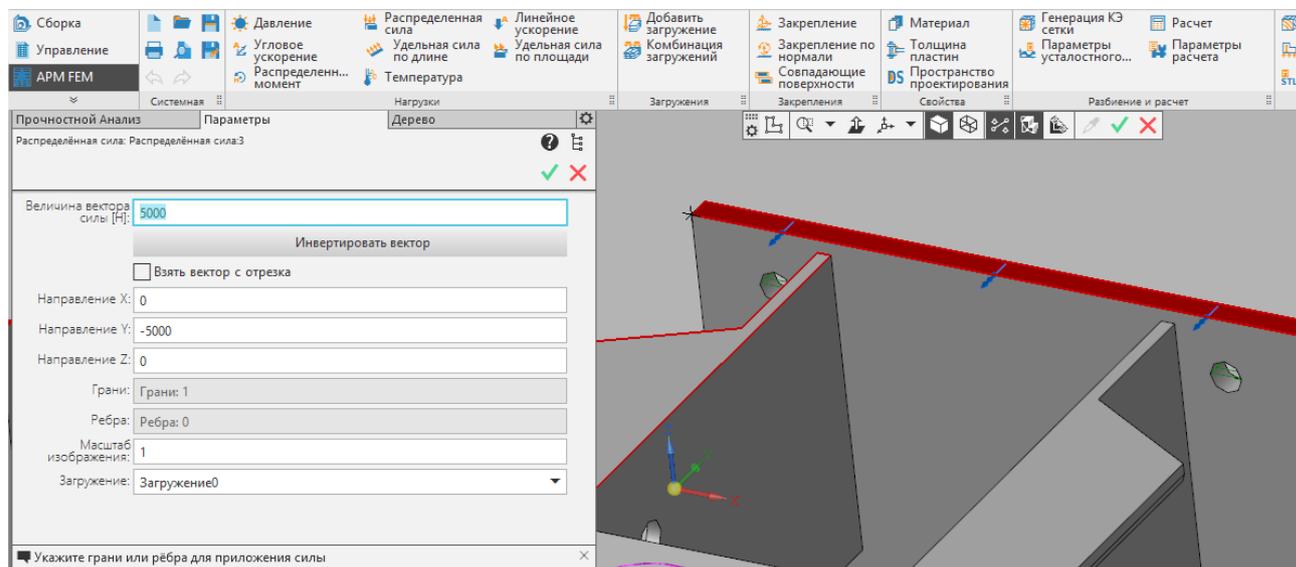


Рис. 3.7. Задание распределенной силы

В случае, если распределенная сила действует на разные поверхности, целесообразно их добавить в список граней, аналогично тому, как это было сделано для первой поверхности. При этом введенное значение силы будет задано на все выбранные грани или ребра равномерно. Такой подход позволяет с помощью одной команды задать суммарную нагрузку на группу разных по длине ребер (площади граней).

Для того, чтобы убрать из списка ранее выбранную грань (ребро) необходимо ещё раз щелкнуть на эту грань (ребро).

Чтобы поместить нагрузку в требуемое загрузке, выберите это загрузке из выпадающего списка. По умолчанию нагрузка помещается в активное загрузке.

 **Линейное ускорение** – данная команда вызывает диалоговое окно для задания вектора линейного ускорения. Значение линейного ускорения вводится в поля X, Y, Z, соответствующие проекциям в глобальной системе координат. Задать направление действия линейного ускорения можно по ребру или отрезку. Для этого необходимо выбрать опцию "Взять вектор с отрезка" и указать соответствующее ребро или отрезок. Кнопка "Инвертировать вектор" позволяет изменить направление вектора на противоположное.

Длина вектора определится автоматически. Ускорение действует на всю конструкцию. Вектор ускорения изображается красной стрелкой в точке (0; 0; 0).

С помощью данной команды также можно задать ускорение свободного падения и, таким образом, учесть действие силы тяжести. Например (Рис. 3.8), линейное ускорение задано по оси Z вверх, и в ту же сторону будет действовать эквивалентная ей сила тяжести.

Чтобы поместить нагрузку в требуемое загрузке, выберите это загрузке из выпадающего списка. По умолчанию нагрузка помещается в активное загрузке.

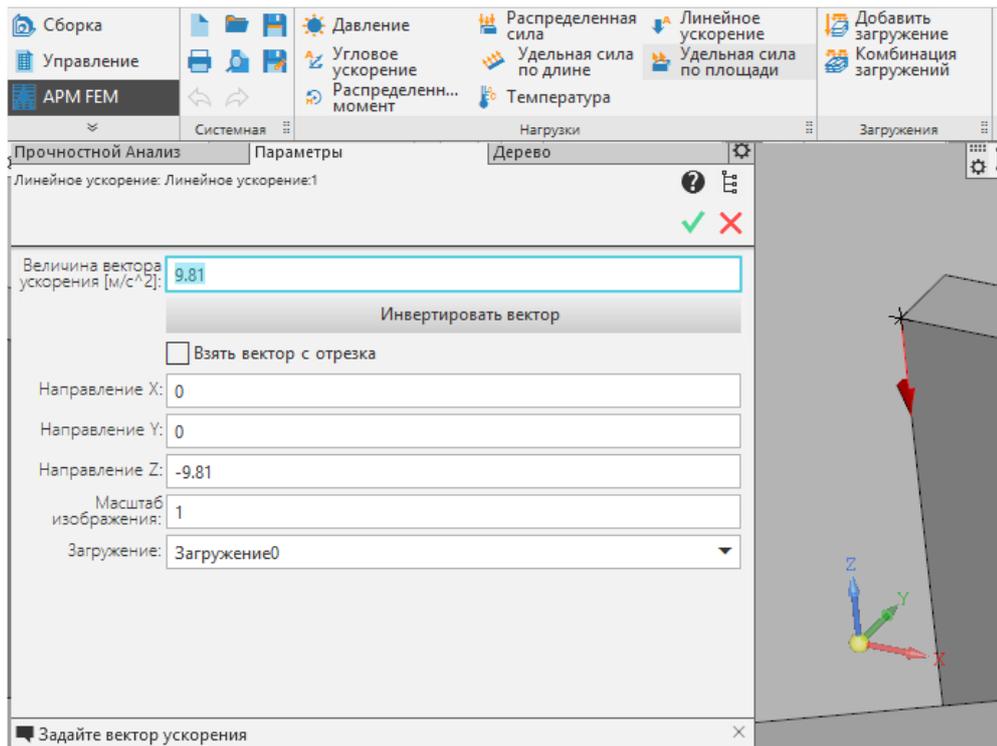


Рис. 3.8. Задание линейного ускорения

 **Угловое ускорение** – данная команда позволяет задать угловую скорость и угловое ускорение (Рис. 3.9).

Точка отсчета и Направление задаются в 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.

Чтобы поместить нагрузку в требуемое загрузке, выберите это загрузке из выпадающего списка. По умолчанию нагрузка помещается в активное загрузке.

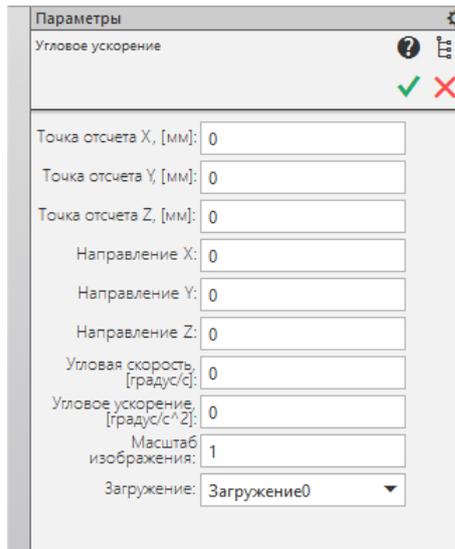


Рис. 3.9. Задание угловой скорости и углового ускорения



Удельная сила по длине - выбрав данную команду, Вы сможете приложить равномерно распределенную силу к ребру трехмерной модели. Укажите ребра, к которым будет приложена сила (Рис. 3.10).

В случае, если такая же сила действует и на другие ребра, целесообразно их добавить в список ребер, аналогично тому, как это было сделано для первого ребра.

Заключительным этапом является указание значения действующей силы и её направление в пространстве. Для этого достаточно ввести проекции этой силы по осям X, Y, и Z в глобальной системе, тем самым, задав как значение, так и направление действия силы. Задание первой проекции по любой из осей приведет к появлению на выделенных ребрах стрелок, показывающих направление действия силы в данном конкретном случае.

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.

Чтобы поместить нагрузку в требуемое загрузие, выберите это загрузие из выпадающего списка. По умолчанию нагрузка помещается в активное загрузие.

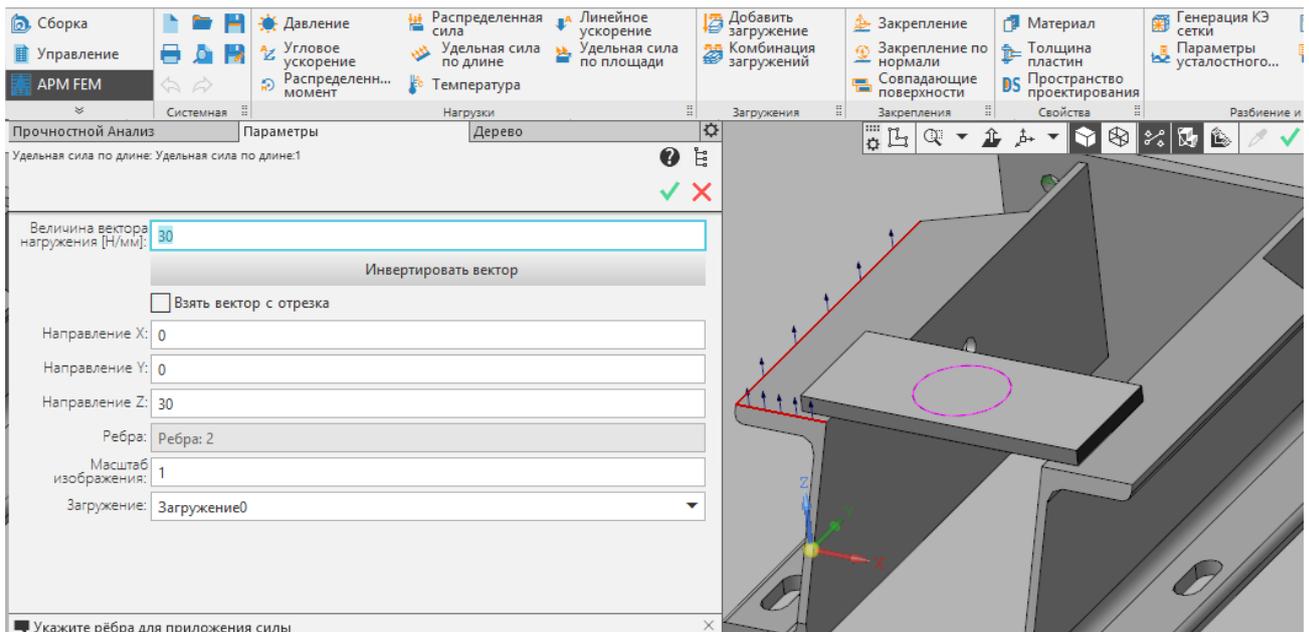


Рис. 3.10. Задание удельной силы по длине

 **Удельная сила по площади** – выбрав данную команду, Вы сможете приложить равномерную *удельную силу по площади* к поверхности трехмерной модели. Задание данной нагрузки аналогично заданию *Распределенной силы*, только значение удельной силы вводится в Н/мм².

 **Распределенный момент** - выбрав данную команду, Вы сможете приложить равномерный момент *по площади* к поверхности(ям) трехмерной модели, либо по длине к ребру(ам) (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 центра масс выбранных поверхностей или ребер.

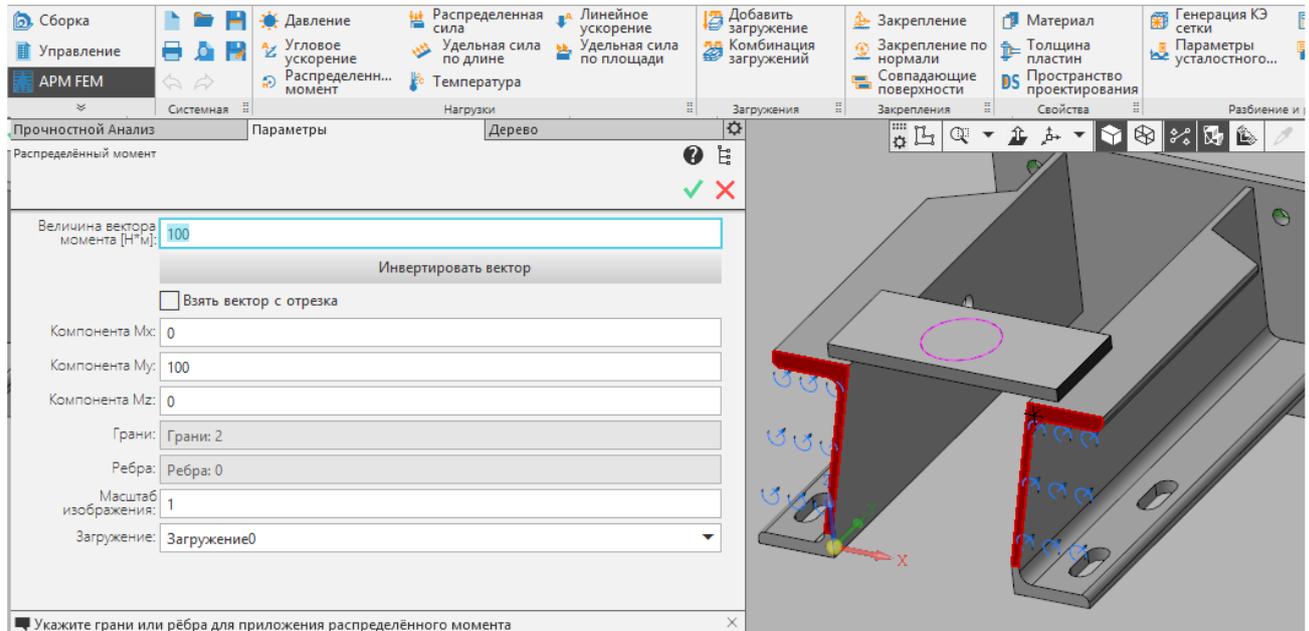


Рис. 3.11. Задание распределенного момента к поверхностям (рёбрам)

Необходимо указать те грани или ребра, к которым будет приложен распределенный момент.

Заключительным этапом является указание значения действующего момента и вектора его направления в пространстве. Для этого достаточно ввести проекции вектора этого момента по осям X, Y, и Z в глобальной системе, тем самым, задав как значение, так и направление действия вектора момента. Задание первой проекции по любой из осей приведет к появлению на выделенных ребрах стрелок, показывающих направление действия вектора момента в данном конкретном случае.

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

Чтобы поместить нагрузку в требуемое загрузке, выберите это загрузке из выпадающего списка. По умолчанию нагрузка помещается в активное загрузке.

 **Температура** - выбрав данную команду, Вы сможете приложить равномерно распределенную температуру к ребру, к поверхности и к узлу ранее созданной трехмерной модели (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.

Укажите поверхности, ребра, узлы или детали целиком, к которым будет приложена температура, и введите числовое значение действующей температуры в градусах Цельсия.

Чтобы поместить нагрузку в требуемое загрузке, выберите это загрузке из выпадающего списка. По умолчанию нагрузка помещается в активное загрузке.

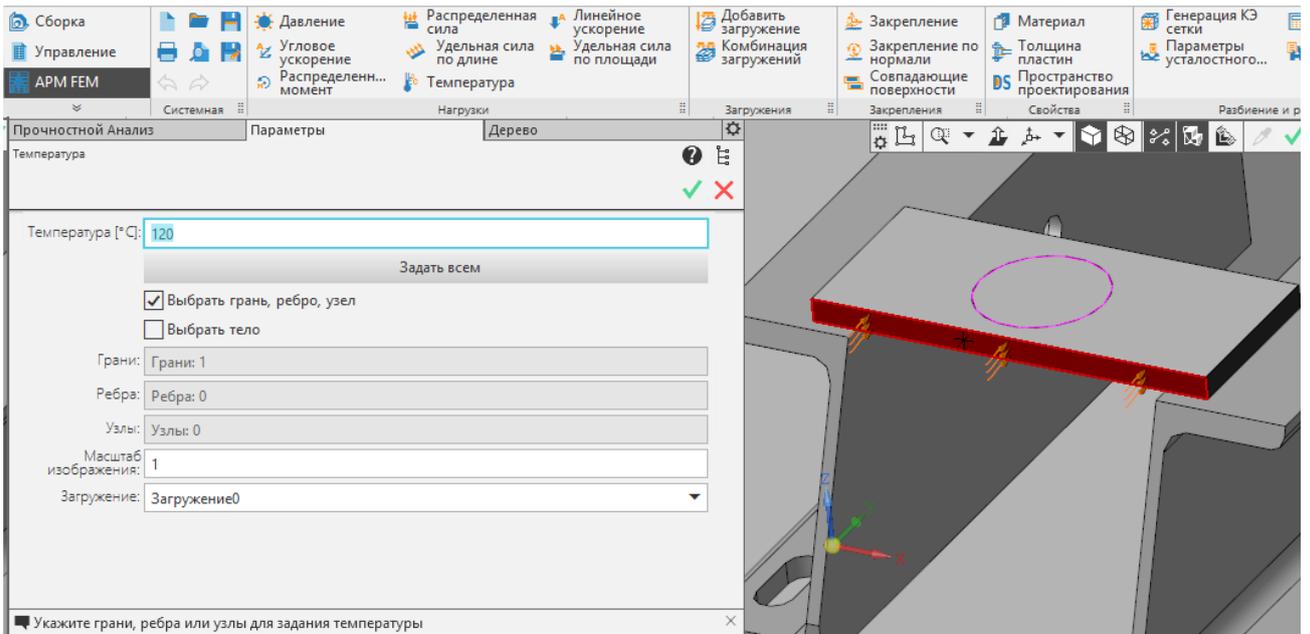


Рис. 3.12. Задание температуры



Гидростатическое давление - выбрав данную команду, Вы сможете приложить гидростатическое давление к поверхности трехмерной модели (Рис. 3.13).

Необходимо задать плотность жидкости в поле "Плотность".

Значение линейного ускорения вводится в поля X, Y, Z, соответствующие проекциям в глобальной системе координат. Задать направление действия линейного ускорения можно по ребру или отрезку. Для этого необходимо выбрать опцию "Взять вектор с отрезка" и указать соответствующее ребро или отрезок. Длина вектора определится автоматически. Также длину можно задать в поле "Величина вектора ускорения".

Координаты точки свободной поверхности задаются в соответствующих полях. Также можно через команду "Указать вершину" выбрать вершину на модели. Для точки свободной поверхности можно указать начальное давление, которое по умолчанию равно 0. Далее необходимо указать те грани, к которым будет приложено гидростатическое давление.

Чтобы поместить нагрузку в требуемое загрузке, выберите это загрузке из выпадающего списка. По умолчанию нагрузка помещается в активное загрузке.

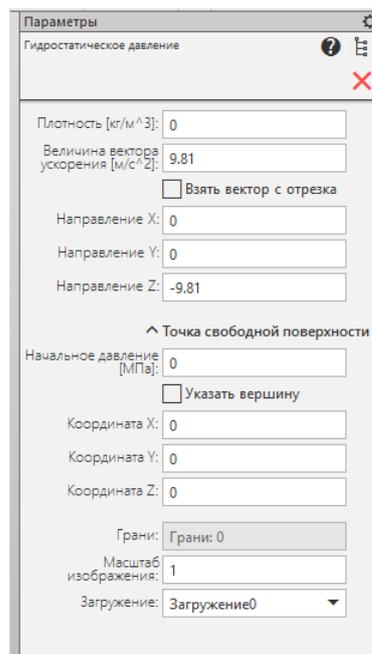


Рис. 3.13. Задание гидростатического давления

 **Подшипниковая нагрузка** - выбрав данную команду, Вы сможете задать подшипниковую нагрузку (Рис. 3.14). Подшипниковая нагрузка предназначена для вычисления контактных усилий от действия радиальной силы на подшипник.

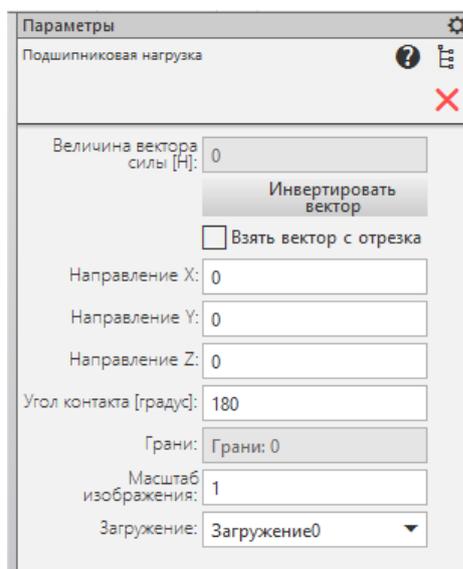


Рис. 3.14. Задание подшипниковой нагрузки

Значение радиальной силы вводится в поля X, Y, Z, соответствующие проекциям в глобальной системе координат. Задать направление действия силы 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. Длина вектора определится автоматически. Также длину можно задать в поле "Величина вектора силы".

"Угол контакта" - угол контакта ψ подшипника с валом. По умолчанию угол контакта ψ составляет 180 градусов (Рис. 3.15, а). Если угол контакта ψ меньше 180 градусов, то это подразумевает наличие зазора (Рис. 3.15, б). Угол контакта ψ больше 180-ти градусов не поддерживается.

Далее необходимо указать грани для подшипниковой нагрузки. Выбирать можно только грани цилиндрической формы.

Чтобы поместить нагрузку в требуемое загружение, выберите это загружение из выпадающего списка. По умолчанию нагрузка помещается в активное загружение.

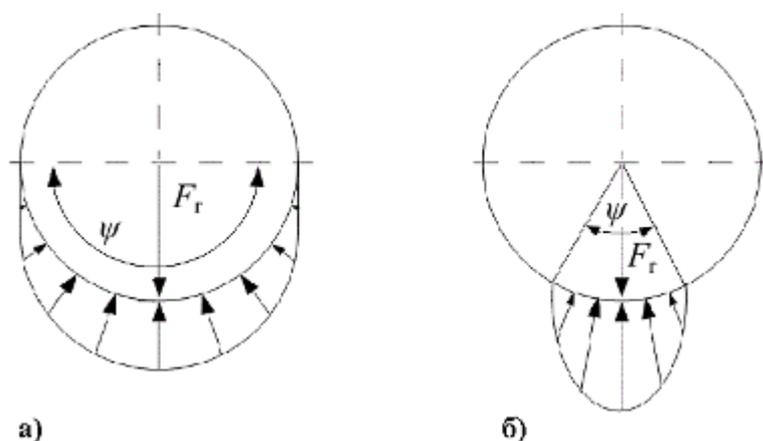


Рис. 3.15. Варианты угла контакта подшипника с валом

 **Удаленная сила** - выбрав данную команду, Вы сможете приложить удаленную силу 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. Длина (суммарная величина) вектора определится автоматически.

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

Чтобы поместить нагрузку в требуемое загрузие, выберите это загрузие из выпадающего списка. По умолчанию нагрузка помещается в активное загрузие.

The image shows a software dialog box titled "Параметры" (Parameters) with a sub-header "Удаленная сила" (Remote force). The dialog contains several input fields and controls:

- Величина вектора силы, [Н]:** 1000
- Направление X:** 0
- Направление Y:** 0
- Направление Z:** -1000
- Задать на**
- Грани:** Грани: 2
- Ребра:** Ребра: 0
- Масштаб изображения:** 5
- Характер приложения:** Деформируемый (dropdown menu)
- Указать положение**
- Координата X:** -91
- Координата Y:** -25
- Координата Z:** -100
- Загрузие:** Загрузие0 (dropdown menu)

Рис. 3.16. Задание удаленной силы



Сосредоточенная масса - выбрав данную команду, Вы сможете приложить сосредоточенную массу к граням или ребрам трехмерной модели (Рис. 3.17).

Для задания массы необходимо ввести с клавиатуры значение в поле *Масса*. При необходимости можно задать моменты инерции по осям глобальной системы координат в соответствующих полях.

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

Для задания положения сосредоточенной массы необходимо ввести 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.

Чтобы поместить нагрузку в требуемое загрузие, выберите это загрузие из выпадающего списка. По умолчанию нагрузка помещается в активное загрузие.

Внимание! Сосредоточенная масса будет учитываться только в расчете собственных частот!

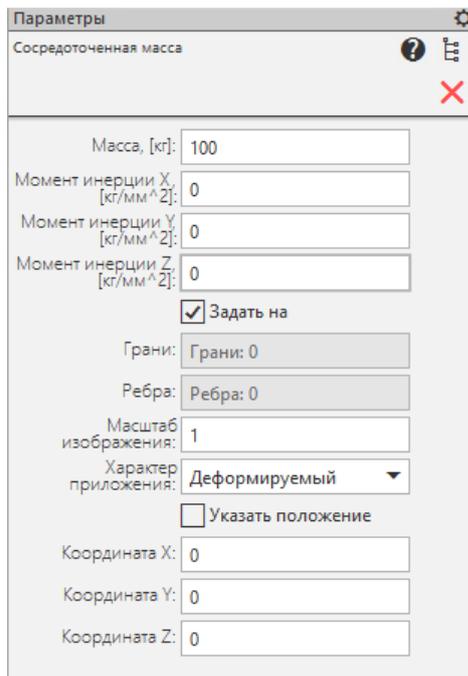


Рис. 3.17. Задание сосредоточенной массы

 **Закрепление** - выбрав данную команду, Вы сможете установить закрепление к ребру и к поверхности трехмерной модели (Рис. 3.18).

Укажите поверхности и ребра, на которые будут установлены закрепления.

Заключительным этапом является указание, в каком направлении запретить перемещения, и вокруг какой оси глобальной системы координат запретить поворот для ранее выбранных ребер и поверхностей.

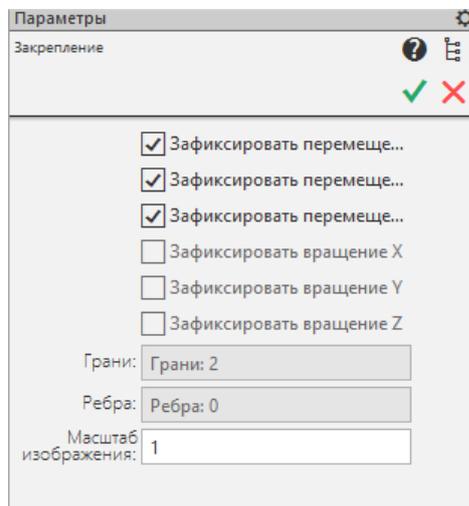


Рис. 3.18. Задание закреплений

 **Закрепление по нормали** - выбрав данную команду, Вы сможете установить закрепление по нормали к поверхностям трехмерной модели. С помощью этого вида закреплений можно моделировать опоры типа подшипник (Рис. 3.19).

Укажите поверхности, на которые будут установлены закрепления. Перемещения по нормали к этим поверхностям будут запрещены.

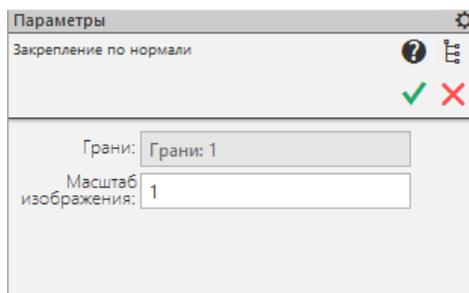


Рис. 3.19. Задание закрепления по нормали

Если на грань уже задано упругое закрепление, то задать на эту же грань закрепление по нормали нельзя, о чем будет выдано соответствующее сообщение (Рис. 3.20).

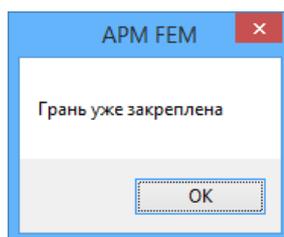


Рис. 3.20. Сообщение об ошибке выбора поверхности закрепления



Упругое закрепление - выбрав данную команду, Вы сможете установить упругое закрепление к поверхностям трехмерной модели (Рис. 3.21).

Необходимо задать жесткость, отнесенную к площади грани на которую она задается, в соответствующем поле.

Укажите поверхности, на которые будет установлено упругое закрепление.

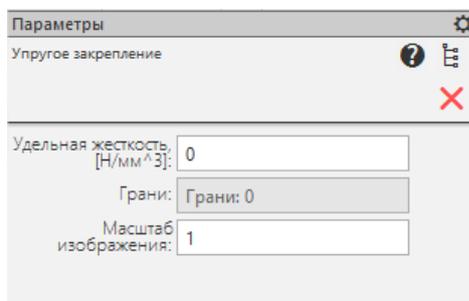


Рис. 3.21. Задание упругого закрепления

Поскольку упругое закрепление действует по нормали к поверхности, то его задание на грань исключает 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 сообщение (Рис. 3.20).



Удаленное закрепление - выбрав данную команду, Вы сможете установить удалённое закрепление к ребру и к поверхности трехмерной модели (Рис. 3.22)

Необходимо указать грани или ребра, на которые будут установлены закрепления. Для того, чтобы убрать из списка ранее выбранную грань (ребро) необходимо ещё раз щелкнуть на эту грань (ребро).

Для задания точки приложения удалённого закрепления 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.

Далее следует указать, в каком направлении запретить перемещения, и вокруг какой оси глобальной системы координат запретить поворот относительно точки приложения удалённого закрепления.

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

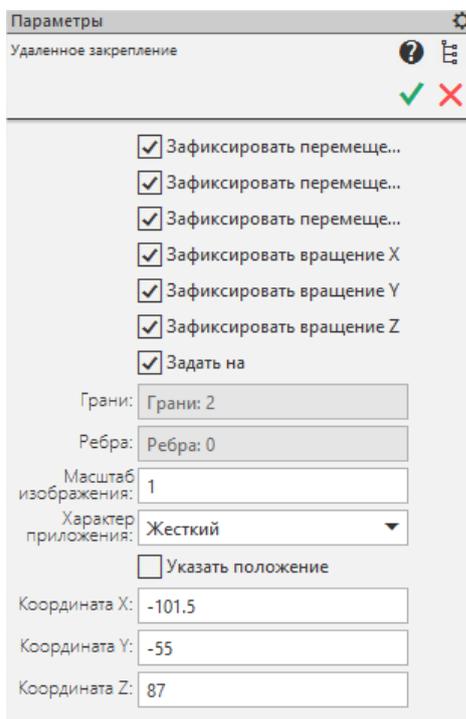


Рис. 3.22. Задание удаленного закрепления



Совпадающие поверхности – команда осуществляет автоматический поиск и ручное задание совпадающих граней соприкасающихся деталей в сборке.

Нажатие кнопки «Автопоиск» в окне «Совпадающие поверхности» запускает автоматический поиск совпадающих поверхностей, как это было сделано в более ранних версиях (Рис. 3.23).

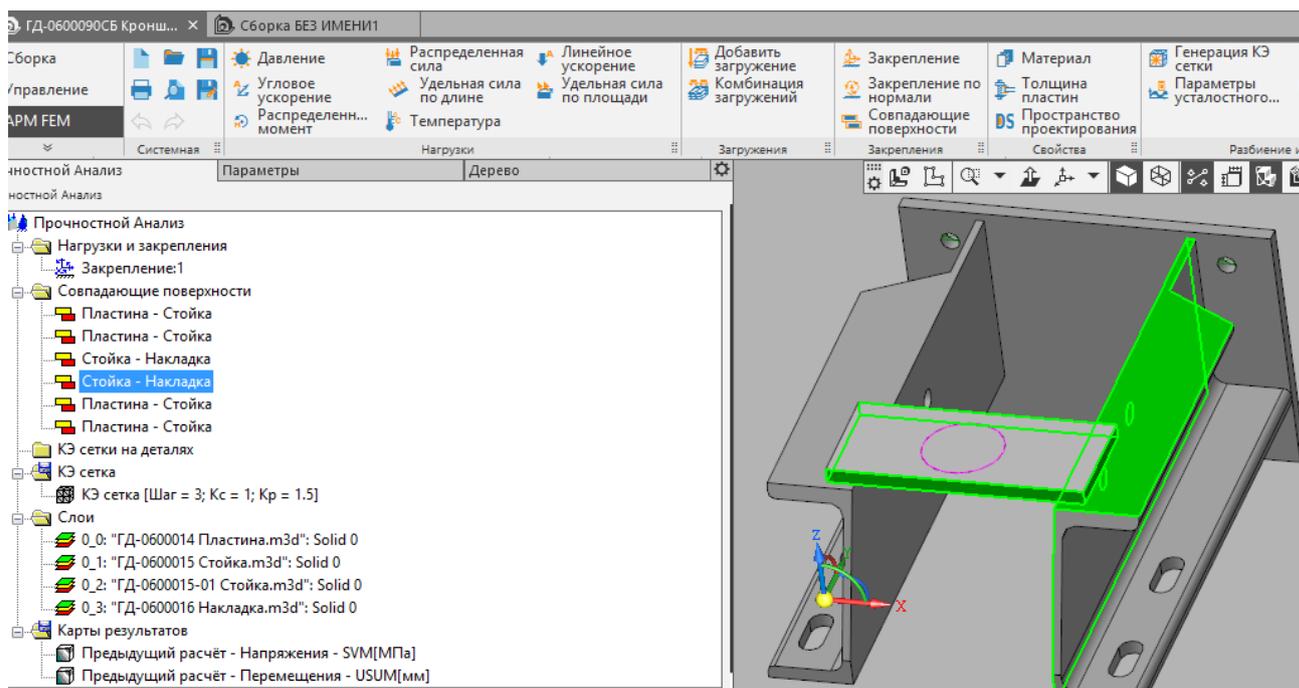


Рис. 3.23. Совпадающие грани, определенные автоматически

После автоматического поиска все совпадающие грани будут размещены в дереве прочностного анализа. При выборе в дереве они подсвечиваются на самой модели (Рис. 3.23). Таким образом, можно проконтролировать и отредактировать любую из автоматически созданных совпадающих граней.

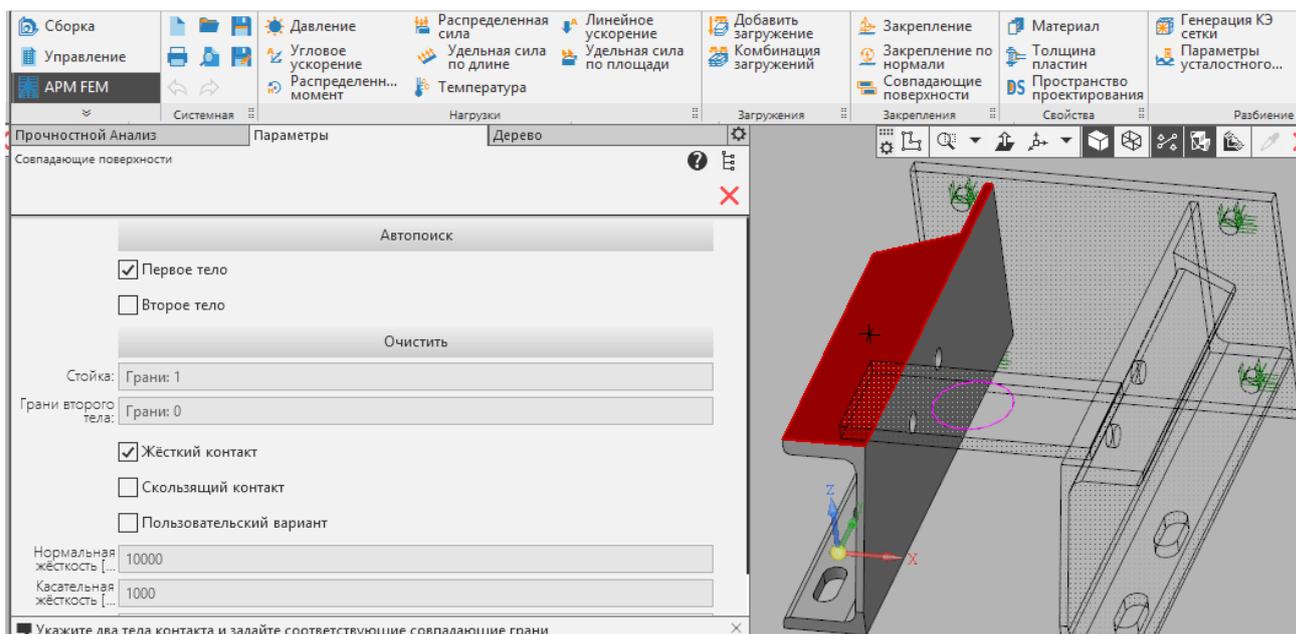


Рис. 3.24. Задание совпадающих поверхностей первого тела

При ручном задании совпадающих поверхностей необходимо указать сначала первое тело, выделив его в сборке. Остальные тела станут прозрачными (Рис. 3.24). На этом теле указывают те грани, которые будут находиться в контакте с другими телами.

Нажатием кнопки «Очистить» для выбранного тела выбор этого тела будет отменен, и выбранные ранее грани этого тела будут развыделены.

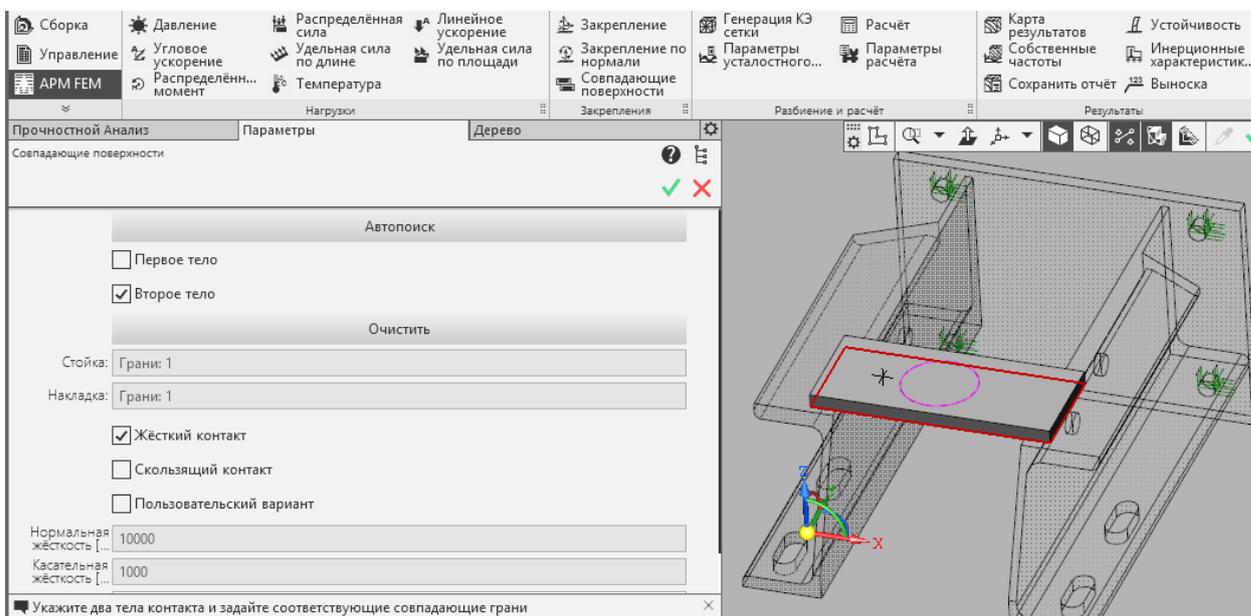


Рис. 3.25. Задание совпадающих поверхностей второго тела

Аналогичным образом выбираем второе тело и указываем на тем те грани, которые будут в контакте с первым телом (Рис. 3.25).

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

Далее, необходимо выбрать/уточнить тип контакта (Рис. 3.26):

- Жесткий контакт - не допускает проникновение одной детали в другую. Если между деталями был зазор, то контакт начинает работать только после выработки этого зазора.
- Скользящий контакт - допускает возможность перемещения одной детали по другой в зоне контакта.
- Пользовательский вариант - контакт с пользовательскими настройками жесткости.
- Совпадающая сетка - при генерации конечно-элементной сетки на контактирующих поверхностях узлы элементов будут совпадать.
- Склейка - запрещает относительное смещение контактирующих поверхностей.
- Балочный контакт - создает фиктивные стержневые элементы между узлами контактирующих поверхностей.

<input type="checkbox"/>	Жесткий контакт
<input type="checkbox"/>	Скользящий 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. 3.26. Выбор типа контакта

Более подробно о типах контакта и параметрах:

- **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.
- **Скользящий** – 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. 3.27). 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.

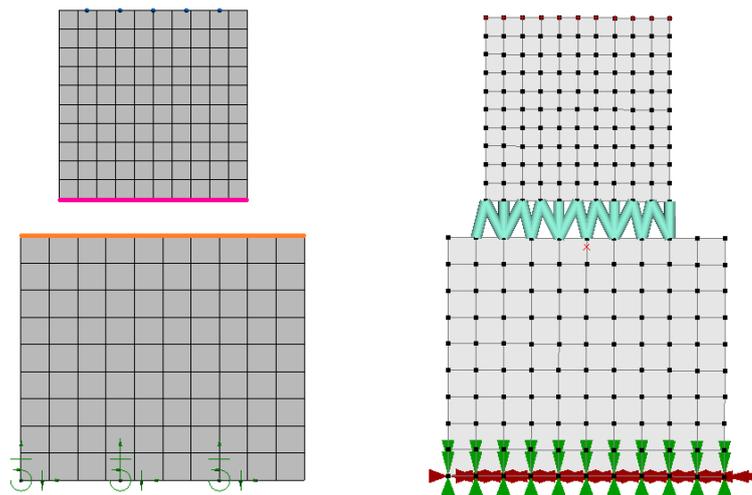


Рис. 3.27. Пример расчетной модели при использовании балочного контакта (исходная модель с наложенной сеткой слева, расчетная КЭ модель справа)

Радиус – участвует в автоматическом поиске контактных граней. Между гранями, находящимися на расстоянии меньшем заданного радиуса, создаются контактные зоны при автоматическом поиске. 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 жёсткости – жесткостные характеристики фиктивных элементов, связывающих контактирующие детали. Предпочтительно выбирать жёсткость, близкую по величине к жёсткости 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 «тяжелом» модуле прочностного расчета - *APM Structure3D*, после передачи в него КЭ сетки с нагрузками.



Соединения – команда позволяет задать соединение между деталью и землёй или между двумя деталями (Рис. 3.28).

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

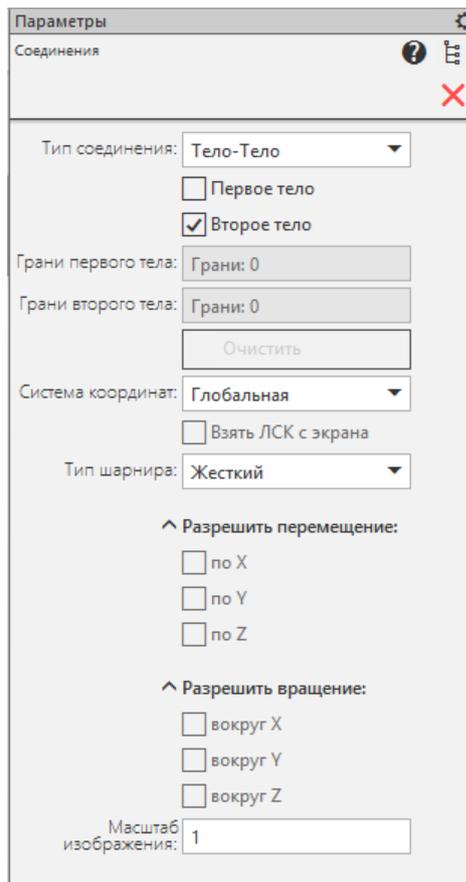


Рис. 3.28. Задание параметров соединения

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 поле "Система координат" из раскрывающего списка можно выбрать, в какой системе координат (СК) будет выполнено соединение:

Глобальная - расчеты будут вестись в глобальной СК (ГСК);

Локальная - расчеты будут вестись в локальной СК (ЛСК).

По команде "Взять ЛСК с экрана" можно выбрать ЛСК, щёлкнув по ней левой кнопкой мыши. (Предварительно необходимо убедиться, что видимость на экране для СК в соответствующей панели инструментов фильтров вида КОМПАС'а включена.) Выбранная ЛСК подсветится зелёным цветом и будет выделена в соответствующем выпадающем списке (Рис. 3.29).

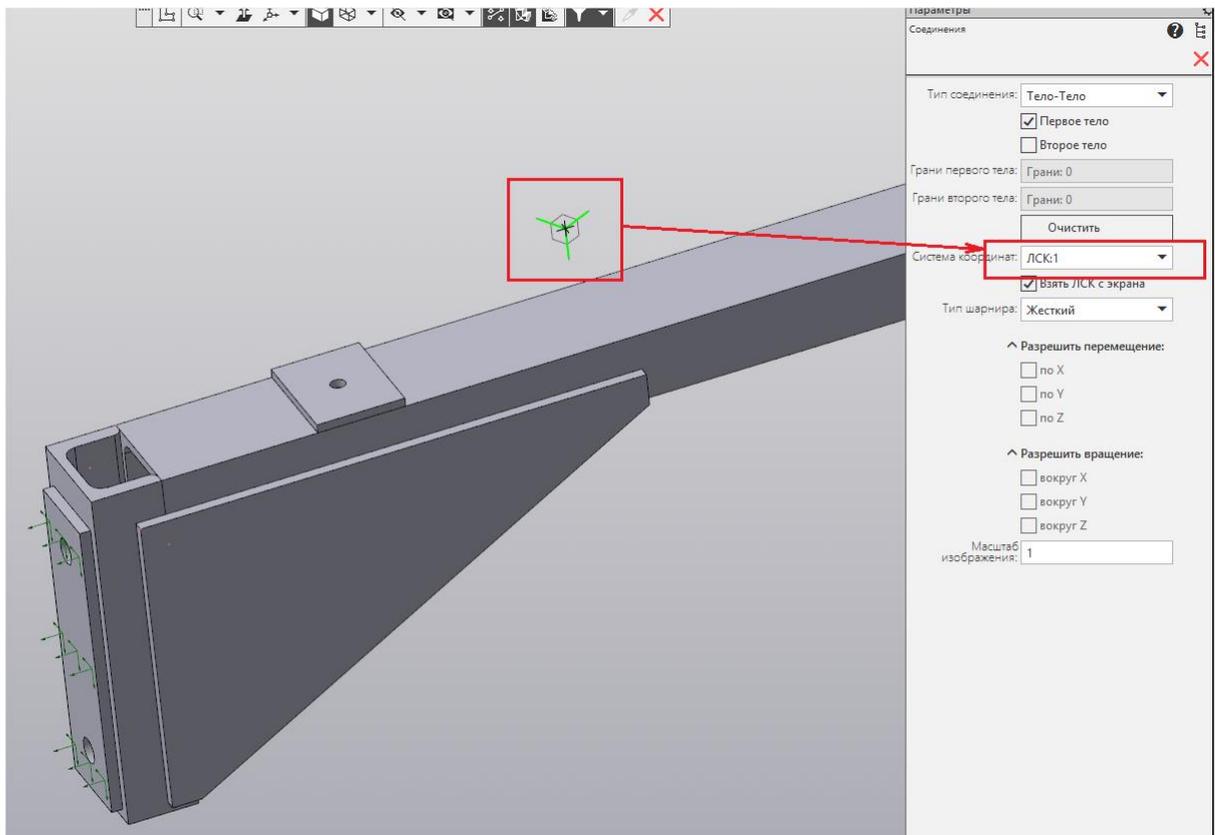


Рис. 3.29. Выбор ЛСК с экрана

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 вращения" можно разрешить перемещение и вращение вдоль или вокруг соответствующей оси, если выбран тип шарнира "Общий". Для остальных типов разрешенные параметры будут выбраны автоматически.

После нажатия кнопки *OK* созданное соединение будет добавлено в папку *Соединения* в дереве объектов. При щелчке правой кнопкой мыши на папке *Соединения* вызывается контекстное меню (Рис. 3.30), 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.

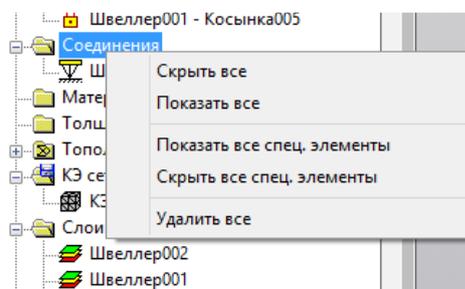


Рис. 3.30. Контекстное меню папки Соединения

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*).

Выберите 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. 3.31).

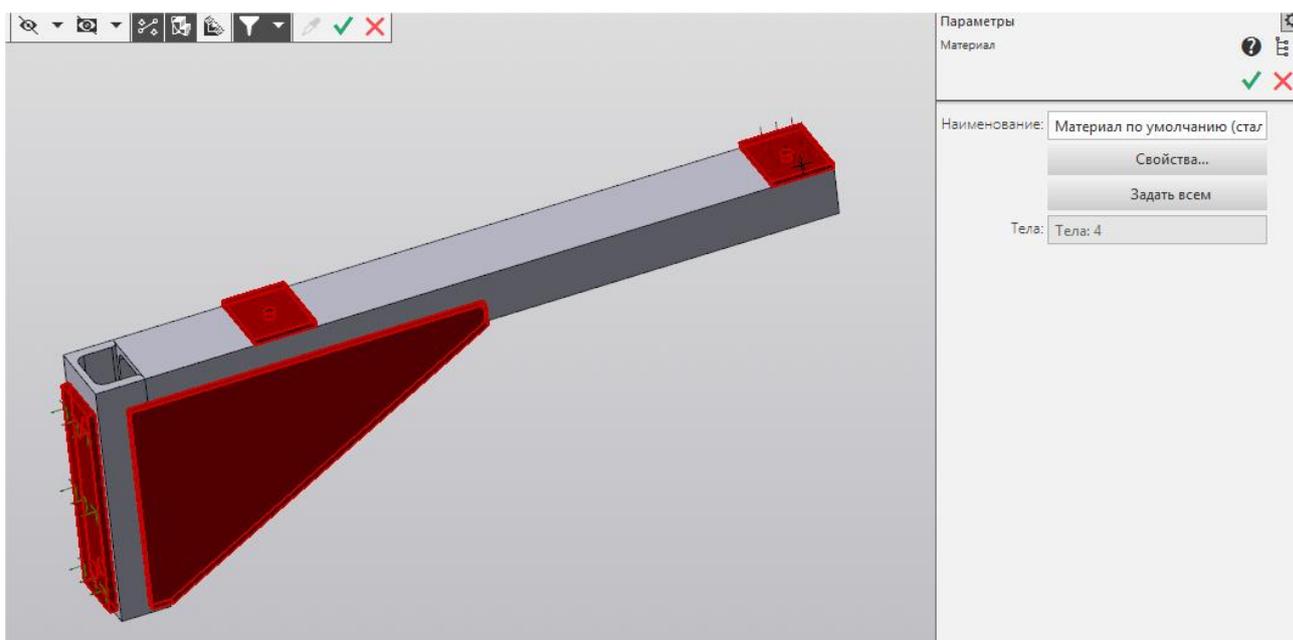


Рис. 3.31. Указание тел, которым будет задан материал

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. 3.32). По умолчанию задаются параметры, соответствующие материалу Сталь 3кп (с пределом текучести 235 МПа).

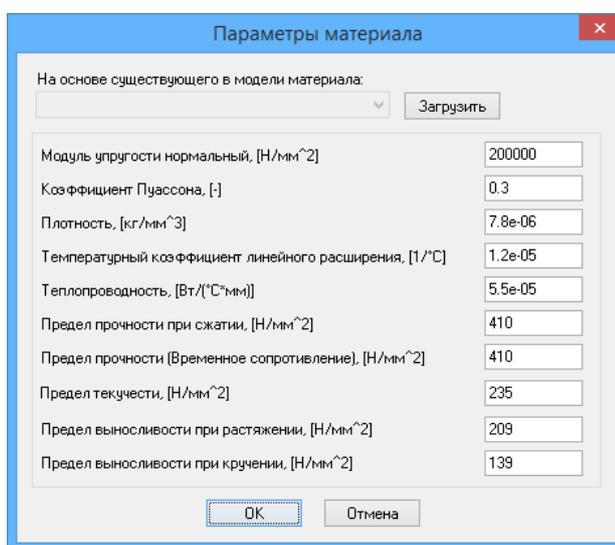


Рис. 3.32. Параметры материала

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. 3.33). Выбрав соответствующий материал в списке, его параметры будут перенесены в поля диалогового окна. При необходимости их можно отредактировать.

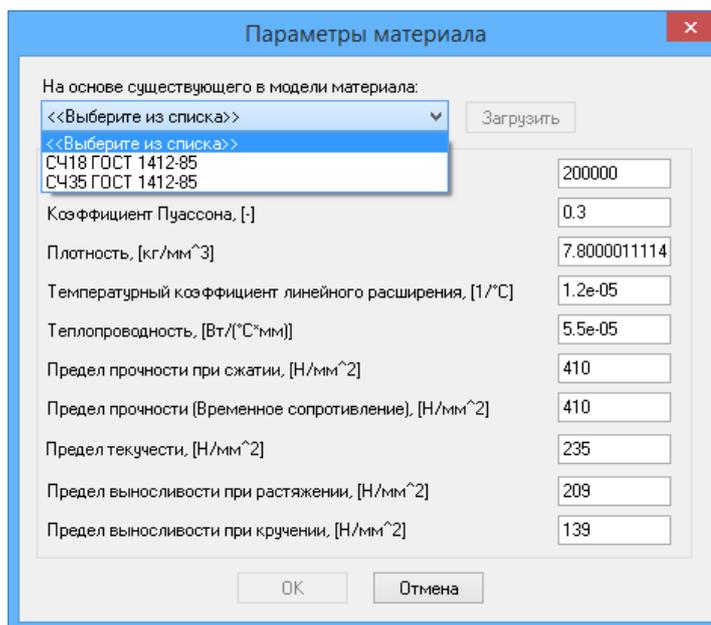


Рис. 3.33. Список загруженных материалов

После нажатия кнопки ОК будет создан новый материал с соответствующими параметрами и его название появится в поле "Наименование" (Рис. 3.34).

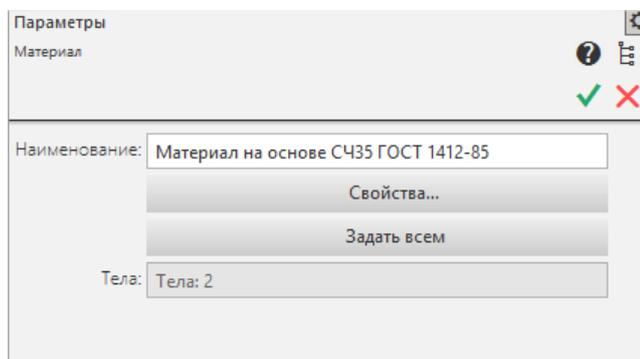


Рис. 3.34. Наименование материала, созданного на основе существующего

Созданный в результате работы команды материал помещается в дерево прочностного анализа (Рис. 3.35).

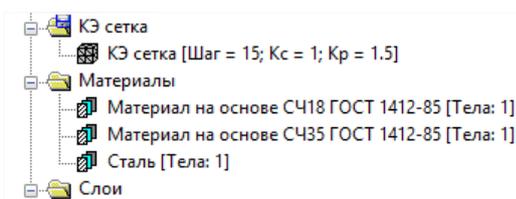


Рис. 3.35. Список материалов в дереве прочностного анализа

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

Выберите грань, которой будет задана толщина. После чего выбранная поверхность будет занесена в список граней и будет выделена цветом (Рис. 3.36). Заданная толщина будет учитываться при последующем КЭ анализе.

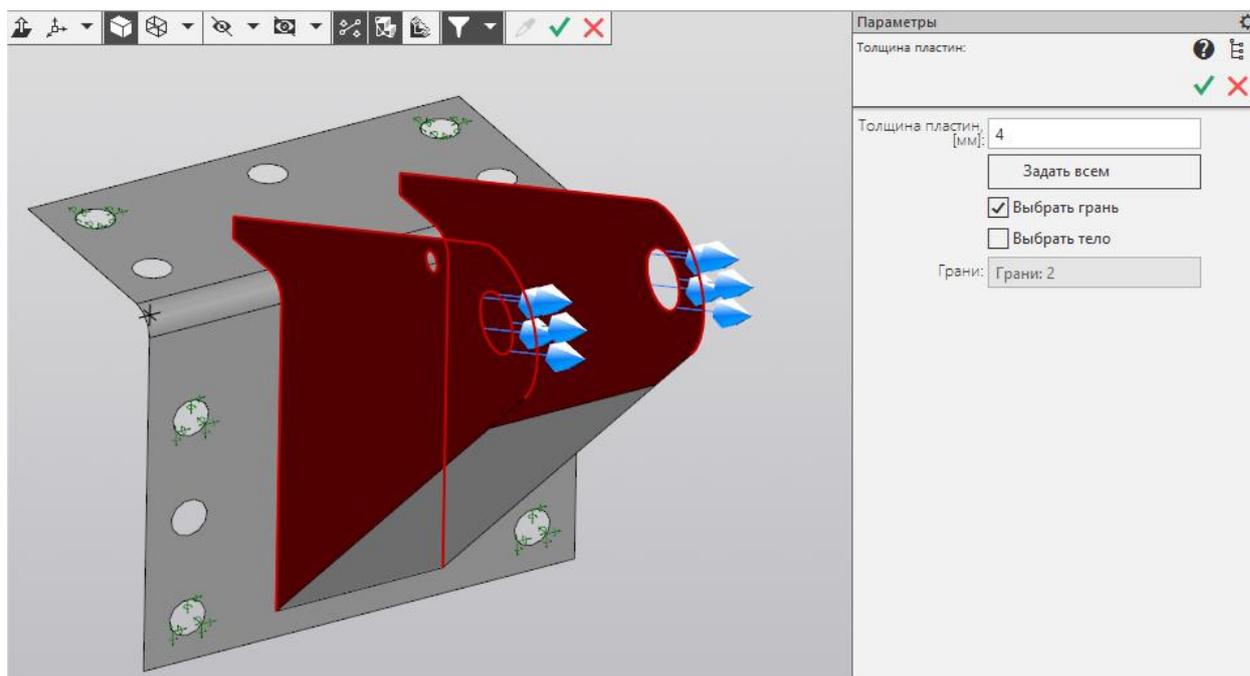


Рис. 3.36. Указание поверхностей, которым будет задана толщина

Кнопка "Задать всем" задает толщину всем поверхностям одной детали или сборки. Опция "Выбрать грань" позволяет выбирать только отдельные поверхности. Опция "Выбрать тело" позволяет выбирать детали целиком при работе со сборками.

 **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. 3.37). По цветовой шкале можно определить конкретное значение толщины.

При выборе мышью поверхности на экране, её толщина будет отображаться в поле "Толщина выбранной пластины". Параметр "Реверс цвета" инвертирует цвета.

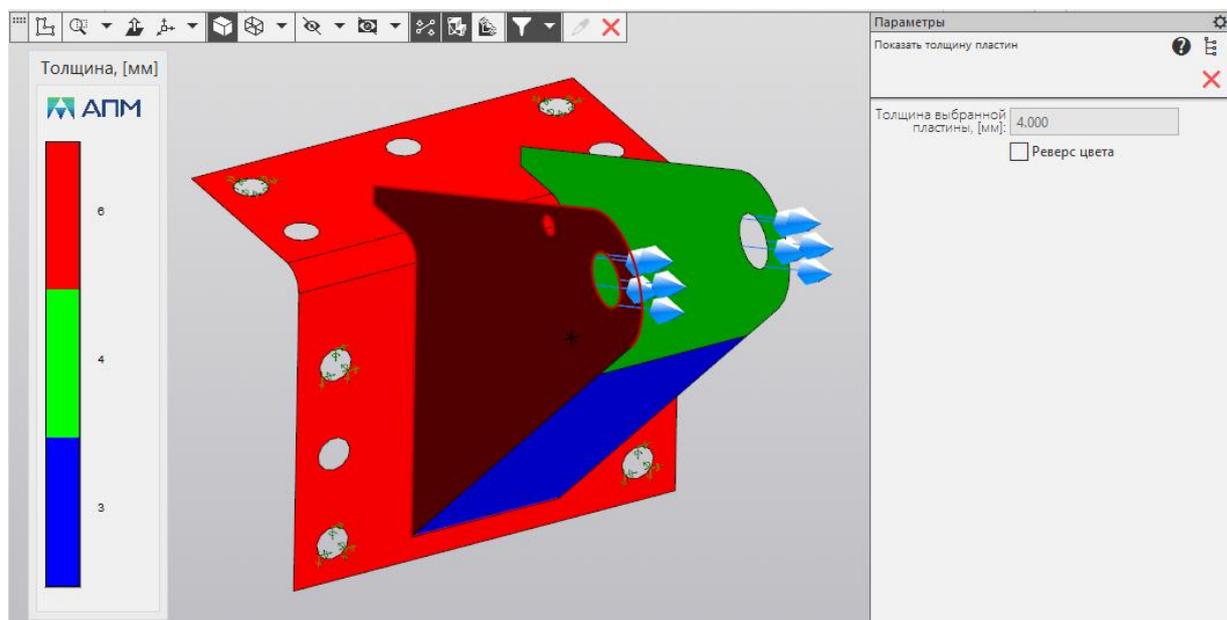


Рис. 3.37. Вид модели после вызова команды

3.3 Работа с деревом прочностного анализа

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

Для работы с группами (Рис. 3.38) и объектами (Рис. 3.39) 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.

Обновить все – команда позволяет обновить отображение объектов на 3D модели. Данную команду следует обязательно выполнять после любого перестроения геометрической модели для корректного приложения нагрузок и закреплений.

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

Удалить – команда удаляет объект.

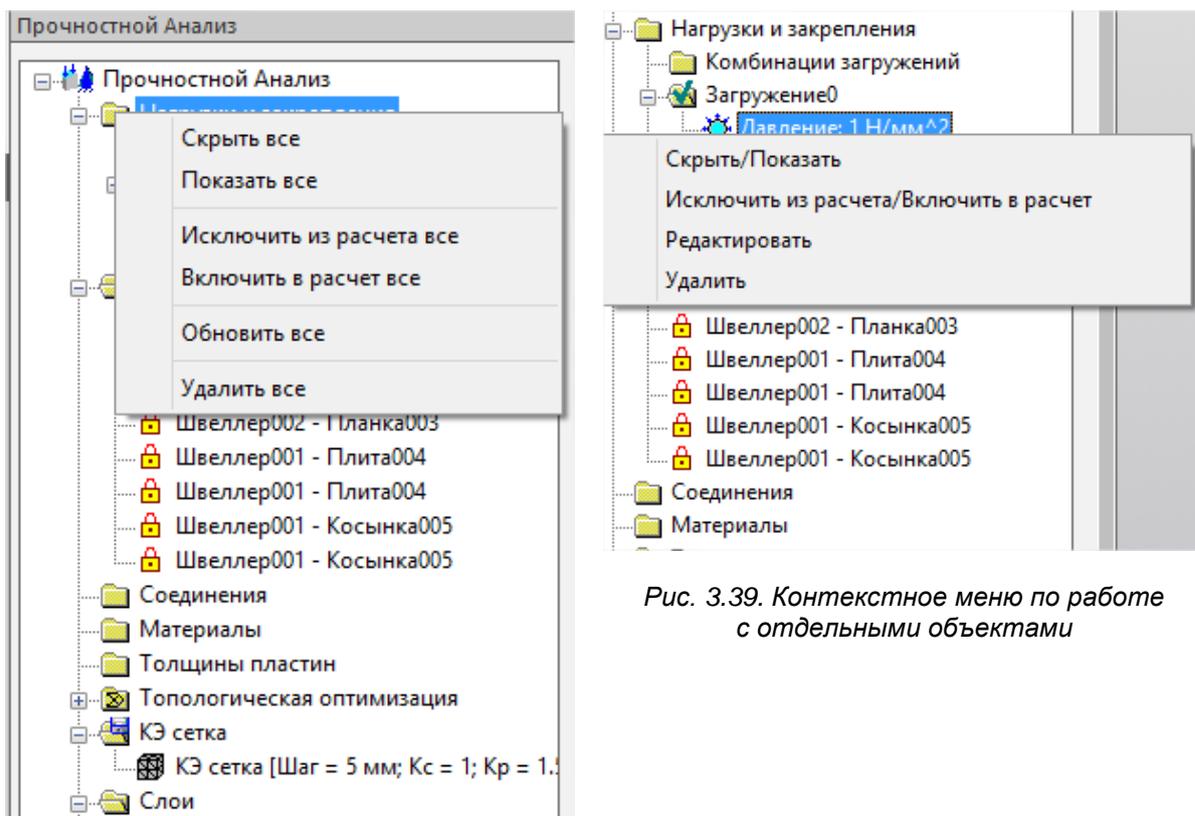


Рис. 3.38. Контекстное меню по работе с группой объектов

Рис. 3.39. Контекстное меню по работе с отдельными объектами

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.

3.4 Генерация КЭ сетки

Генерация КЭ сетки осуществляется с помощью команды  **Генерация КЭ сетки** панели инструментов **Разбиение и расчет** (Рис. 3.40).

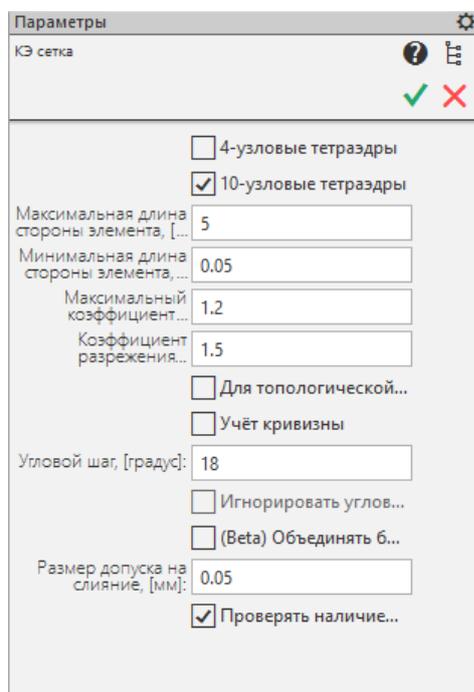


Рис. 3.40. Параметры команды генерации КЭ сетки

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

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.

Для топологической оптимизации - при установке этого параметра при генерации сетки вглубь объема твердотельной модели КЭ не будут увеличиваться, а будут оставаться примерно одинаковыми. Это необходимо для корректного расчёта топологической оптимизации.

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

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

Игнорировать угловой шаг на малых гранях – при включении этой настройки 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 – настройка 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 настройки 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. 1.3).

Для контроля качества конечно-элементного разбиения часть сетки может быть скрыта с помощью установки *глубины просмотра* (Рис. 3.41). 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.

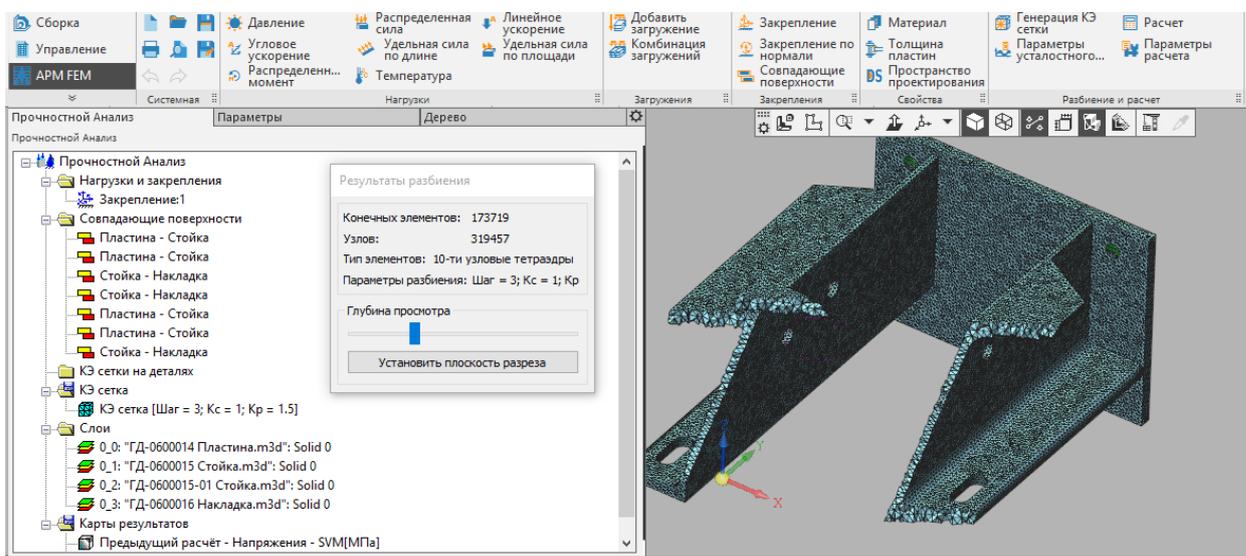


Рис. 3.41. Установка глубины просмотра

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. 3.42).

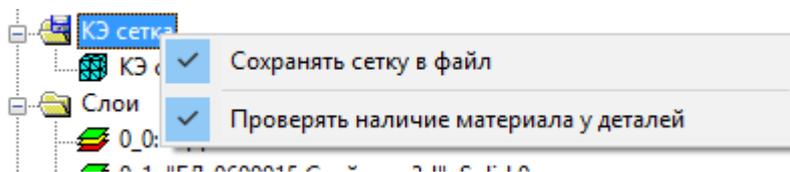


Рис. 3.42. Сохранение КЭ сетки в файл КОМПАС-3D

Кроме того в этом же контекстном меню можно включить/выключить опцию по проверке наличия материала у деталей (см. п. 1.3).

Иконка папки отображает состояние флажка: включено или выключено сохранение (Рис. 3.43).



Рис. 3.43. Вид иконки группы КЭ сетка в зависимости от флажка сохранения

Если выбрать контекстное меню непосредственно КЭ сетки, то будут доступны команды: *Скрыть/Показать*, *Пересоздать сетку*, *Использовать существующую сетку*, *Удалить*, а также команды для сохранения сетки в файл *APM Structure3D* (Рис. 3.44).

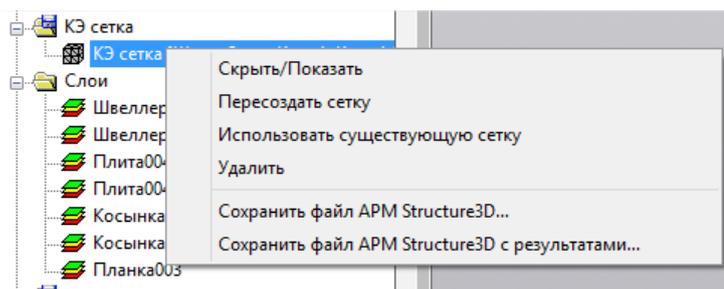


Рис. 3.44. Контекстное меню по работе с КЭ сеткой

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 переприкладывание 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.

Сгенерированная сетка без результатов или после выполнения расчета уже с результатами может быть сохранена в файл *APM Structure3D*. Необходимость сохранения может быть обусловлена разными причинами:

- Подготовка КЭ-моделей, состоящих из разных типов конечных элементов. Например, добавление к твердотельной модели из КОМПАС-3D пластинчатых или стержневых КЭ.
- Редактирование модели средствами *APM Structure3D*. Например, задание узловой нагрузки или закрепления.
- Выполнение расчета, который не предусмотрен в *APM FEM*. Например, расчет на вынужденные колебания.

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. 3.45), запрашивающее тип производимого расчета. В этом окне можно также выбрать загрузку, для которого будет произведен расчет.

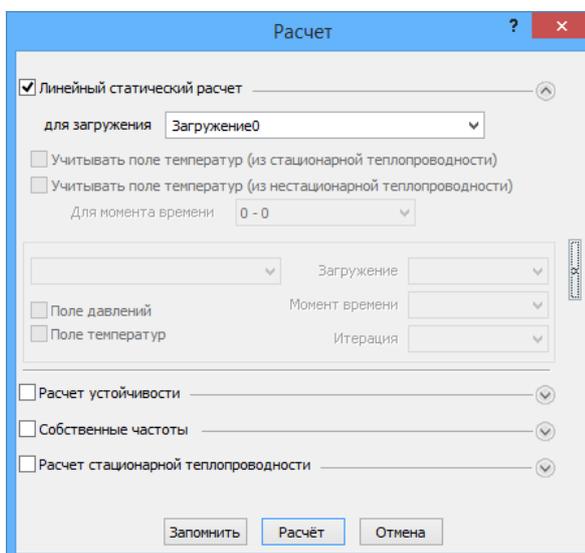


Рис. 3.45. Окно Расчет

При необходимости можно раскрыть правую часть окна для задания настроек текущего расчета (Рис. 3.46).

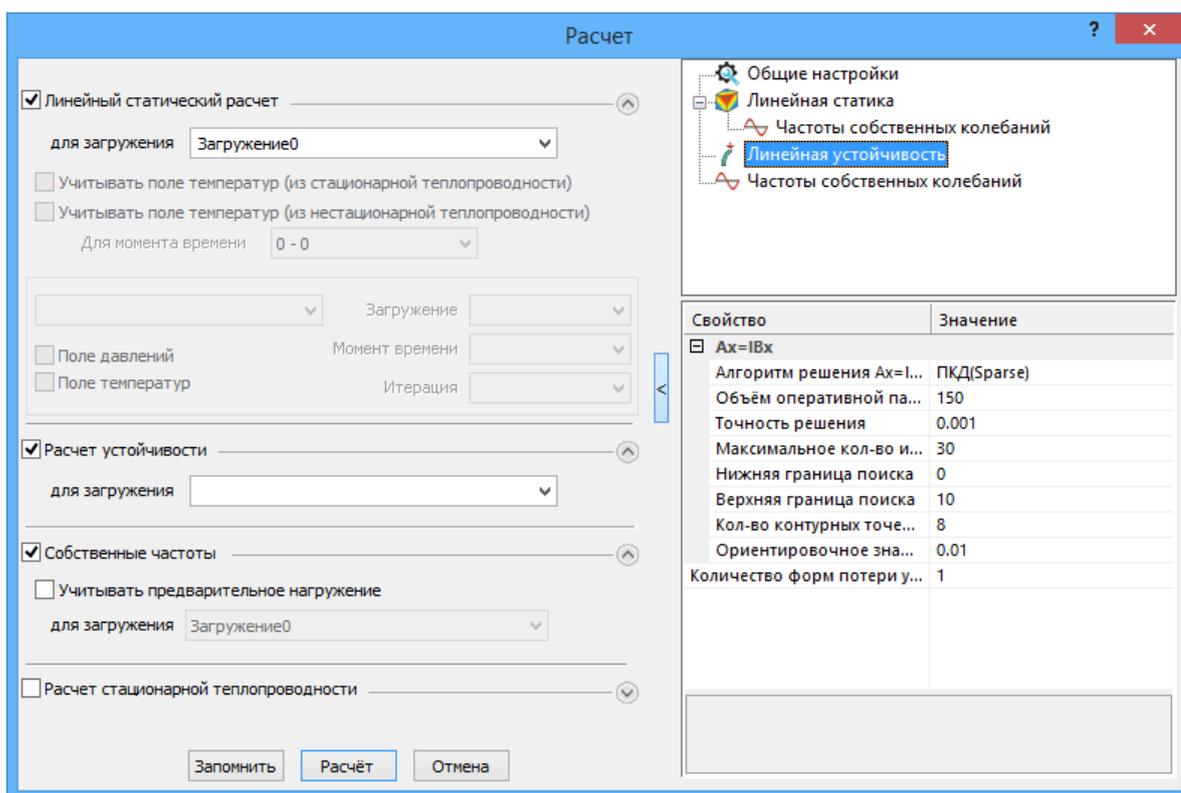


Рис. 3.46. Настройки текущего расчета

3.6 Параметры расчета

Команда  **Параметры расчета** панели инструментов **Разбиение и расчет** вызывает окно с настройками программы и установками для расчета.

Вкладки *Настройки программы* (Рис. 3.47) отвечают за параметры использования многоядерного процессора (доступно, если процессор вашего 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.

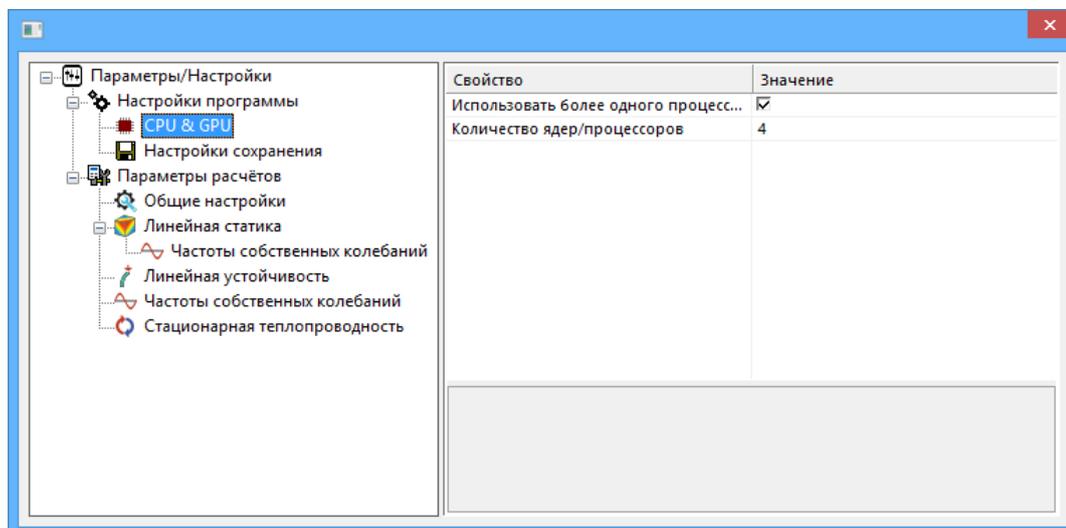


Рис. 3.47. Настройки программы

Вкладка *Статический расчет* (Рис. 3.48).

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.

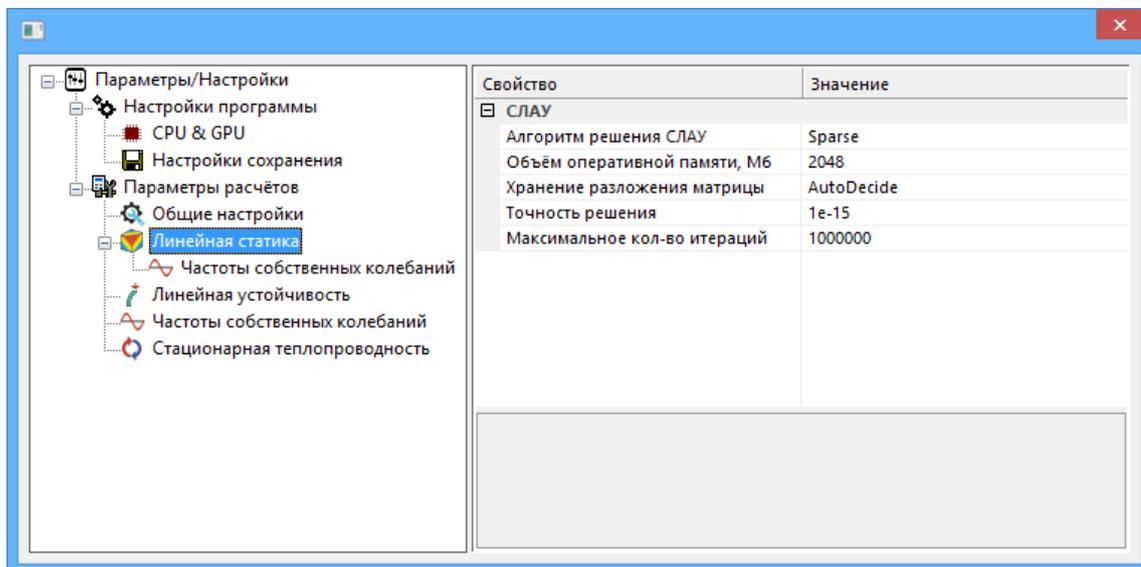


Рис. 3.48. Настройки статического расчета

Вкладка *Линейная устойчивость* (Рис. 3.49).

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.

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 отличающемся 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.

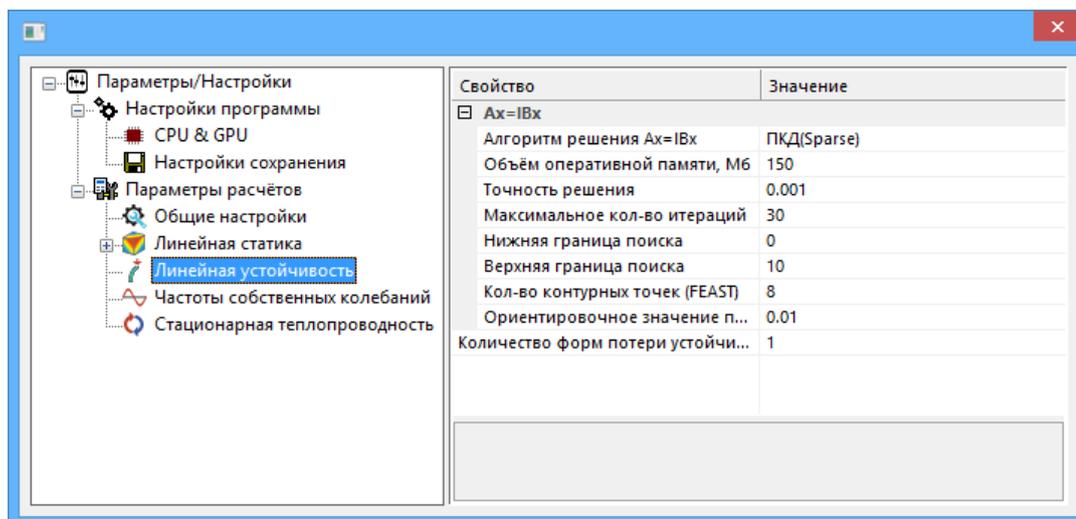


Рис. 3.49. Настройки расчета линейной устойчивости

Вкладка *Частоты собственных колебаний* (Рис. 3.50).

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 **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.

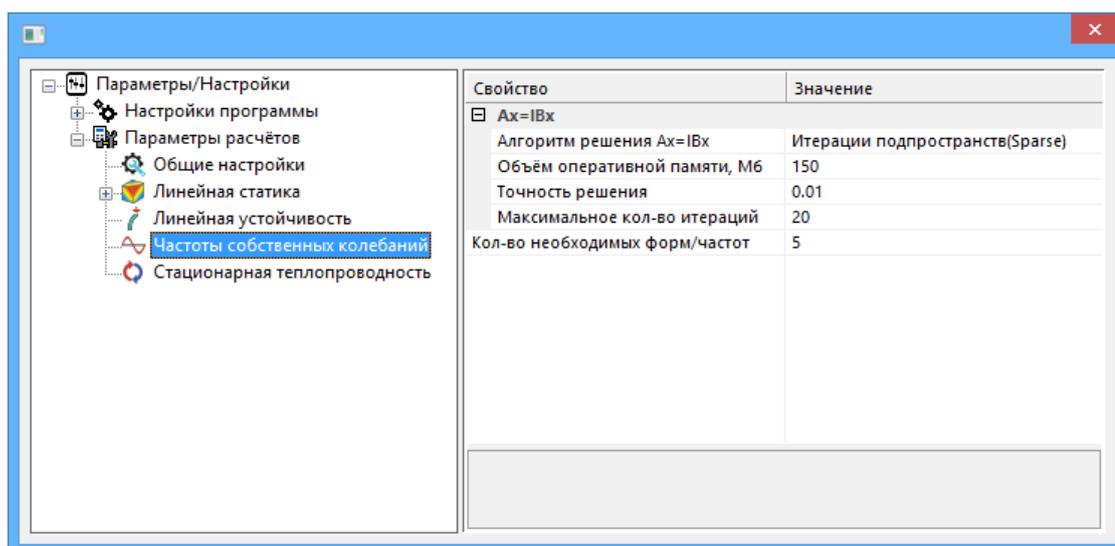
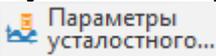


Рис. 3.50. Настройки расчета собственных колебаний

Параметры усталостного расчёта

Команда  **Параметры усталостного расчета** панели инструментов **Разбиение и расчет** вызывает окно с установками для усталостного расчёта конструкции (Рис. 3.51). 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.

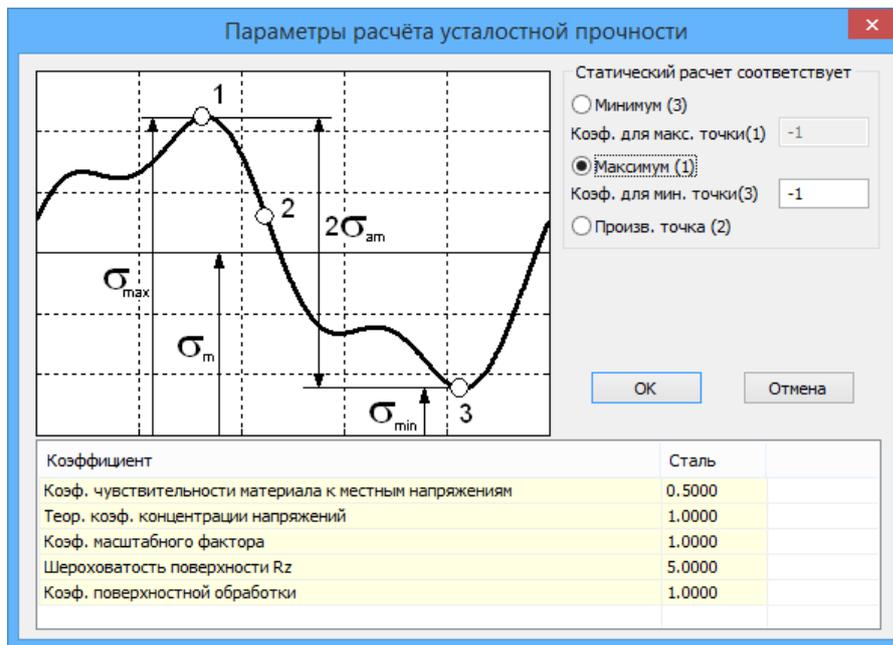


Рис. 3.51. Диалоговое окно Параметры расчёта усталостной прочности

Группа **Статический расчёт соответствует** позволяет задать максимальное и минимальное значения нагрузки, действующей на модель конструкции. Так, если статический расчёт был проведён 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 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. 3.52).

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

В поле **Тип результатов** выбирается тип результатов для построения карты результатов. В списке **Объёмные 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.

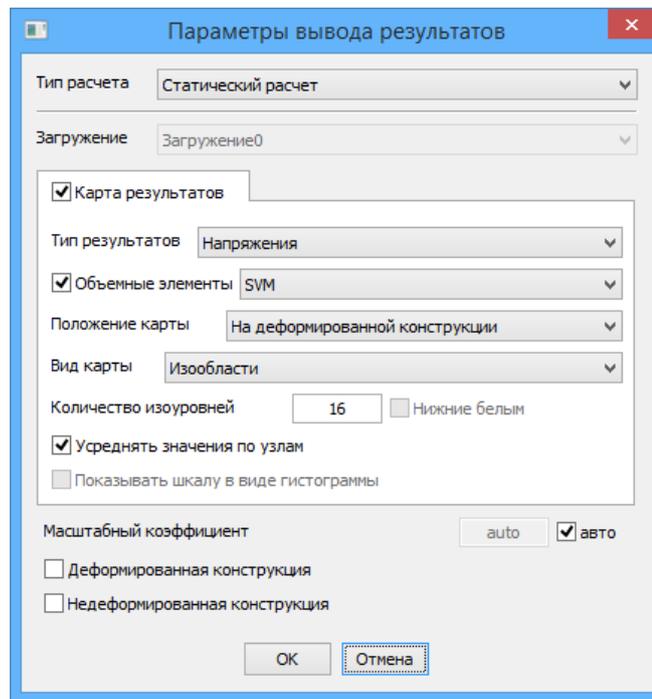


Рис. 3.52. Диалоговое окно Параметры вывода результатов

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 настройка 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. 3.53).

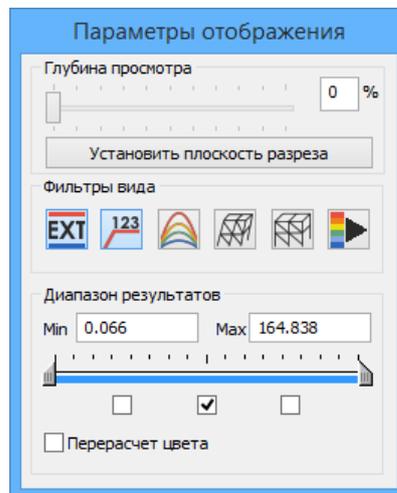


Рис. 3.53. Параметры отображения карт результатов

Для просмотра результатов внутри твердотельной модели часть карты может быть скрыта с помощью установки *глубины просмотра*. По умолчанию, плоскость разреза совпадает с плоскостью вида. 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*).

Для установки пользовательской плоскости разреза следует повернуть модель так, чтобы планируемая плоскость разреза совпала с плоскостью текущего вида, и нажать кнопку «*Установить плоскость разреза*».

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. 3.58).

Минимальное и максимальное значение 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. 3.54).

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.

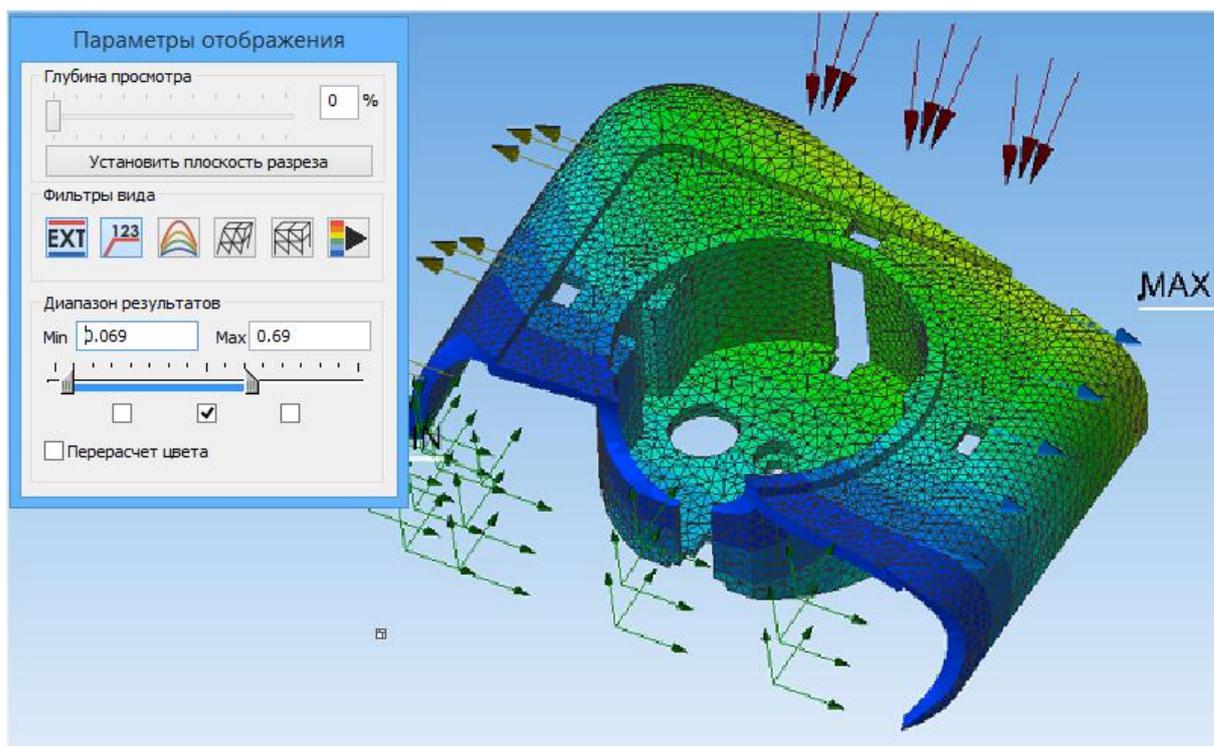


Рис. 3.54. Карта перемещений с заданным диапазоном вывода результатов: показаны только элементы со значениями от 0,069 до 0,69 мм

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. 3.55).

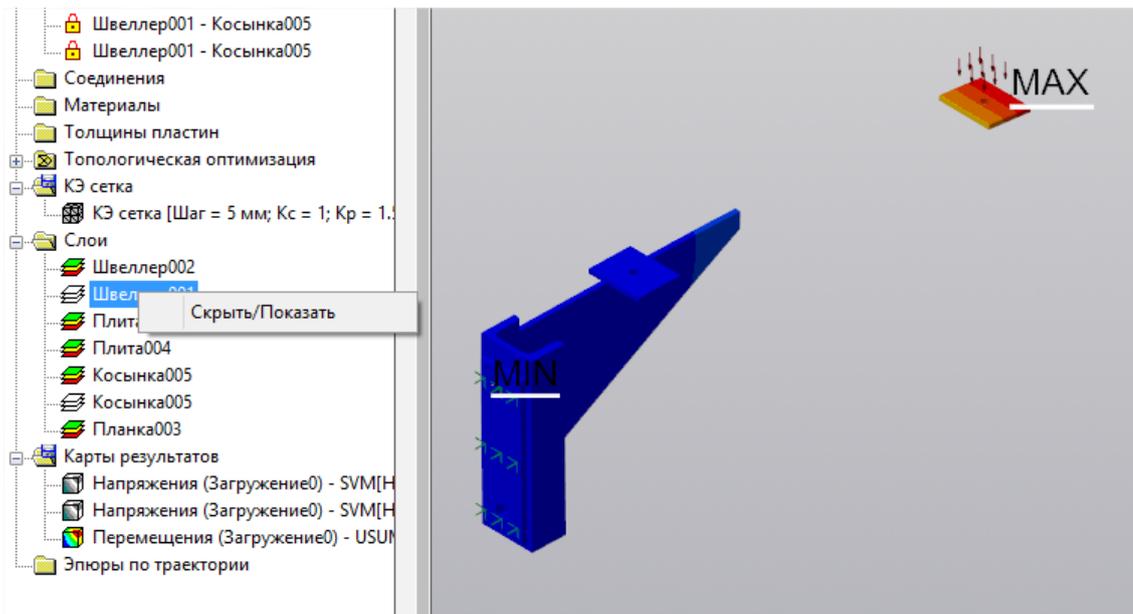


Рис. 3.55. Карта перемещений для сборки с отключёнными слоями

После вызова результаты доступны в дереве прочностного анализа. Настройка отображения результатов, диапазон и параметры редактирования доступны через команды контекстного меню (Рис. 3.56).

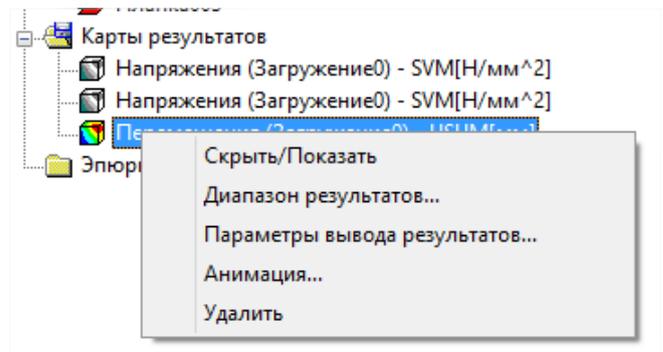


Рис. 3.56. Контекстное меню результатов

Диапазон результатов

Команда контекстного меню позволяет задать диапазон вывода результатов при отрисовке цветовой карты (Рис. 3.57).

Параметры вывода результатов

Команда контекстного меню вызывает диалоговое окно (Рис. 3.52) для выбора результатов расчета и дальнейшего их просмотра. Кроме того, позволяет устанавливать различные опции представления результатов.

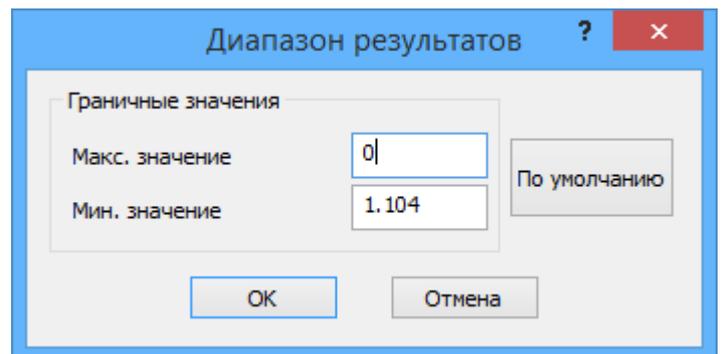


Рис. 3.57. Диалоговое окно
Диапазон результатов

Анимация

Команда контекстного меню вызывает диалоговое окно (Рис. 3.58) для показа анимации. В поле "Период анимации" задается длительность создаваемой анимации. В полях "Начальный" 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.

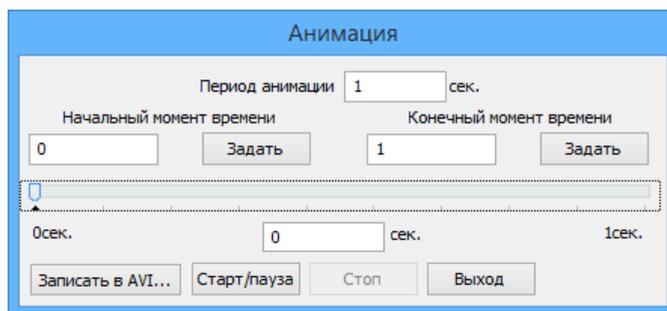


Рис. 3.58. Диалоговое окно Анимация

Команда  **Реакции опор** вызывает диалоговое окно, в котором можно просмотреть реакции в опорах (Рис. 3.59). 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 Ctrl-A. Несколько закреплений - используя левую клавишу мыши совместно с SHIFT или CTRL.

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

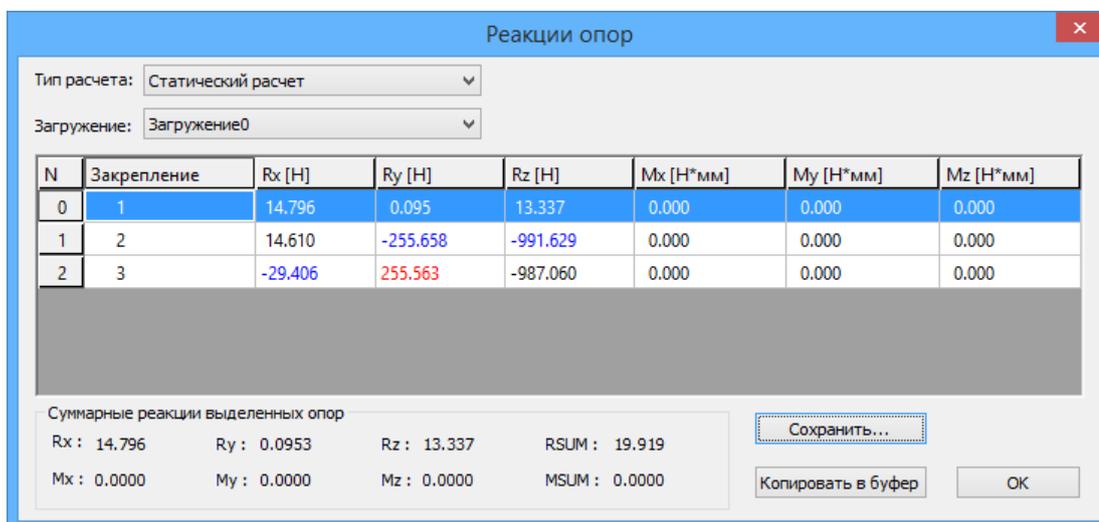


Рис. 3.59. Окно Реакции опор

Устойчивость

Команда  **Устойчивость** выводит окно с коэффициентом запаса устойчивости, получающимся в результате расчета на устойчивость (Рис. 3.60).

Нажмите кнопку **Форма**, чтобы посмотреть форму потери устойчивости (Рис. 3.61).

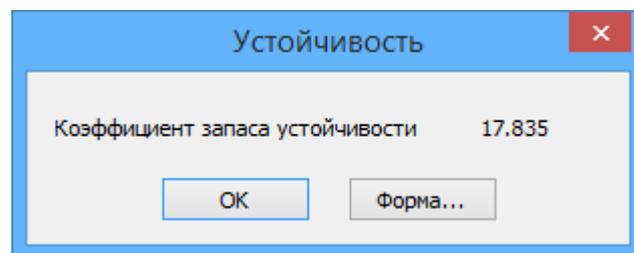


Рис. 3.60. Диалоговое окно Устойчивость

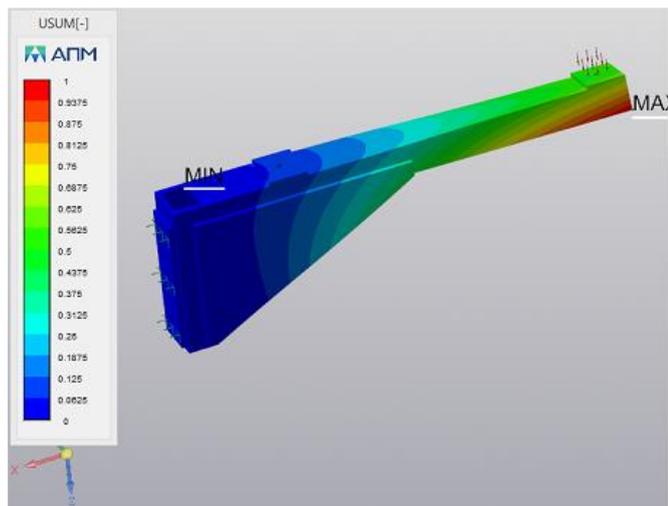


Рис. 3.61. 1-я форма потери устойчивости

Команда  **Собственные частоты** выводит окно с частотами собственных колебаний и модальными массами конструкции (Рис. 3.62). Нажмите кнопку *Форма* для просмотра формы колебаний для выбранной частоты (Рис. 3.63).

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	1170.49	186.289	0.00536802	5.99e-05	5.99e-05	51.5	51.5	0.000108	0.000108
2	1956.51	311.388	0.00321143	0.162	0.162	6.71e-05	51.5	25.9	25.9
3	4790.46	762.425	0.0013116	0.000401	0.162	16	67.5	0.000706	25.9
4	6313.76	1004.87	0.000995...	0.00184	0.164	0.613	68.1	0.0558	25.9
5	6841.69	1088.89	0.000918...	1.65	1.82	0.00421	68.1	19.6	45.6

Рис. 3.62. Диалоговое окно Частоты собственных колебаний

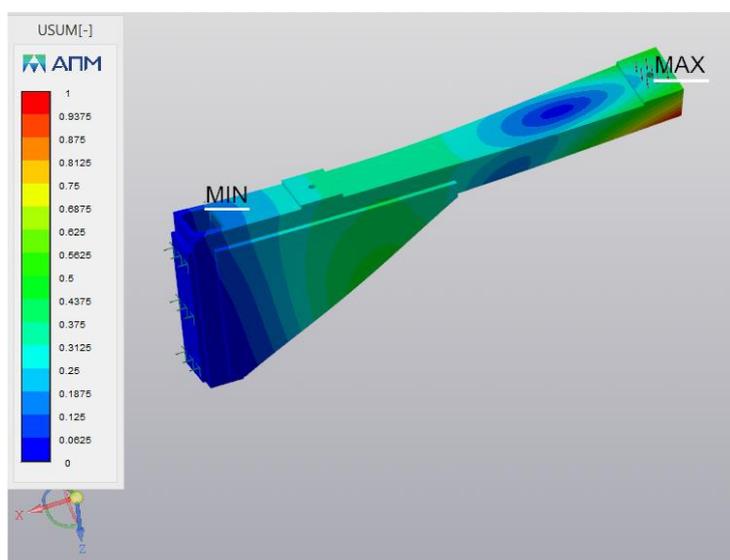


Рис. 3.63. 3-я форма собственных колебаний

Команда  **Инерционные характеристики модели** выводит диалоговое окно с информацией о массе модели, центре тяжести модели, моментах инерции модели и суммарных реакциях в опорах (Рис. 3.64).

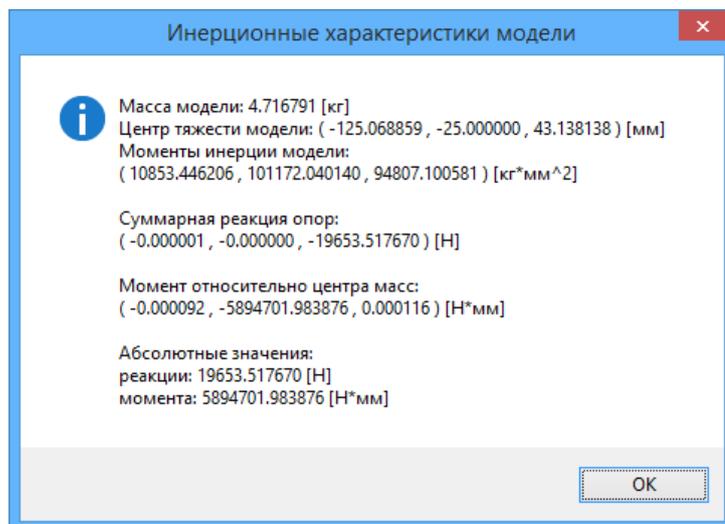


Рис. 3.64. Диалоговое окно Инерционные характеристики модели

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. 3.65), 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.

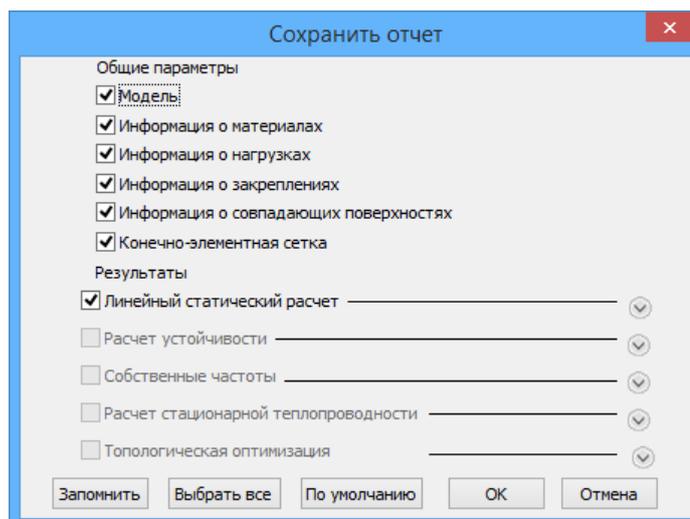


Рис. 3.65. Диалоговое окно Сохранить отчет

Команда  **Выноска** предназначена для установки выносок со значениями непосредственно на карте результатов. Для установки выноски необходимо навести 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. 3.66).

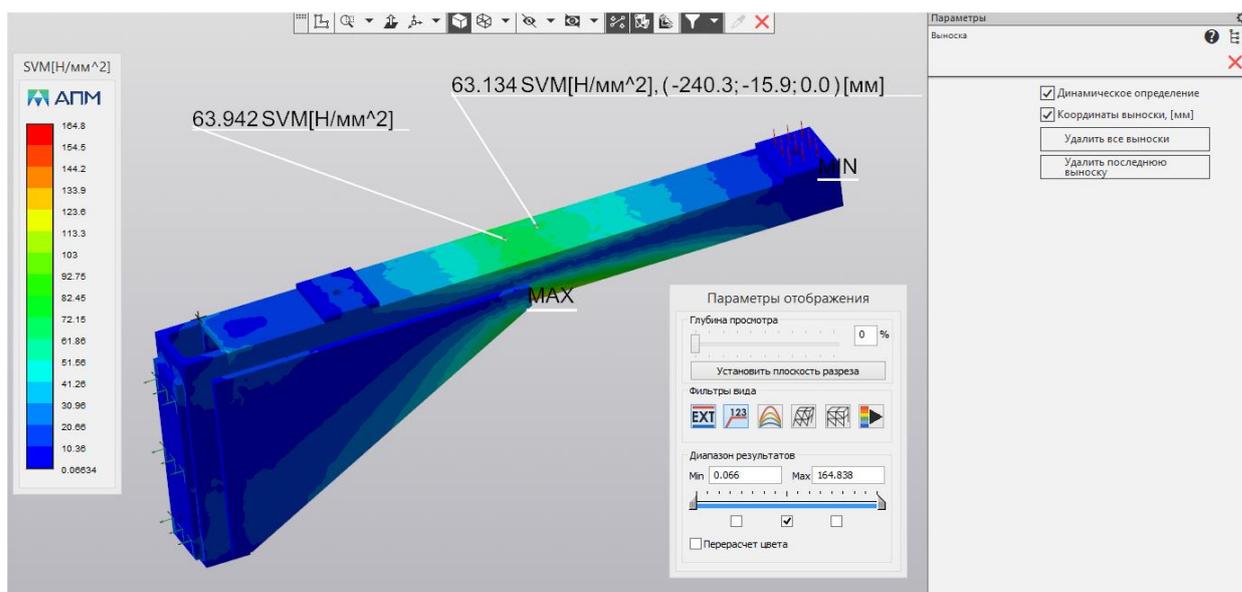


Рис. 3.66. Простановка выноски на карте результатов

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.

На Рис. 3.67 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.

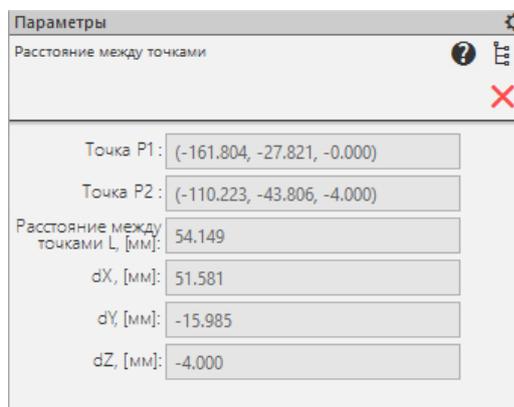


Рис. 3.67. Окно свойств команды *Расстояние между точками*

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. 3.68). Иконка папки отображает состояние флажка: включено или выключено сохранение (Рис. 3.69).

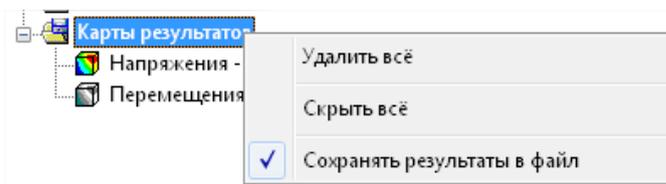


Рис. 3.68. Сохранение результатов в файл КОМПАС-3D



Рис. 3.69. Вид иконки группы Карты результатов в зависимости от флажка сохранения

Сохранение результатов предыдущего расчета

Если внести изменения в нагрузки и закрепления 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.

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.

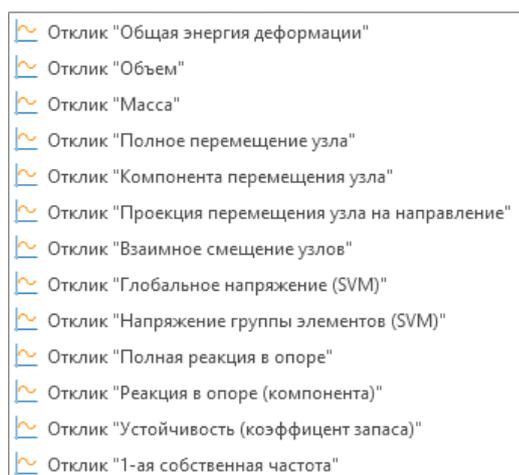


Рис. 4.1. Группа команд задания откликов

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.

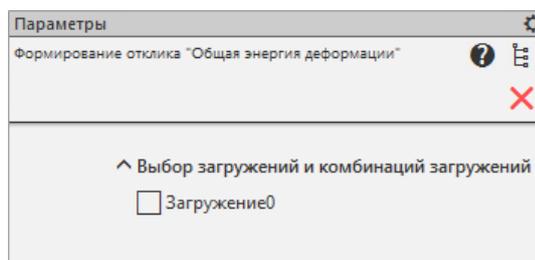


Рис. 4.2. Параметры отклика «Общая энергия деформации»

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.

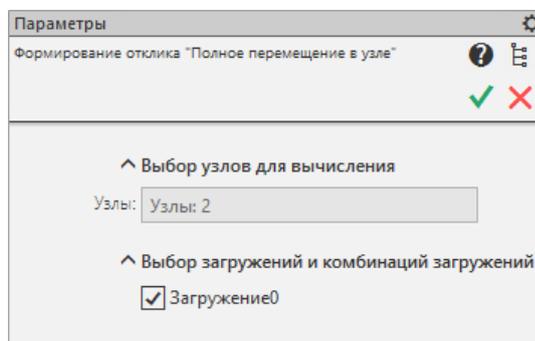


Рис. 4.3. Параметры отклика «Полное перемещение узла»

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.

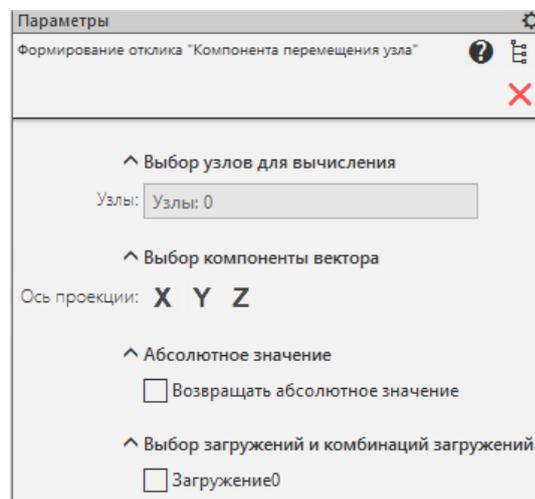


Рис. 4.4. Параметры отклика «Компонента перемещения узла»

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.

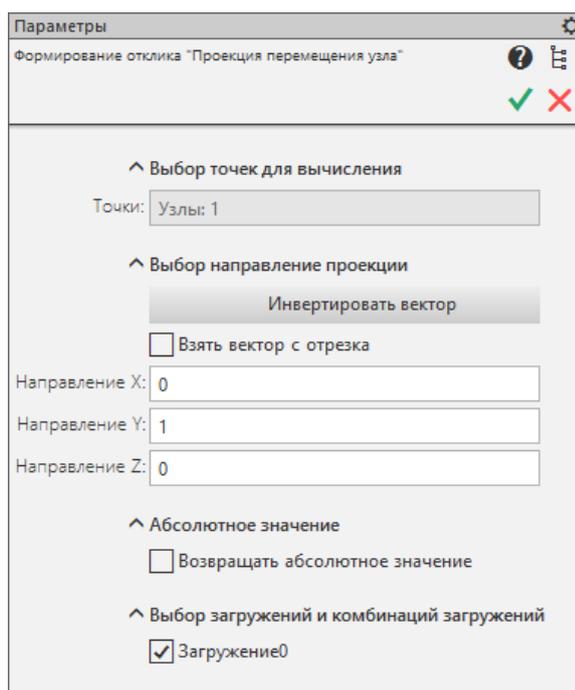


Рис. 4.5. Параметры отклика «Проекция перемещения узла на направление»

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.

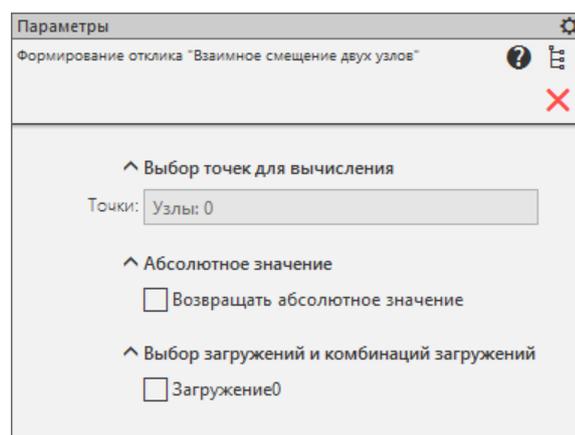


Рис. 4.6. Параметры отклика «Взаимное смещение двух узлов»

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.

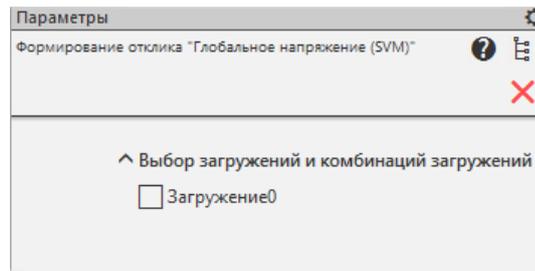


Рис. 4.7. Параметры отклика «Глобальное напряжение (SVM)»

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.

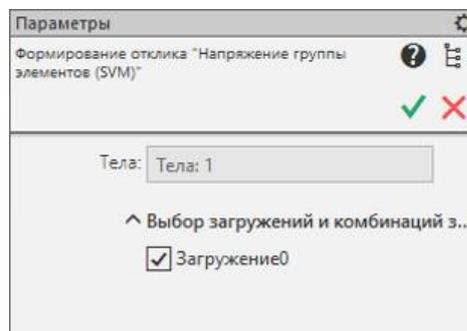


Рис. 4.8. Параметры отклика «Напряжение группы элементов (SVM)»

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.

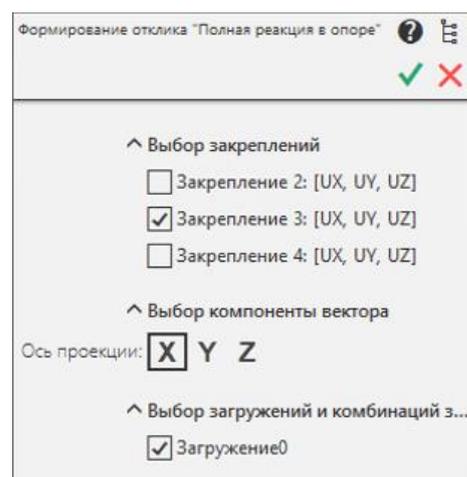


Рис. 4.9. Параметры отклика «Полная реакция в опоре»

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.

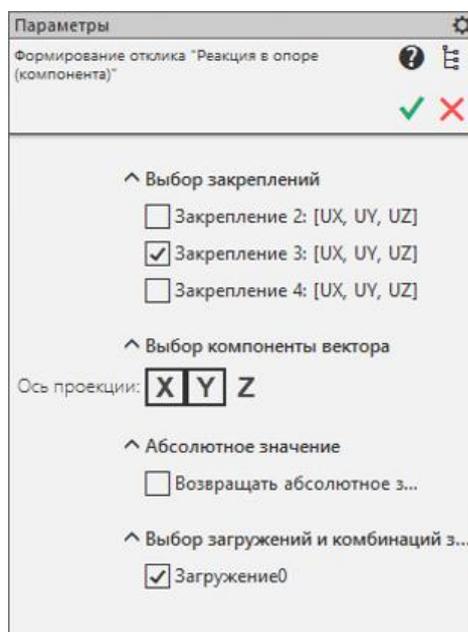


Рис. 4.10. Параметры отклика «Реакция в опоре (компонента)»

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.

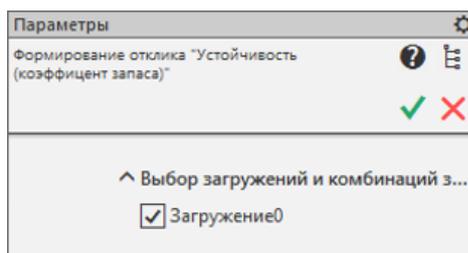


Рис. 4.11. Параметры отклика «Устойчивость (коэффициент запаса)»

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 отклик» (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.

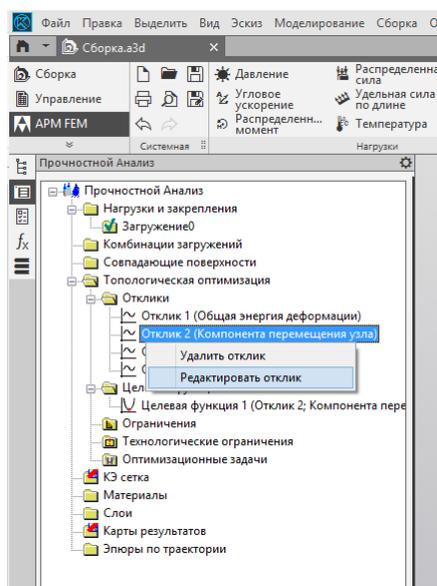


Рис. 4.12. Контекстное меню для объекта Отклик

Окно редактирования отклика может отличаться в зависимости от того, выбран ли он в качестве целевой функции (Рис. 4.14) или нет (Рис. 4.13). Во 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.

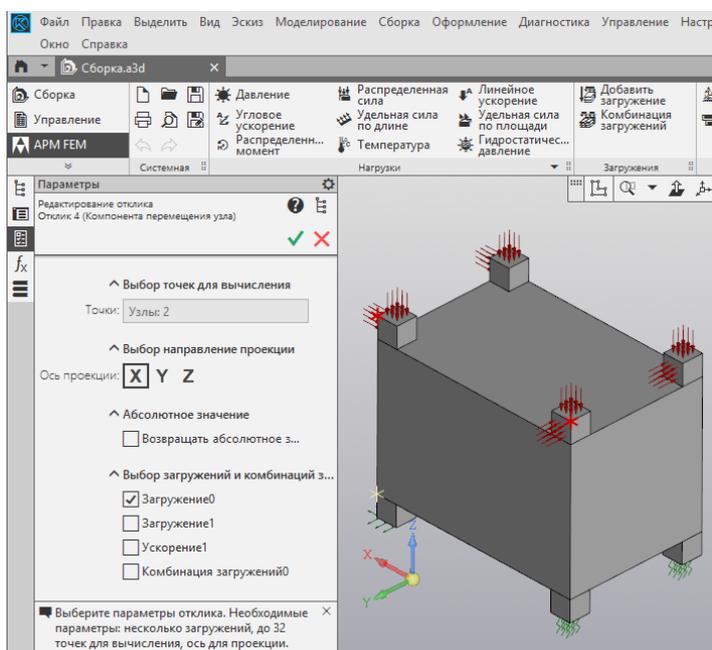


Рис. 4.13. Редактирование отклика

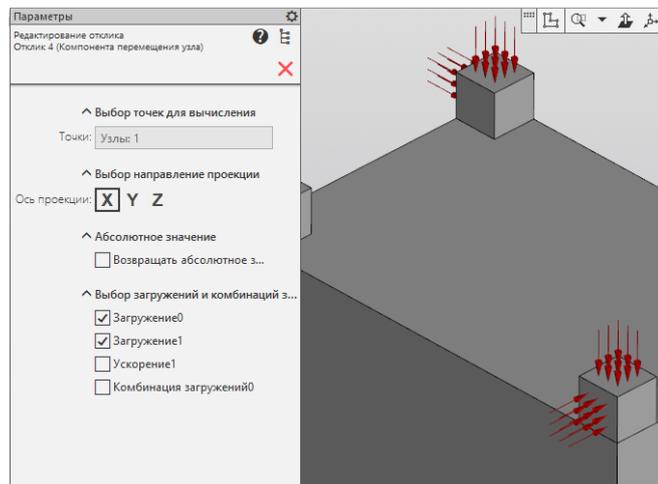


Рис. 4.14. Редактирование отклика для целевой функции

Для примера, на Рис. 4.14 выбрано два нагружения 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».

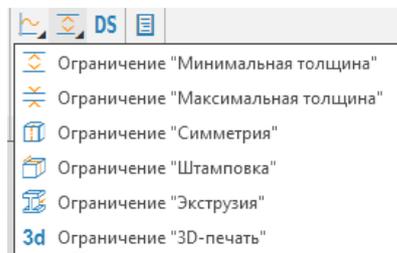


Рис. 4.15. Группа команд задания конструктивных ограничений

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.

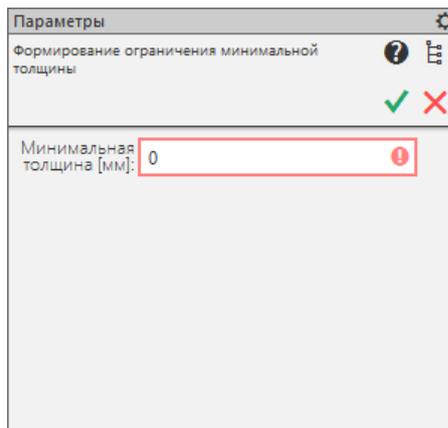


Рис. 4.16. Параметры ограничения «Минимальная толщина»

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.

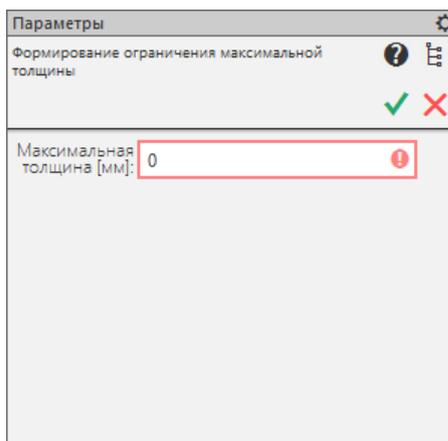


Рис. 4.17. Параметры ограничения «Максимальная толщина»

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.

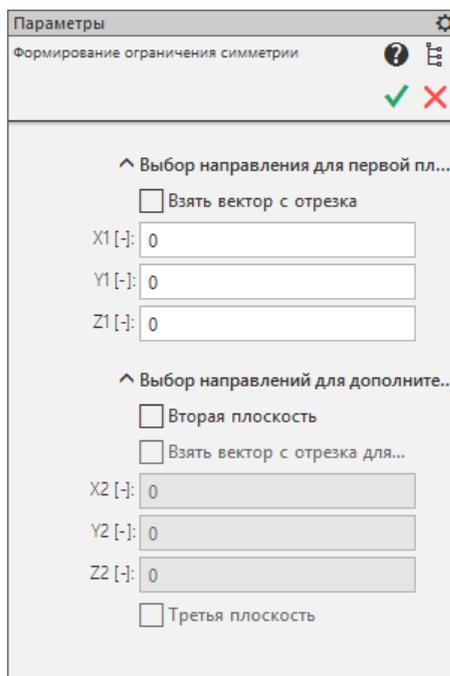


Рис. 4.18. Параметры ограничения «Симметрия»

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.

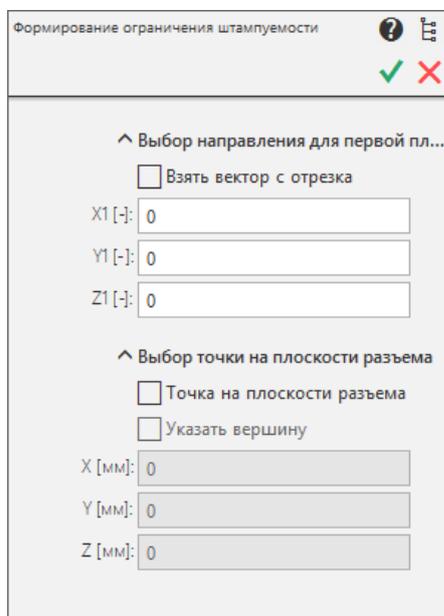


Рис. 4.19. Параметры ограничения «Штамповка»

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.

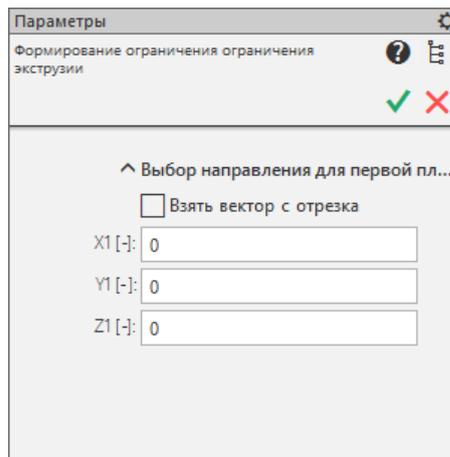


Рис. 4.20. Параметры ограничения «Экструзия»

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

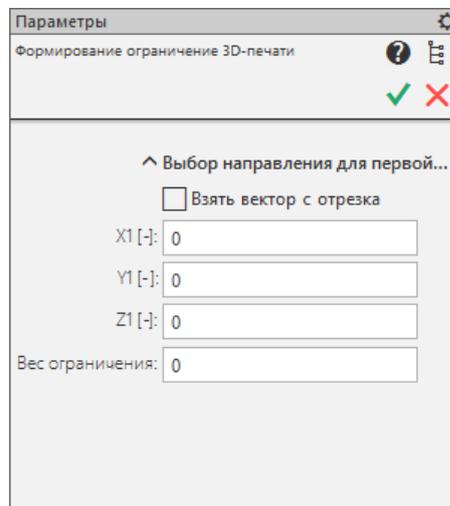


Рис. 4.21. Параметры ограничения «3D-печать»

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.

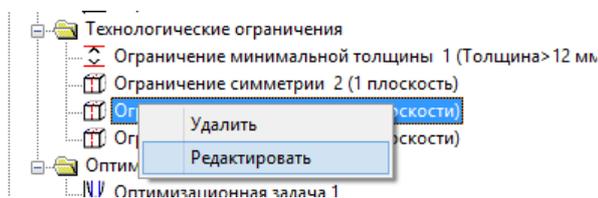


Рис. 4.22. Контекстное меню технологического ограничения

4.3 Задание области проектирования

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

Выберите 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).

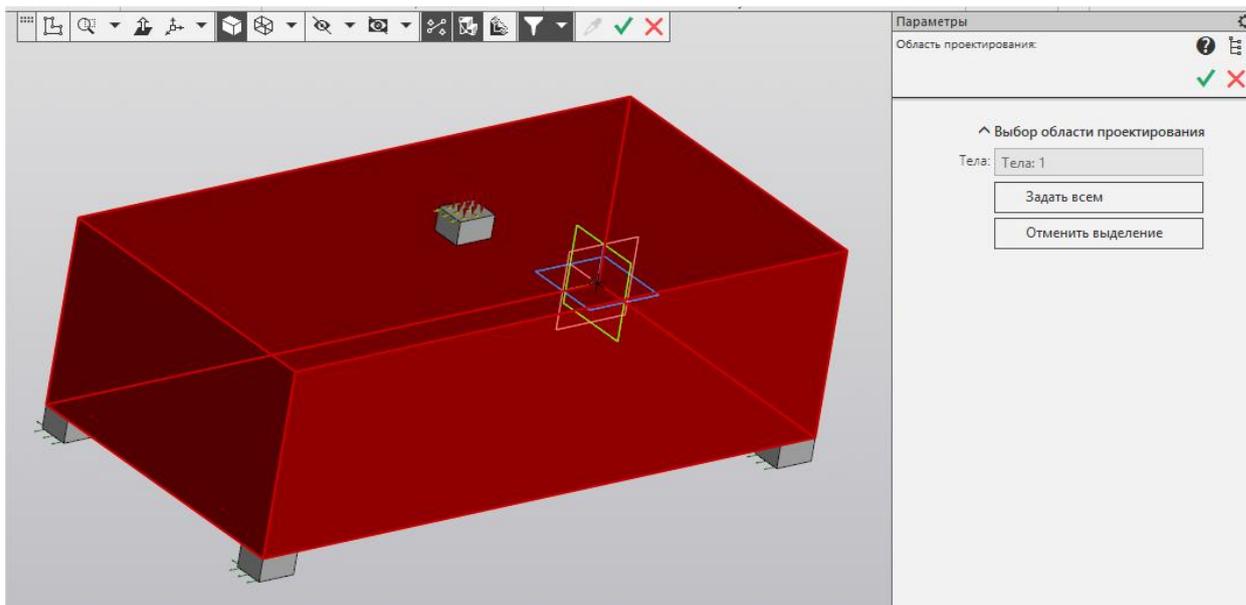


Рис. 4.23. Указание объектов, которые будут входить в область проектирования

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.

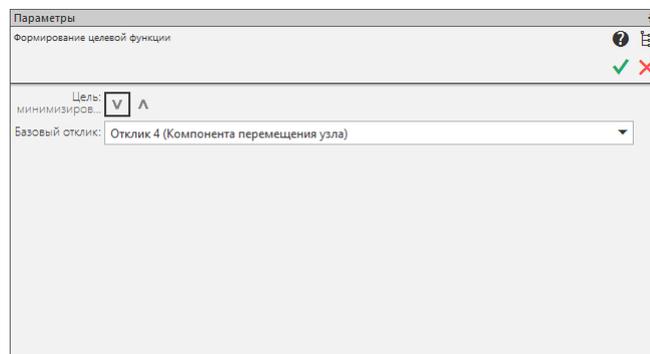


Рис. 4.24. Добавление целевой функции

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

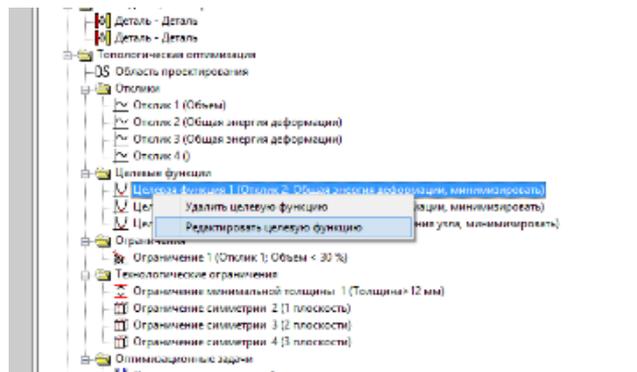


Рис. 4.25. Контекстное меню целевой функции

В случае удаления будет произведена 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.

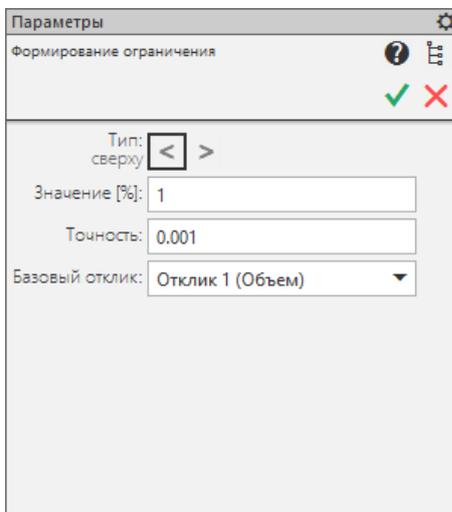


Рис. 4.26. Добавление ограничения

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

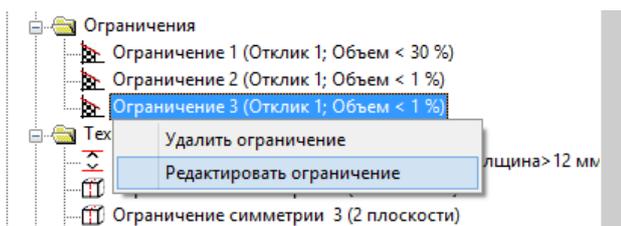


Рис. 4.27. Контекстное меню ограничения

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.

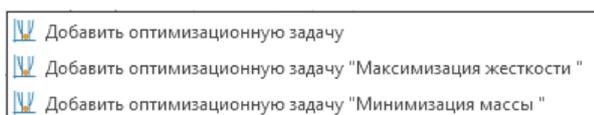


Рис. 4.28. Группа команд добавления оптимизационной задачи

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.

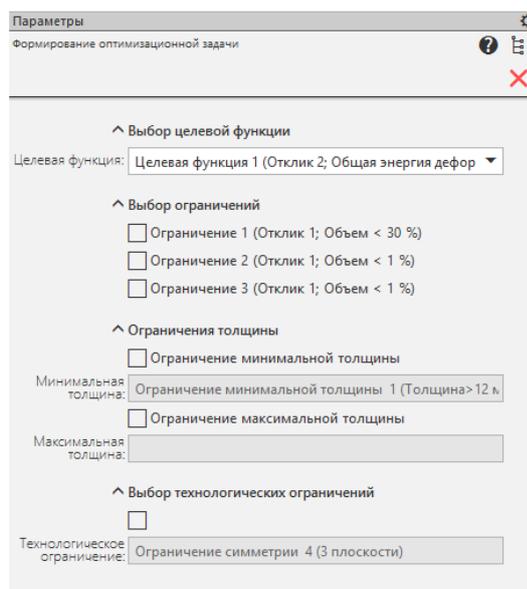


Рис. 4.29. Добавление оптимизационной задачи

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 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.

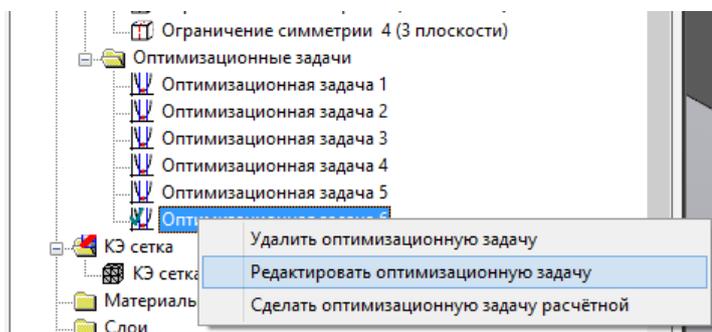


Рис. 4.30. Контекстное меню оптимизационной задачи

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

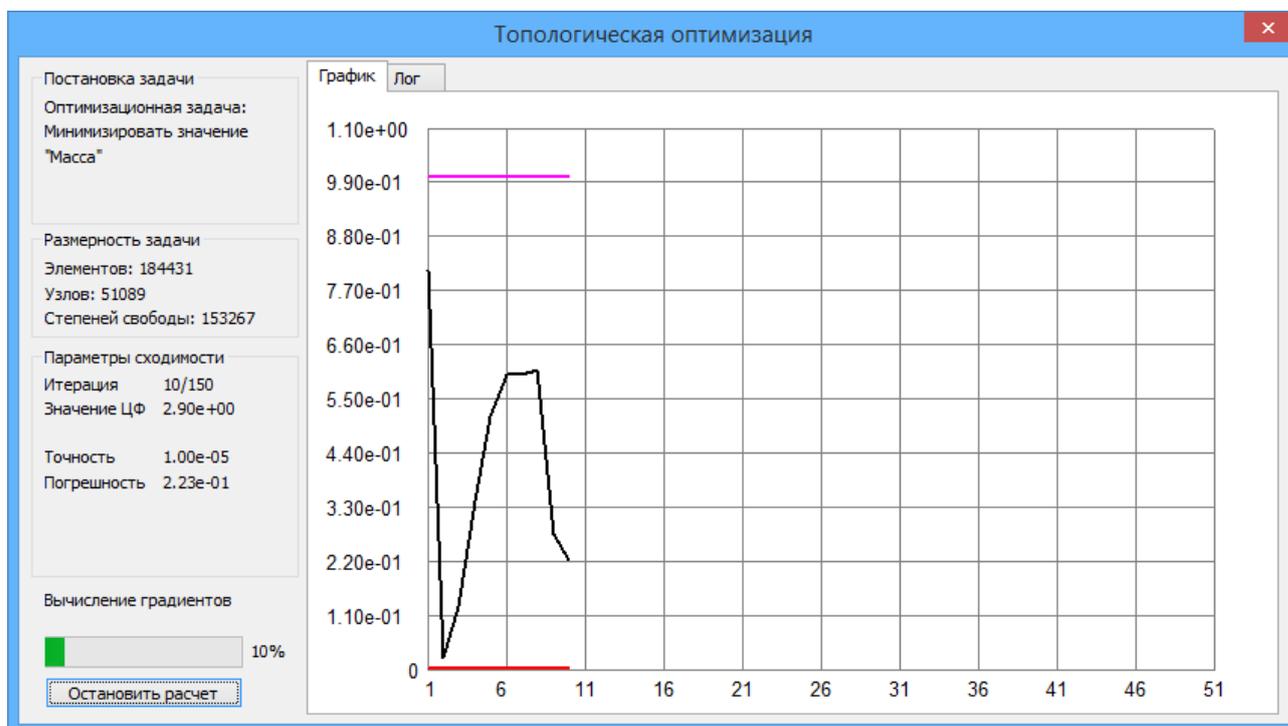


Рис. 4.31. Окно расчёта топологической оптимизации

4.8 Параметры расчёта

При вызове команды  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 параметризацию 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.

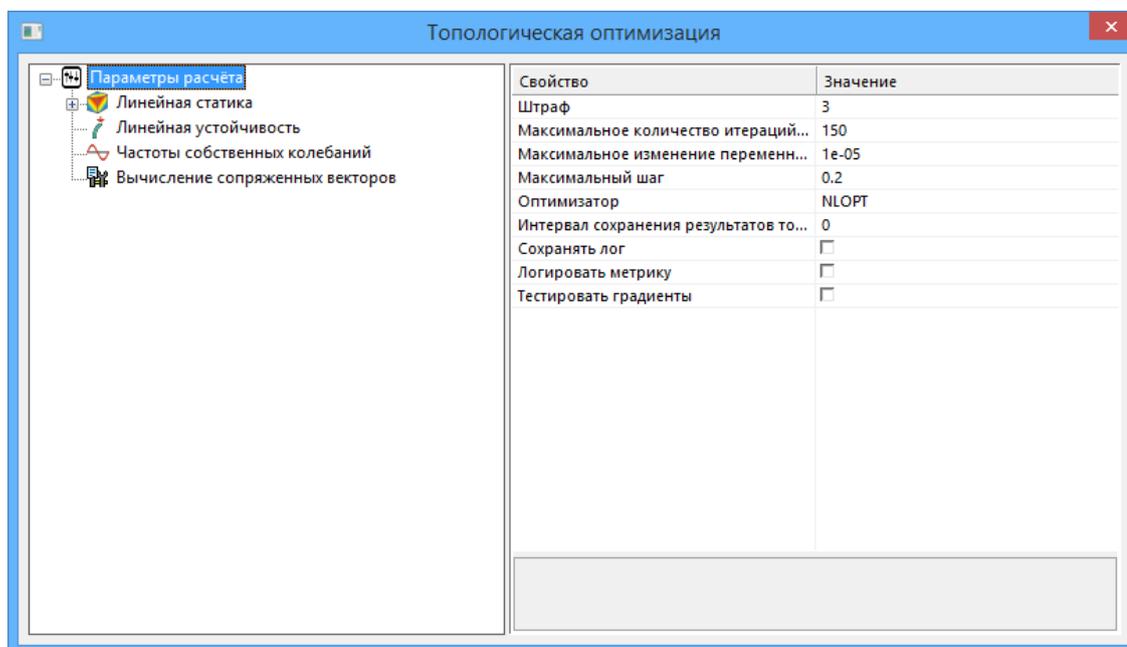


Рис. 4.32. Параметры расчёта топологической оптимизации

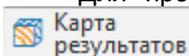
Параметры линейной статики и сопряженных векторов позволяют задать параметры решения СЛАУ: метод решения и объем отводимой памяти. Все эти настройки аналогичны настройкам линейного статического расчёта.

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 Результаты панели инструментов **Результаты**. В диалоговом окне *Параметры вывода результатов* выбрать 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.

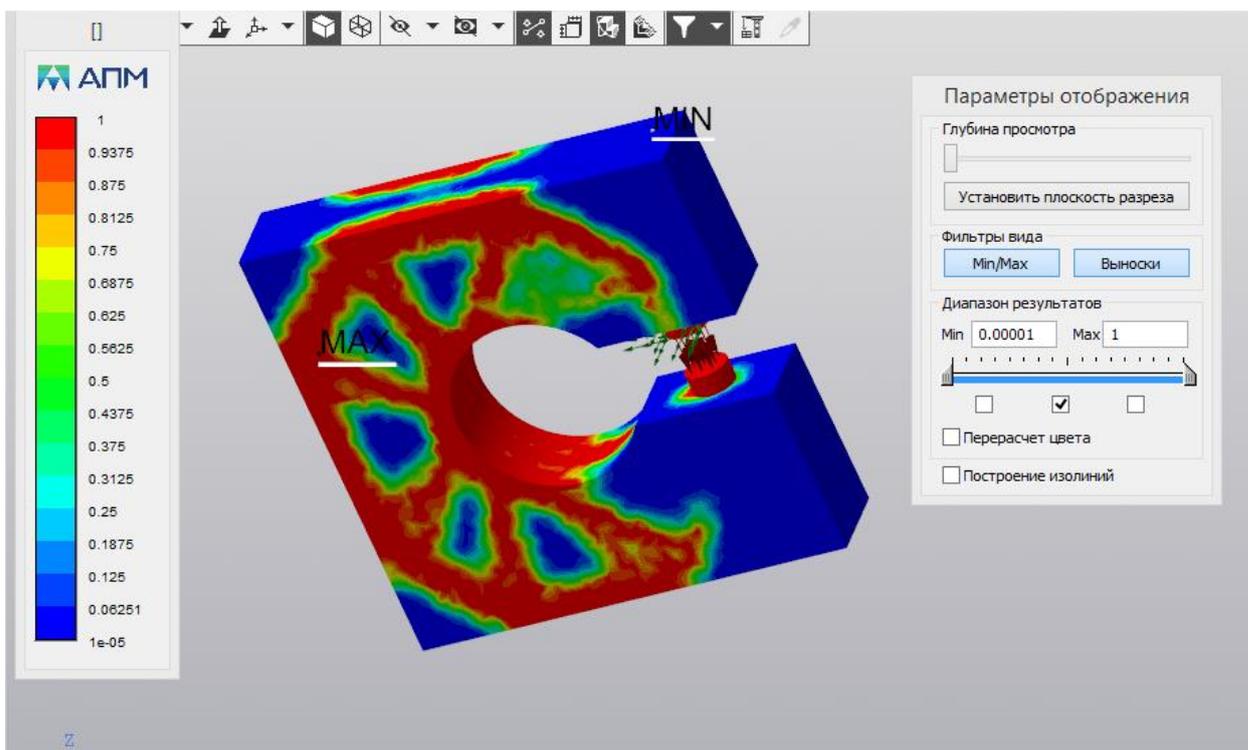
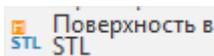


Рис. 4.33. Карта результатов топологической оптимизации

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.