



# **APM Structure3D**

## **Руководство пользователя**

# **APM Structure3D**

Система расчёта и проектирования деталей и конструкций  
МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Версия 17

Руководство пользователя

Научно-технический центр «Автоматизированное Проектирование Машин»  
141070, Россия, Московская область, г. Королёв, Октябрьский бульвар 14, оф. 6  
тел.: +7 (495) 120-58-10.

Наш адрес в Интернете: <http://www.apm.ru>, <http://www.cae.apm.ru>

e-mail: [com@apm.ru](mailto:com@apm.ru)

Авторские права © 1989 – 2019 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.

Отпечатано в России.

## Оглавление

Введение.....	14
АРМ Structure3D – что это такое?.....	14
Требования к аппаратному и программному обеспечению .....	16
Глава 1. Редактор трехмерных конструкций.....	17
Элементы редактора.....	17
Виды.....	18
Указатели мыши .....	19
Настройка интерфейса .....	20
Фильтры вида.....	20
Дополнительные фильтры нагрузки.....	25
Дополнительные фильтры свойства .....	25
Глава 2. Дерево настроек.....	28
Настройки программы .....	28
CPU & GPU.....	28
Настройки графики.....	29
Настройки сохранения .....	29
Настройки карт результатов .....	29
Параметры расчетов .....	29
Общие настройки.....	29
Линейная статика.....	30
Линейная устойчивость.....	31
Частоты собственных колебаний .....	32
Вынужденные колебания .....	32
Усталостный расчет.....	33
Глава 3. Описание команд .....	37
Меню Файл.....	37
Создать   Конструкция.....	37
Создать   Сечение.....	37
Создать   Соединение .....	37
Открыть.....	37
Закрыть .....	37
Сохранить (Сохранить как).....	37
Сохранить / загрузить результаты.....	37
Загрузить часть модели .....	37
Параметрическая модель .....	38
Дополнительные модели.....	38
Импорт .....	38
Экспорт .....	38
Импорт из Компас-3D .....	39
Свойства.....	39
Печать .....	39
Установка принтера.....	39
Последние файлы.....	39
Выход.....	40
Меню Редактирование .....	40
Редактировать элемент.....	40
Копировать .....	40
Вставить.....	40
Выделение прямоугольником.....	40

Выделение окружностью .....	41
Выделение произвольным контуром .....	41
Выделение элементов по нормали .....	41
Инвертировать выделение .....	41
Выбрать всё .....	41
Отменить.....	41
Повторить .....	42
Отмена операций .....	42
Меню Вид.....	42
Строка состояния .....	42
Дерево объектов.....	42
Окно свойств .....	42
Поворот вида .....	42
Положение плоскости .....	42
Установить глубину вида.....	43
Вид по 3 узлам.....	43
Центр поворота .....	43
Показывать шкалу размеров .....	43
Режим динамического вращения .....	43
Использовать локальные координаты .....	44
Сетка.....	44
Шаг курсора и привязка .....	44
Палитра .....	44
Единицы измерения.....	44
Масштаб.....	44
Параметры привязки.....	44
Увеличить область .....	45
Установки для всех видов .....	45
Наборы стандартных видов .....	45
Произвольный вид .....	45
Вид слева .....	45
Вид сверху .....	45
Вид спереди.....	45
Меню Рисование.....	45
Узел   По координатам .....	45
Узел   На стержне.....	45
Узел   Локальная система координат .....	46
Узел   Масса.....	46
Стержень   Создать стержень .....	47
Стержень   Разбить стержень.....	47
Стержень   Обойма.....	48
Элементы трубопроводов   Участок трубы .....	48
Элементы трубопроводов   Тройник.....	48
Элементы трубопроводов   Отвод по трем точкам.....	48
Элементы трубопроводов   Отвод по концам двух стержней .....	49
Элементы трубопроводов   Отвод по двум стержням и радиусу .....	49
Элементы трубопроводов   Трубопроводная арматура.....	50
Пластина   Четырехугольная прямоугольная.....	50
Пластина   Четырехугольная произвольная .....	50
Пластина   Произвольная с разбиением.....	50

Пластина   Треугольная .....	51
Пластина   Сфера.....	51
Пластина   Цилиндр из треугольных элементов .....	52
Пластина   Тор .....	52
Пластина   Разбить пластину .....	52
Пластина   На свободных гранях объемных элементов .....	53
Пластина   Прямоугольная пластина с отверстием .....	53
Плита   Создать плиту .....	54
Плита   Редактировать плиту .....	54
Плита   Параметры разбиения .....	54
Плита   Удалить всю КЭ сетку.....	54
Плита   Расчленив плиту.....	54
Плита   Расчленив блок плит.....	54
Объемные элементы .....	54
Объемные элементы   Геометрические примитивы .....	54
Объемные элементы   Разбить 8/20-узловой элемент .....	55
Дуга .....	55
Окружность .....	55
Опора   Жесткое закрепление .....	56
Опора   Упругое закрепление .....	56
Опора   Односторонняя опора .....	56
Опора   Упругое основание.....	57
Опора   Закрепление по линии.....	57
Упругая связь .....	57
Шарнир   Выделенным узлам .....	57
Шарнир   Всем узлам .....	58
Шарнир   На конце стержня.....	58
Освобождение связи .....	58
Совместные перемещения .....	58
Удалить выбранное.....	58
Удалить все.....	59
Несколько узлов в одной точке .....	59
Меню Нагрузки.....	59
Сила к узлу .....	59
Момент к узлу .....	59
Перемещения в узле .....	59
Температура в узле .....	60
Предварительная деформация .....	60
Распределенная на стержень в ЛСК.....	61
Распределенная на стержень в ГСК.....	61
Ветровая нагрузка на стержень .....	61
Температура на стержень.....	62
Удалить нагрузки на стержень .....	62
Тип нагрузки на стержень   Осевая сила .....	63
Тип нагрузки на стержень   Поперечная сила .....	63
Тип нагрузки на стержень   Момент кручения .....	63
Тип нагрузки на стержень   Момент изгиба .....	63
Тип нагрузки на стержень   Осевая распределенная сила .....	64
Тип нагрузки на стержень   Поперечная распределенная сила .....	64
Тип нагрузки на стержень   Распределенный момент кручения .....	64

Тип нагрузки на стержень   Распределенный момент изгиба.....	64
Распределенная нагрузка на пластину.....	65
Линейная распределенная нагрузка на пластину .....	65
Снеговая нагрузка.....	66
Ветровая нагрузка.....	66
Температурная на пластину.....	67
Линейная температура на пластину.....	67
Давление на объемный элемент.....	68
Ускорение   Линейное ускорение.....	68
Ускорение   Угловое ускорение.....	68
Загружения.....	68
Динамические загрузки.....	69
Комбинация загрузок.....	69
Статические нагрузки в массы.....	70
Случайные загрузки.....	70
График нагрузки.....	71
Линейная нагрузка на плиту.....	71
Собственный вес.....	71
Меню Инструменты.....	71
Выталкивание.....	71
Полярный массив.....	73
Повернуть.....	74
Поворот+.....	74
Зеркало.....	74
Выравнивание узлов.....	75
Пружина.....	75
Шаблонная сетка.....	76
Установка шаблона.....	76
Слой.....	76
Добавить в текущий слой.....	78
Проверки   На связанность.....	78
Проверки   На соответствие материалов.....	78
Проверки   На наличие сечения.....	78
Проверки   Совпадения стержней.....	78
Проверки   Углов пластин.....	78
Проверки   Совпадения пластин.....	78
Проверки   Объемных элементов.....	78
Проверки   Совпадения объемных элементов.....	79
Проверки   Относительный размер.....	79
Проверки   Сужение.....	79
Проверки   Якобиан.....	79
Проверки   Коробление.....	79
Проверки   Качество элементов.....	79
Совместить узлы.....	79
Выделить свободные узлы.....	80
Операции с сеткой   Повысить порядок объемных элементов.....	80
Операции с сеткой   Разделить объемные элементы.....	80
Операции с сеткой   Сгущение сетки (4-узловые тетраэдры).....	80
Операции с сеткой   Построить свободные ребра.....	80
Операции с сеткой   Смещения пластин по нормали.....	81

Операции с сеткой   Встроить трещину в модель (4-узловые тетраэдры) .....	81
Операции с сеткой   Всё со всем.....	81
Операции с сеткой   Сетчатые структуры .....	81
Операции с сеткой   Объемная доля.....	81
Операции с сеткой   Сетка в замкнутой оболочке .....	83
Операции с сеткой   Создать твердотельную модель стержня.....	83
Создать контактные элементы.....	84
Области и группы   Подконструкции.....	84
Области и группы   Группы элементов.....	85
Связь группа узлов – узел .....	86
Связь группа узлов – группа узлов .....	86
Дополнительные операции   Пересечение стержней и/или пластин .....	86
Дополнительные операции   Соединение скрещивающихся стержней .....	87
Дополнительные операции   Угол между двумя стержнями .....	87
Дополнительные операции   Угол между двумя пластинами .....	87
Дополнительные операции   Угол между стержнем и пластиной .....	87
Дополнительные операции   Проекция узлов на стержень.....	87
Дополнительные операции   Проекция узлов на пластину.....	87
Дополнительные операции   Найти центр тяжести контура.....	87
Дополнительные операции   Найти центр по 3 точкам.....	87
Проецирование узлов на плоскость .....	88
Проецирование узлов на цилиндр.....	88
Проецирование узлов на сферу .....	88
Измерить расстояние между узлами .....	89
Инерция выделенных объектов .....	89
Сервер расчета   Сервер обмена TCP/IP .....	89
Сервер расчета   Импорт нагрузок из FlowVision.....	89
Меню Свойства.....	89
Сечения .....	89
Сечение стержням.....	92
Ориентация сечения .....	92
Информация о стержне .....	93
Точка привязки сечения .....	93
Инвертировать систему координат стержня .....	94
Длина выделенных стержней .....	94
Тип стержневых элементов.....	94
Начальные условия для SMA .....	94
Свойства элементов трубопроводов .....	94
Задать толщину пластинам .....	96
Информация о пластине .....	96
Привязка пластин.....	97
Пластина без жесткости .....	97
Инвертировать ЛСК пластин .....	97
Ориентировать ЛСК пластин.....	97
ЛСК пластин по умолчанию .....	98
Площадь выделенных элементов .....	98
Тип оболочечных элементов .....	99
Информация об объемном элементе.....	99
Объем выделенных элементов .....	100
Ориентировать ЛСК объемных элементов.....	100

Информация о контактных элементах .....	100
Информация о грунтах .....	102
Материалы .....	103
Информация о модели   Масса и моменты инерции выделенных элементов .....	104
Информация о модели   Масса и моменты инерции модели .....	105
Информация о модели   Габаритные размеры модели .....	105
Информация о модели   Общие сведения о модели .....	105
Информация о модели   Требования к оперативной памяти .....	105
Меню Проектирование .....	105
Типы конструктивных элементов .....	105
Конструктивные элементы .....	105
Поместить в конструктивный элемент .....	105
Поместить в отдельные конструктивные элементы .....	106
Поместить в армокаменный конструктивный элемент .....	106
Поместить в отдельные армокаменные конструктивные элементы .....	106
Удалить из конструктивного элемента .....	106
Обновление списка продавливаний .....	106
Узлы металлоконструкций .....	106
Меню Расчеты .....	106
Расчет .....	107
Расчет электромагнитных полей .....	107
Расчет подконструкций .....	108
Усталостный расчет для случайных нагрузжений .....	108
Проверка несущей способности .....	108
Подбор армирования констр. элементов .....	108
Проверка армирования констр. элементов .....	108
Расчетные комбинации загружений .....	108
Расчет соединений .....	108
Топологическая оптимизация .....	109
Параметрическая оптимизация .....	109
Параметры усталостного расчета .....	109
Панель параметров расчета .....	109
Меню Результаты .....	109
Выбор модели для вывода результатов .....	109
Нагрузки .....	110
Карта результатов .....	110
Напряжения в сечении .....	112
Силовые факторы в элементе .....	112
Реакции в опорах .....	113
Срез композита .....	113
Коэффициент концентрации напряжений .....	113
Таблица расхода .....	114
Результаты РСУ .....	114
Устойчивость .....	114
Собственные частоты .....	114
Анимация .....	114
Вынужденные колебания .....	114
Параметры вывода анимации вынужденных колебаний .....	115
График перемещения .....	115
График напряжений .....	115



Долговечность при случайном усталостном нагружении .....	115
Результаты теплового анализа.....	115
Параметры карты результатов теплового анализа .....	115
Карта армирования .....	115
Параметры вывода армирования.....	115
Диапазон результатов.....	115
Параметры вывода результатов.....	115
Меню Окно.....	115
Каскад .....	115
Расположить все.....	116
Расположить иконки.....	116
Меню Справка.....	116
Содержание .....	116
Сайт компании НТЦ АПМ.....	116
Примеры проектов НТЦ АПМ .....	116
Видеоуроки.....	116
Центр поддержки пользователей .....	116
О модуле .....	116
Глава 4. Динамические и случайные загрузки .....	117
Динамические загрузки.....	117
Задание сейсмического воздействия по СНиП (СП).....	118
Задание сейсмического воздействия через спектр ответа .....	119
Задание пульсационной ветровой нагрузки .....	120
Случайные загрузки .....	121
Глава 5. Свойства материалов.....	124
Группа свойств Анизотропный материал .....	124
Группа свойств Физическая нелинейность .....	125
Группа свойств SMA .....	126
Группы нелинейных свойств материала .....	127
Группа свойств Термический материал .....	128
Группа свойств Течение.....	128
Группы Электромагнитных свойств.....	129
Группа свойств Слоистый композит .....	129
Формула для углов и толщин композита .....	131
Плотность композита .....	132
Группа свойств Демпфирование .....	133
Группа свойств Усталость .....	133
Группа свойств для Линейно-упругой механики разрушений .....	134
Глава 6. Гармонический анализ .....	136
Основные шаги для формирования модели.....	136
Задание кинематической нагрузки .....	136
Задание фазового угла.....	138
Задание демпфирования.....	139
Настройки расчёта гармонического анализа .....	139
Задание на расчёт.....	141
Настройки визуализации результатов гармонического анализа.....	143
Основная последовательность действий при проведении гармонического анализа .....	147
Глава 7. Расчет.....	149
Линейный статический расчет .....	149
Расчет устойчивости .....	150

Геометрически нелинейный расчет .....	151
Физически нелинейный расчет .....	154
Расчет контактного взаимодействия.....	155
Общий нелинейный расчет.....	155
Трещины – XFEM.....	155
Краткие теоретические сведения .....	155
Система координат, связанная с трещиной.....	155
Характер напряжений в окрестности фронта .....	156
Описание XFEM.....	157
Сравнение с другими методами .....	160
Требования к модели .....	160
Результаты расчета .....	160
Трещины – жизнь/смерть элементов .....	161
Краткие теоретические сведения .....	161
Вызов в APM Structure 3D.....	166
Конструктивный элемент «Канат» .....	168
Общие сведения .....	168
Назначение параметров расчета.....	169
Диалог «Расчет».....	170
Расчет на собственные частоты .....	171
Расчет вынужденных колебаний.....	171
Краткие теоретические сведения .....	171
Метод разложения по собственным формам .....	171
Метод прямого интегрирования.....	172
Результаты расчета .....	173
Расчет усталостной прочности.....	174
Краткие теоретические сведения .....	174
Задание усталостных параметров.....	175
Задание случайной нагрузки.....	179
Методика расчета.....	187
Расчет случайной усталости по статике .....	190
Расчет случайной усталости через вынужденные колебания .....	191
Тепловой расчет.....	193
Термические свойства материала.....	193
Граничные и начальные условия.....	195
Типы и параметры тепловых расчетов .....	202
Результаты теплового расчета .....	203
Теоретические основы по задачам нестационарной теплопроводности.....	208
Односторонний FSI в APM Structure3D .....	214
Двусторонний FSI в APM Structure3D и FlowVision.....	216
Допустимые типы элементов в APM Structure3D.....	216
Допустимые типы материала.....	216
Типы анализа. Граничные условия и нагрузки .....	216
Экспорт модели твердого тела .....	217
Настройка сервера расчета.....	218
Анализ электромагнитных полей.....	219
Анализ течения жидкостей и газов.....	219
Глава 8. Общий структурный анализ .....	221
Текущие возможности и ограничения.....	221
Допустимые типы элементов.....	221

Допустимые типы свойств материала .....	221
Граничные условия и нагрузки .....	221
Проведение анализа.....	222
Создание анализа .....	222
Удаление анализа.....	222
Проведение расчета .....	223
Настройки анализа.....	225
Выбор результатов анализа.....	228
Нелинейные свойства материалов .....	228
Идеальный упругопластичный.....	228
Изотропное билинейное упрочнение.....	228
Изотропное мультлинейное упрочнение.....	229
Изотропное нелинейное упрочнение .....	229
Предупреждения о прерывании расчета .....	236
Глава 9. Конструктивные элементы .....	238
Общая информация о конструктивных элементах.....	238
Стальные конструктивные элементы .....	238
Общие сведения .....	238
Назначение стальных элементов .....	239
Параметры расчёта стальных элементов.....	240
Параметры диалога стальных элементов .....	242
Результаты расчёта стальных элементов.....	243
Железобетонные конструктивные элементы.....	244
Общие сведения .....	244
Назначение армированных элементов.....	244
Параметры расчёта армированных элементов.....	247
Параметры диалога армированных элементов .....	253
Особенности реализации расчёта.....	255
Результаты расчёта армированных элементов.....	256
Расчет оснований и фундаментов .....	258
Общие принципы работы с диалоговым окном Фундаменты.....	260
Основные понятия APM Structure3D при моделировании грунтов.....	269
Задание характеристик грунтов оснований.....	270
Алюминиевые конструктивные элементы .....	273
Общие сведения .....	273
Назначение алюминиевых элементов .....	273
Параметры расчёта алюминиевых элементов.....	275
Параметры диалога алюминиевых элементов .....	277
Результаты расчёта алюминиевых элементов.....	278
Расчётные комбинации нагрузжений .....	279
Общие сведения .....	279
Назначение параметров расчёта .....	279
Диалог «Расчётные комбинации нагрузжений» .....	280
Список литературы по конструктивным элементам.....	283
Глава 10. Результаты.....	284
Результаты статического расчета.....	284
Перемещения узлов конструкции, нагрузки на концах стержней, в узлах пластин и объемных элементов.....	284
Эпюры силовых факторов для всей конструкции .....	285

Карта распределения результатов в стержнях, пластинах и объёмных элементах (обычная) .....	286
Карта распределения результатов в стержнях, пластинах и объёмных элементах (альтернативная) .....	286
Результаты расчета топологической оптимизации .....	289
Карта распределения напряжений в сечении стержня .....	292
Реакции в опорах .....	292
Срез композита .....	292
Расход .....	293
Результаты расчета РСУ ... ..	293
Результаты расчета на устойчивость .....	296
Результаты геометрически нелинейного расчета .....	296
Результаты расчета односторонних опор и канатов .....	296
Результаты расчета задачи пластичности .....	297
Результаты расчета общей нелинейности .....	297
Результаты расчета на собственные частоты .....	297
Результаты расчета на вынужденные колебания .....	298
Перемещения узлов конструкции .....	298
Напряжения, перемещения, усилия .....	299
Расчет несущей способности стержней .....	299
Результаты расчёта контактного взаимодействия .....	301
Расширенное представление результатов армирования .....	301
Результаты расчета коэффициента концентрации напряжений .....	302
Вызов в APM Structure3D .....	302
Пример расчета коэффициента концентрации .....	305
Глава 11. Топологическая оптимизация .....	311
Формирование оптимизационной задачи и система откликов .....	311
Выбор области проектирования .....	311
Формирование постановки оптимизационной задачи, отклики .....	312
Параметры расчёта .....	319
Подпункт "линейная статика" .....	321
Подпункт "Вычисление сопряженных векторов" .....	321
Расчёт .....	322
Глава 12. Расчет моделей с трещиной .....	324
Операция встроить трещину в модель (4 узловые тетраэдры) .....	324
Краткие теоретические сведения .....	324
Вызов в APM Structure 3D .....	325
Глава 13. Вспомогательные инструменты ввода исходных данных: редакторы функций, таблиц, выражений .....	334
Редактор функций .....	334
Справочник команд редактора функций .....	334
Настройки редактора .....	336
Задание графика функции .....	337
Сохранение графика функции .....	345
Редактор таблиц .....	345
Заполнение и редактирование таблицы .....	346
Добавление и удаление ячеек .....	348
Редактор выражений .....	348
Диалог задания выражения .....	348
Синтаксис выражений .....	350

Примеры выражений .....	352
Единицы измерения.....	353
Проверка на ошибки.....	353
Работа с деревом расчетной модели .....	354
Материалы.....	354
Нагрузки .....	354
Системы координат .....	358
Результаты.....	359
Работа с инструментом «Таблица» .....	360
Глава 14. Краткие теоретические сведения .....	361
О методе конечных элементов .....	361
Основные типы конечных элементов (КЭ).....	362
Системы координат .....	363
Степени свободы .....	364
Стержневой КЭ .....	365
3-х угольная пластина .....	366
4-х угольная пластина .....	366
Объемный элемент .....	366
Специальные элементы.....	366
Ограничения на форму конечных элементов .....	367
Напряжения.....	368
Список литературы по методу конечных элементов .....	368

# Введение

## APM Structure3D – что это такое?

APM Structure3D представляет собой универсальную систему для расчета и проектирования стержневых, пластинчатых, оболочечных, твердотельных, а также смешанных конструкций.

С помощью программы Вы можете рассчитать произвольную трехмерную металлоконструкцию, состоящую из стержней произвольного поперечного сечения, пластин, оболочек и объёмных деталей при произвольном нагружении и закреплении. При этом соединения элементов в узлах может быть как жестким, так и шарнирным.

Кроме того, может быть проведен проектировочный и проверочный расчет армированных (железобетонных и армокаменных) конструкций, состоящих из стержневых и пластинчатых элементов с подбором и проверкой необходимой арматуры в соответствии со СНиП и СП, а также деревянных конструкций.

Может быть также выполнен расчет столбчатых, ленточных, сплошных и свайных фундаментов, как элементов на упругом основании, с заданием параметров грунтов.

В программе могут быть рассчитаны оболочечные конструкции, выполненные из композиционных материалов.

К элементам конструкций могут быть приложены следующие нагрузки и воздействия:

- сосредоточенные силы и моменты (постоянные и переменные во времени).
- распределенные нагрузки по длине, площади и объему (постоянные и переменные во времени).
- нагрузки, заданные линейным и/или угловым перемещением (постоянные и переменные во времени).
- снеговые, ветровые и сейсмические (по СНиП, а также задаваемые спектром ответа), с учетом распределенных и сосредоточенных масс, линейных и вращательных степеней свободы.
- давление гидростатического типа.
- давление контактного типа.
- центробежные (заданные линейным и/или угловым ускорением).
- гравитационные, в том числе с различными множителями для различных элементов.

- температурные градиенты.
- параметры теплообмена и излучения.
- расчетные сочетания усилий и нагрузок (PCY и PCH).

В результате выполненных системой APM Structure3D расчетов Вы можете получить следующую информацию:

- нагрузки в узлах элементов конструкции
- карту распределения напряжений и перемещений в конструкции
- деформации (в различных направлениях) в произвольной точке пластинчатых и объемных элементов конструкции
- карту распределения напряжений в произвольном сечении стержневых элементов
- эпюры изгибающих и крутящих моментов, поперечных и осевых сил и т.д. для отдельного стержня и для конструкции в целом
- результаты проверки стальных и деревянных конструктивных элементов на несущую способность по СНиП и СП
- подбор и проверку подобранной арматуры для железобетонных и армокаменных конструкций в соответствии со СНиП и СП
- коэффициенты запаса устойчивости конструкции по Эйлеру и соответствующие им формы потери устойчивости
- напряженно-деформированное состояние конструкции при больших перемещениях (геометрически нелинейная задача)
- поведение конструкции за пределами упругой зоны материала (физически нелинейная задача)
- решение задачи общей нелинейности при больших перемещениях в конструкции и нелинейных свойствах материала
- определение размеров зоны контакта, а также распределение нормальных и касательных напряжений в этой зоне
- карта распределения температур при стационарной и нестационарной теплопередаче
- частоты и формы собственных колебаний конструкции
- напряженно-деформированного состояния конструкции под действием произвольно меняющихся во времени нагрузок

## Требования к аппаратному и программному обеспечению

### Минимальные:

ОС: Windows 7/8/10, либо из семейства Windows Server;

Два процессора (ядра), поддерживающие 64-х разрядную адресацию.

Объем оперативной памяти – 8 ГБ.

Размер свободного пространства на жестком диске 500 ГБ.

Видеокарта Radeon или Nvidia с аппаратной поддержкой OpenGL.

### Рекомендуемые:

ОС: Windows 7/8/10, либо из семейства Windows Server;

4-х ядерный процессор, поддерживающий 64-х разрядную адресацию.

Объем оперативной памяти – от 16 ГБ.

Размер свободного пространства на жестком диске 1,5 ТБ.

Видеокарта Radeon или Nvidia с аппаратной поддержкой OpenGL.



# Глава 1. Редактор трехмерных конструкций

## Элементы редактора

Редактор конструкций содержит в себе окна видов, меню, панели управления и панель состояния. Элементами вида являются узлы, стержни, нагрузки различного вида, вспомогательные точки такие как центр вращения и центр локальной системы координат и т.д. Все элементы вида изображаются отдельным цветом. Пользователь может изменять цвета всех элементов вида и сохранять эти установки цветов в группах, называемых палитрой. Элементы редактора и вида показаны ниже на рисунке.

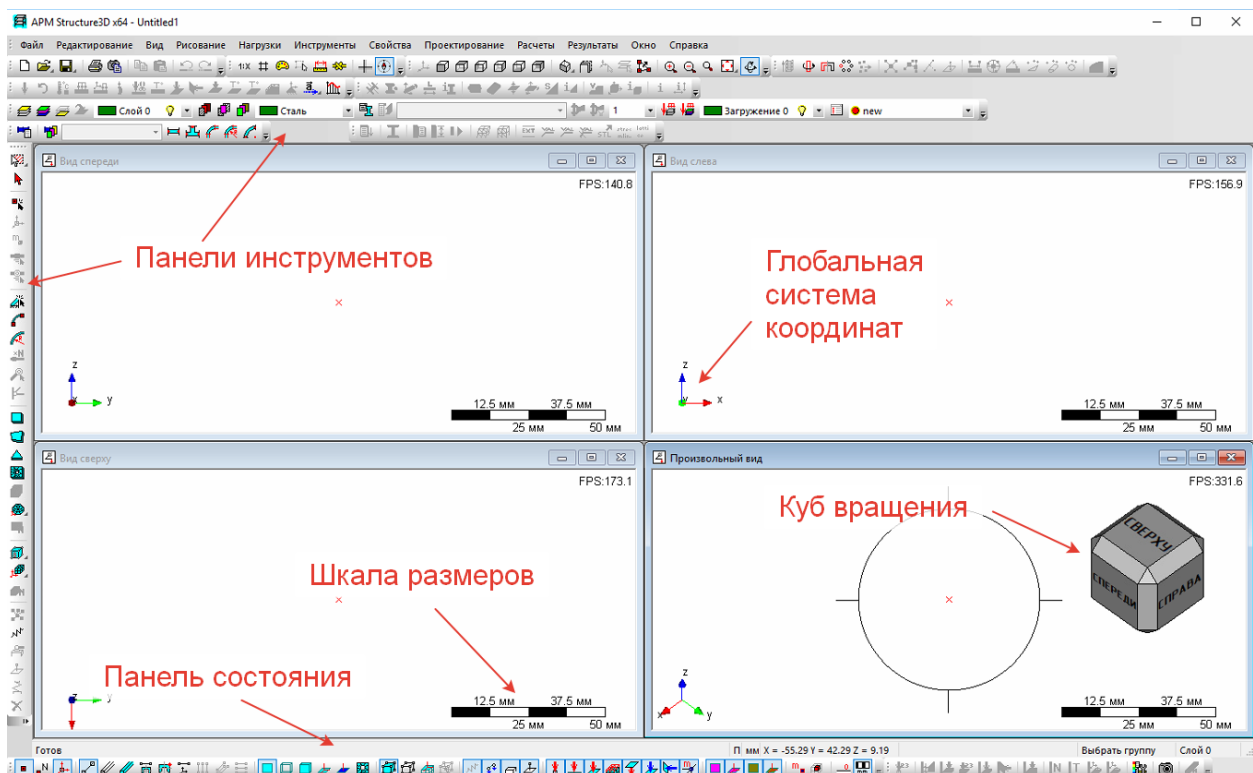


Рисунок 1.1 – Элементы редактора

Панель состояния служит для отображения основной нужной информации по текущей работе. Эта информация включает в себя единицы измерения длины конструкции, координаты курсора, информация необходимая для текущей операции, например, при рисовании окружности ее радиус, и название текущей операции. Панель состояния редактора конструкции показана ниже.

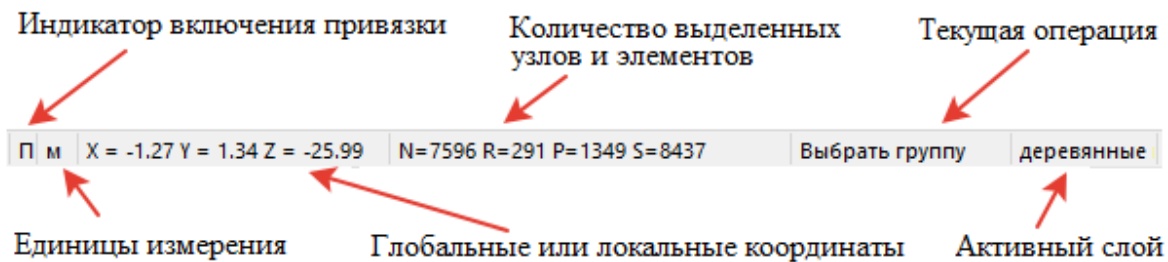


Рисунок 1.2 – Структура панели состояния

## Виды

В основе работы редактора лежит операция проецирования на плоскость. Такая плоскость называется видовой плоскостью или просто видом.

При редактировании конструкции пользователь работает с такими видовыми плоскостями. Видовая плоскость характеризуется двумя параметрами – поворотом и положением. Поворот определяет направление нормали плоскости и задается двумя углами –  $\varphi$  и  $\theta$ , как и в сферической системе координат. Второй параметр – положение в пространстве задается вектором.

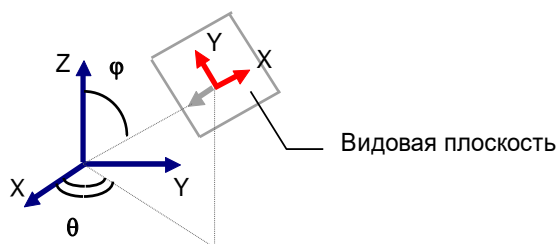


Рисунок 1.3 – Видовая плоскость в пространстве

Иногда, например, при параллельном переносе плоскости в пространстве, удобно задавать положение плоскости глубиной, скалярной величиной, равной расстоянию от центра координат до плоскости, аналогом  $\rho$  в сферической системе координат.

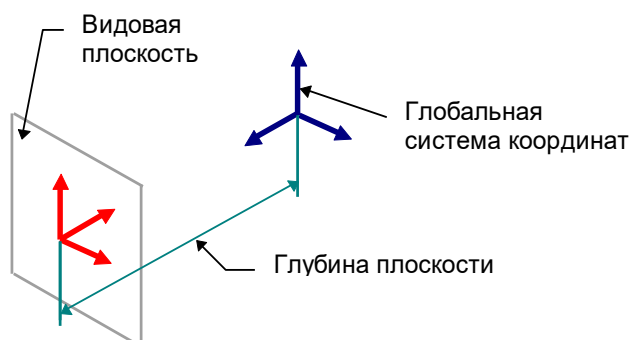


Рисунок 1.4 – Глубина вида

Виды бывают главные, когда направление нормали совпадает с одной из осей системы координат. Такими видами являются вид сверху, снизу, справа, слева, спереди

и сзади. Если направление нормали не совпадает с направлением одной из осей системы координат, то такой вид называется произвольным.

В редакторе пользователю доступны 4 вида, которые представляют собой отдельные окна, которые можно открывать, закрывать и располагать на экране так, как это удобно пользователю. Изначально видовые плоскости установлены как вид спереди, слева, сверху и произвольный или изометрический.

Для ускоренной работы с видами служит панель Видовая плоскость.



Рисунок 1.5 – Панель инструментов видовая плоскость




Для ускоренного выбора видом и поворота модели в рабочем поле удобно использовать Куб. Куб появляется при нажатии и удержании нажатой клавиши Ctrl. При наведении на куб указателя мыши размеры куба в рабочем поле увеличиваются. Для выбора одного из стандартных видов необходимо нажать указателем мыши по соответствующей грани куба – основной или скошенной. Для поворота модели в рабочем поле необходимо нажать на соответствующую стрелку куба.










Для того чтобы изображение модели оптимально размещалось на экране, пользователь может ее перемещать, масштабировать и вращать с использованием мыши, не прерывая текущую команду.

Вращение модели без прерывания текущей команды осуществляется при удержании нажатой клавиши Ctrl. При этом на экране появляется штурвал с помощью которого можно выполнить поворот в строго определенной плоскости, в зависимости от того, где находится указатель мыши. Для информирования о текущем режиме вращения указатель мыши меняется.

## Указатели мыши

Для удобства работы с отдельными командами указатель мыши изменяет свой вид. Список используемых в APM Structure3D указателей мыши представлен в таблице. Точное указание объектов осуществляется перекрестием указателя мыши, расположенным вверху слева.

	Выделить группу или Увеличить область
	Рисование / Узел или Инструменты / Выравнивание узлов
	Рисование / Стержень по длине и углу или Рисование / Новый стержень

	Рисование / Объемные элементы / Прямоугольный параллелепипед
	Рисование / Объемные элементы / Толстостенная труба
	Рисование / Опора / Жесткое закрепление
	Рисование / Опора / Упругое закрепление
	Рисование / Опора / Односторонняя опора
	Нагрузки / Сила в узле
	Нагрузки / Момент в узле
	Информация об элементе (стержней, пластине, объемном элементе)
	Создание скважины

## Настройка интерфейса

Для настройки панелей инструментов необходимо привести указатель мыши на одну из панелей инструментов и нажать правую кнопку мыши. В контекстном меню можно включить или выключить отображение панелей инструментов на экране. При выборе пункт меню Настройки появляется стандартное диалоговое окно. Рассмотрим вкладки диалогового окна подробнее:

Вкладка Команды содержит все команды меню и их краткое описание

Вкладка Панели инструментов позволяет вкл./выкл. отображение панелей инструментов, а также подписей к кнопкам.

Вкладка Клавиатура позволяет назначить сочетания клавиш для ускоренного вызова команд меню.

Вкладка Меню позволяет настроить анимации выпадающих меню и тени.

Вкладка Параметры позволяет настроить отображение подсказок и сочетаний клавиш для команд.

## Фильтры вида

Конструкция в редакторе может отображаться разными способами. При работе с редактором часто возникает необходимость отображать элементы только определенного

класса, например, только узлы и нагрузки на них и спрятать остальные элементы. Помимо этого, некоторые элементы могут отображаться разными способами. Для управления уровнем визуализации в редакторе используются инструменты, которые называются фильтры. Фильтры определяют показывается ли определенный элемент и на каком уровне.

Стержни могут показываться с помощью трех уровней визуализации (причём каждому типу сечения сопоставлен определённый цвет):

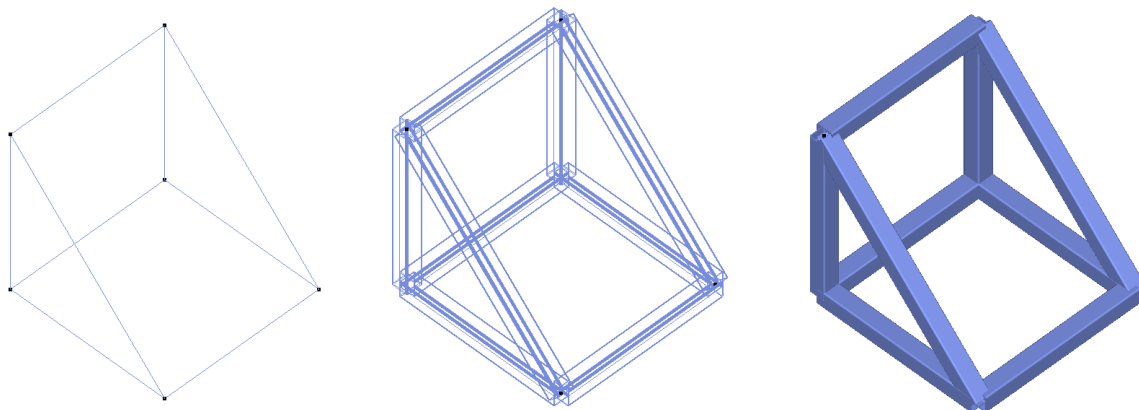


Рисунок 1.6 – Различные типы визуализации стержней

Пластины также отображаются с помощью трех уровней визуализации:

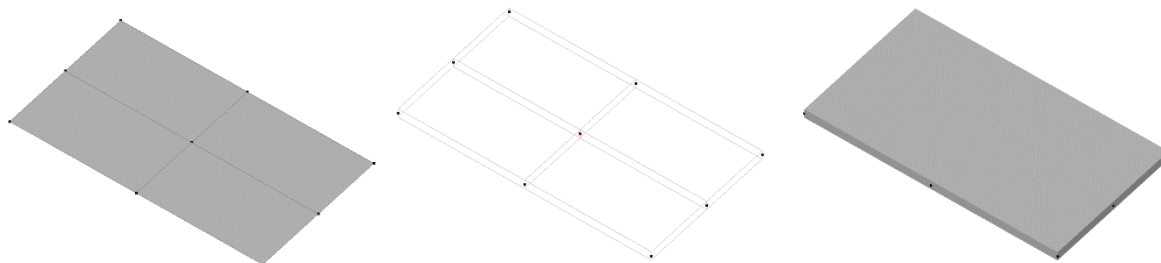


Рисунок 1.7 – Различные типы визуализации пластин

Объемные элементы отображаются с помощью двух уровней визуализации:

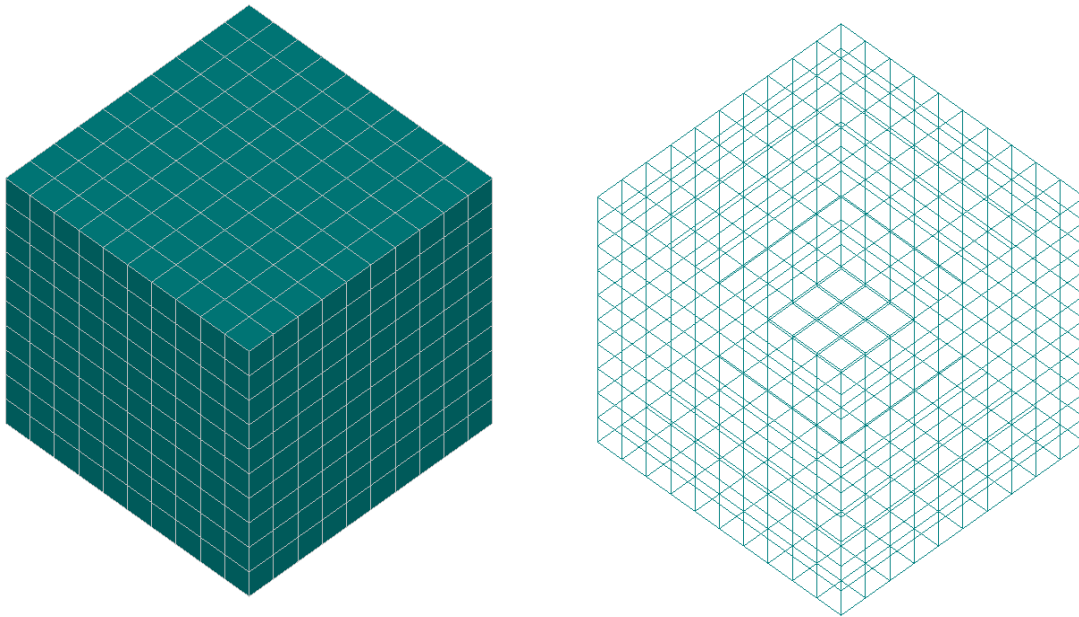


Рисунок 1.8 – Различные типы визуализации объемных элементов




















Все фильтры вида доступны пользователю на панели инструментов **Фильтры Вида** и **Дополнительные фильтры вида**.



Рисунок 1.9 – Панель инструментов **Фильтры вида**

- Узлы** – команда включает / выключает показ узлов.
- Номера узлов** – команда включает / выключает показ номеров узлов.
- Система Координат Узла** – команда включает / выключает показ системы координат узлов.
- Стержни Проволочные** – команда включает / выключает показ стержней как проволочных моделей. В режиме показа карты напряжений – переключает на показ карты распределения напряжений на проволочной модели стержневых элементов.
- Стержни Проволочные Сечения** – команда включает / выключает показ стержней как проволочных моделей с учетом сечения. В режиме показа карты напряжений – переключает на показ карты распределения напряжений на поверхности стержневых элементов.
- Стержни Объемные Сечения** – команда включает / выключает показ стержней как объемных моделей с учетом сечения. В режиме показа карты напряжений – переключает на показ карты распределения напряжений на поверхности стержневых элементов.

	Стержни только текущего сечения – команда включает / выключает показ стержней только текущего сечения, т.е. выбранного на панели инструментов «Текущие параметры». Команда работает совместно тремя предыдущими, с помощью которых осуществляется выбор отображения стержней – проволочные, проволочные сечения и объемные сечения.
	Стержни с эксцентриситетом – команда включает / выключает показ только стержней с эксцентриситетом
	Система Координат Стержня – команда включает / выключает показ локальной системы координат стержней.
	Вертикальные стержни – команда включает / выключает показ вертикальных стержней (угол наклона к оси Z не более 15°);
	Наклонные стержни – команда включает / выключает показ стержней с углом наклона к оси Z от 15° до 75°;
	Горизонтальные стержни – команда включает / выключает показ горизонтальных стержней (угол наклона к оси Z не менее 75°);
	Пластины Плоские – команда включает / выключает показ пластин как плоских многоугольников.
	Пластина Проволочная – команда включает / выключает показ проволочных моделей пластин с учетом толщины.
	Пластина Объемная – команда включает / выключает показ объемных моделей пластин с учетом толщины.
	Система Координат Пластины – команда включает / выключает показ системы координат пластины.
	Показать нормали пластин – команда включает / выключает показ нормалей пластин красным (+Z ЛСК) и синим (-Z ЛСК) цветом.
	Разбиение объектов «плита» – команда включает / выключает показ разбиения объектов «плита». Разбиение доступно для просмотра после выполнения расчета.
	Объемные элементы – команда включает / выключает показ граней объемных элементов как плоских многоугольников.
	Проволочные объемные элементы – команда включает / выключает показ проволочных моделей объемных элементов.
	Система координат объемного элемента – команда включает / выключает показ системы координат объемного элемента.
	Скрыть узлы внутри объемных элементов – команда выключает показ внутренних узлов, расположенных внутри объемных элементов.

	Упругие связи – команда включает / выключает показ упругих связей.
	Совместные перемещения – команда включает / выключает показ совместных перемещений.
	Опоры – команда включает / выключает показ опор.
	Односторонние опоры – команда включает / выключает показ односторонних опор.
	Нагрузки на Узлы – команда включает / выключает показ нагрузок на узлы.
	Нагрузки на Стержни – команда включает / выключает показ нагрузок на стержни.
	Нагрузки на Пластины – команда включает / выключает показ нагрузок на пластину и твердотельные элементы.
	Нагрузки на Объемные элементы – команда включает / выключает показ нагрузок на объемные элементы.
	Собственный вес – команда включает / выключает показ собственного веса
	Снеговая нагрузка – команда включает / выключает показ снеговой нагрузки.
	Ветровая нагрузка – команда включает / выключает показ ветровой нагрузки.
	Массы в узлах – команда включает / выключает показ сосредоточенных масс.
	Контактные элементы – команда включает / выключает отображение контактных элементов модели.
	Система координат контактных элементов – команда включает / выключает отображение системы координат контактных элементов модели.
	Целевые элементы – команда включает / выключает отображение целевых элементов модели.
	Система координат целевых элементов – команда включает / выключает отображение системы координат целевых элементов модели.
	Центр масс – команда включает / выключает отображение центра масс модели.
	Пересчёт положения центра масс вследствие редактирования, создания или удаления элементов модели конструкции происходит по нажатию данной кнопки.
	Показать выделенные элементы – команда включает / выключает режим отображения только выделенных элементов конструкции.





Показать нулевой уровень – команда включает / выключает режим отображения плоскости нулевого уровня относительно оси Z. От нулевого уровня зависит задание ветровой нагрузки.

---



Показать шкалу размеров – команда включает / выключает показ шкалы размеров.

## Дополнительные фильтры нагрузки

Значение нагрузки в узле – команда включает / выключает режим отображения значения нагрузок в узле для текущего нагружения.

Значения температурных нагрузок – команда включает / выключает режим отображения значений температурных нагрузок в узлах, на стержни и на пластины.

Кинематика в узле – команда включает / выключает режим отображения значений перемещений, скоростей, ускорений заданных в узлах.

Карта давлений на пластину – команда включает / выключает режим цветного отображения нагрузок на пластины для текущего нагружения.

Значения давления на пластины – команда включает / выключает режим отображения значений нагрузок на пластины для текущего нагружения.

Снеговое давление на пластины – команда включает / выключает режим цветного отображения снегового давления на пластины для текущего нагружения.

Ветровое давление на пластины – команда включает / выключает режим цветного отображения ветрового давления на пластины для текущего нагружения.

Карта давлений на объемные элементы – команда включает / выключает режим цветного отображения давления на грани объемных элементов.

Настройки шкал – команда вызывает окно задания граничных значений (минимального и максимального) и количества изоуровней для цветных шкал дополнительных фильтров вида. Изменять значения по умолчанию следует если, например на изокарте необходимо увидеть не все значения толщин пластин, а только их значения от минимального до максимального.

## Дополнительные фильтры свойства

Карта количества узлов в элементе – команда включает / выключает режим цветного отображения количества узлов в элементе.

Карта типа стержневого элемента – команда включает / выключает режим цветного отображения типов стержневых элементов.

Карты смещений точки привязки стержня – команда включает / выключает режим цветного отображения расстояния смещение оси стержня относительно его узлов в плоскости  $YZ$  локальной системы координат.

Карта длин стержней – команда включает / выключает режим цветного отображения длин стержней.

Карта наличия шарниров для стержней – команда включает / выключает режим цветного отображения количества осей вокруг которых разрешен поворот для обоих концов стержня (например: значение "3 - 1" соответствует шарниру вокруг  $XYZ$  для начального узла и шарниру вокруг одной из осей  $X, Y, Z$  для конечного узла).

Карта освобождения связей – команда включает / выключает режим цветного отображения числа линейных "u" освобождений связей и число вращательных "r" в узлах стержня.

Карта толщин пластин – команда включает / выключает режим отображения в виде изокарты толщины пластин.

Карта типов крутильной жесткости – команда включает / выключает режим цветного отображения крутильной жесткости пластин.

Карта пластин без жесткости – команда включает / выключает режим цветного отображения пластин без жесткости.

Карта площадей пластин – команда включает / выключает режим цветного отображения площадей пластин.

Карта смещений пластин по оси  $Z$  – команда включает / выключает режим цветного отображения смещений привязки пластин

Карта объемов солидов – команда включает / выключает режим цветного отображения объемов твердотельных элементов.

Карта объемных долей – команда включает / выключает режим цветного отображения объемных долей.

Карта нормальных жесткостей контактных элементов – команда включает / выключает режим отображения в виде изокарты шкалы нормальной жесткости контактных элементов. Предварительно в диалоговом окне необходимо задать диапазон вывода результатов (минимальное и максимальное значения).

Карта тангенциальных жесткостей контактных элементов – команда включает / выключает режим отображения в виде изокарты шкалы тангенциальной жесткости контактных элементов. Предварительно в диалоговом окне необходимо задать диапазон вывода результатов (минимальное и максимальное значения).

Фиктивные контактные элементы и шкала нормальной жесткости – команда включает / выключает режим отображения в виде изокарты фиктивных контактных элементов и шкалы нормальной жесткости. Предварительно в диалоговом окне необходимо задать диапазон вывода результатов (минимальное и максимальное значения).

Фиктивные контактные элементы и шкала тангенциальной жесткости – команда включает / выключает режим отображения в виде изокарты фиктивных контактных элементов и шкалы тангенциальной жесткости. Предварительно в диалоговом окне необходимо задать диапазон вывода результатов (минимальное и максимальное значения).

Карта коробления – команда включает / выключает режим цветного отображения коробления элементов.

Карта сужения – команда включает / выключает режим цветного отображения сужения элементов.

Карта относительного размера – команда включает / выключает режим цветного отображения элементов.

Карта Якобиан – команда включает / выключает режим цветного отображения Якобиана.

Названия конструктивных элементов – команда включает / выключает режим отображения названий с номерами конструктивных элементов, например для подготовки отчетов в текстовом виде.

Настройки шкал – команда вызывает окно задания граничных значений (минимального и максимального) и количества изоуровней для цветных шкал дополнительных фильтров вида. Изменять значения по умолчанию следует если, например на изокарте необходимо увидеть не все значения толщин пластин, а только их значения от минимального до максимального.

## Глава 2. Дерево настроек

В версии 17 часть настроек программы и расчета были перенесены в специальную плавающую панель, разделенную на две области.

В верхней области панели представлены настройки программы в виде дерева настроек, в нижней области содержится список их параметров и дополнительная информация.

При первом запуске приложения все настройки содержат значения по умолчанию.

В дальнейшем возможно выставлять и сохранять пользовательские значения по умолчанию, которые будут загружаться при последующих запусках приложения.

На панели инструментов окна настроек доступны команды:

- сохранить – сохранение настроек в файл формата \*.json
- загрузить – загрузка настроек из файла формата \*.json
- сохранить пользовательские значения по умолчанию – файл настроек помещается в общую папку на системном диске: \Documents and Settings\All Users\Application Data\APM Ltd\"название продукта" (например: "C:\Documents and Settings\All Users\Application Data\APM Ltd\APM WinMachine 17")
- восстановить пользовательские значения по умолчанию – восстановление значений всех настроек до сохраненных пользовательских значений по умолчанию
- восстановить значения по умолчанию – восстановление значений всех настроек до предустановленных программных настроек по умолчанию.

### Настройки программы

#### **CPU & GPU**

Использование более одного процессора доступно если процессор вашего компьютера является многоядерным.

Количество ядер/процессоров позволяет указать соответствующее количество, используемое при работе программы.

Использовать графический процессор совместно с CUDA доступно, в частности, при решении задачи топологической оптимизации.

### **Настройки графики**

В этом разделе доступны настройки системы вращения и куба вращения, выбор вариантов отображения опор и настройка размера их отображения, а также настройка положения ЛСК стержня по его длине.

### **Настройки сохранения**

Настройки этого раздела позволяют настроить сохранения файлов логирования, сделать соответствующие настройки автосохранения.

### **Настройки карт результатов**

В этом разделе доступны настройки, относящиеся к просмотру карт результатов расчета.

## **Параметры расчетов**

В данном разделе находятся настройки различных видов расчетов, описание которых можно найти в соответствующих разделах настоящего руководства.

### **Общие настройки**

Расчет напряжений в стержне производится в определенном количестве сечений для каждого стержня. Это количество задается в окне ввода Количество сечений. При расчете напряжений в сечении стержней сечение разбивается на конечные элементы. В системе реализованы два алгоритма разбивки сечения на конечные элементы: с равномерной сеткой и неравномерной сеткой. При одном и том же количестве разбиений равномерная сетка создается быстрее, но для сохранения точности разбиения она требует большего количества элементов. Таким образом, вы можете выбрать один из двух алгоритмов разбивки сечения с указанием приблизительного количества конечных элементов, которые вы хотите получить. Для этого сделайте соответствующие установки в полях Кол-во элементов1 и Кол-во элементов2.

В поле Ускорение свободного падения задается величина ускорения, используемая при учёте веса конструкции.

Опция Использовать центр сдвига при расчете сечений позволяет учесть центр сдвига при расчете стержней несимметричных (и особенно разомкнутых) сечений. В общем случае изгиб стержня, нагруженного поперечной силой, сопровождается кручением. Это зависит от формы поперечного сечения и положения линии действия равнодействующей поперечной силы. Если нагрузки приложены с эксцентриситетом относительно центра сдвига поперечного сечения, то должно учитываться влияние кручения.

Опция Вес на часть модели позволяет задать множитель собственного веса на отдельные элементы конструкции, при этом общий множитель собственного веса, задаваемый для все элементов конструкции для конкретного нагружения, будет обнулен.

Опция Полное усреднение динамической нагрузки позволяет находить усреднение по каждому из параметров каждой собственной частоты для динамической нагрузки и затем использовать его в расчете. Если птичка не установлена, то производится упрощенное усреднение для перемещений всех собственных частот динамической нагрузки, которое затем используется при расчете. Последний способ более быстрый.

### **Линейная статика**

Поле Алгоритм решения СЛАУ позволяет выбрать наиболее подходящий метод решения.

LDL метод представляет собой факторизацию матрицы жёсткости ансамбля конечных элементов с приведением её к виду  $[L]^T[D][L]$ . Метод LDL характеризуется тем, что вся задача (т. е. вся матрица жесткости) находится в оперативной памяти компьютера, а если ее недостаточно, то операционная система Windows автоматически создает временные файлы на жестком диске. Задание пути для хранения временных файлов относится к общим настройкам модуля APM Structure3D и выполняется с помощью команды Файл | Настройки. Метод имеет ограничение по размерности задачи – примерно до 300 тыс. степеней свободы.

Frontal метод расчёта предназначен для конструкций, состоящих из большого количества конечных элементов. Метод отличается тем, что матрица жёсткости ансамбля непосредственно в оперативной памяти компьютера не составляется, а решение системы уравнений идёт «фронтom» по всем степеням свободы. Глобальная матрица сохраняется на диске. Следующие поля Размер оперативной памяти (размер рабочей области памяти выделяемой для обработки «фронта») и Размер файла для хранения матрицы (устанавливается в зависимости от типа операционной и файловой систем) относятся только к фронтальному методу решения. Данные для настройки фронтального метода расчета зависят от текущей модели и могут быть определены на основании информации диалогового окна Расширенная информация о модели (команды Свойства | Дополнительная информация о модели).

MT\_Frontal – модифицированный фронтальный метод предполагает наличие у компьютера нескольких процессоров, и во многих случаях работает гораздо быстрее, чем LDL и Frontal. Однако его эффективность сильно зависит от значения полуширины

ленты матрицы жесткости – чем меньше это значение, тем медленнее становится скорость расчета этим методом. С наибольшим успехом можно применять этот метод для расчета моделей, размеры которых сопоставимы по всем направлениям. Если APM Structure3D установлен на компьютере, имеющем только один процессор (одно ядро), или в процессе общей настройки модуля сделано указание использовать при расчете не более одного процессора (Файл | Настройки), то ссылка на метод расчета MT\_Frontal в списке Метод решения системы уравнений отсутствует.

Sparse – улучшенный метод работы с разреженными матрицами, обеспечивающий прирост скорости вычислений. При расчетах методом Sparse в матрице жесткости хранятся только ненулевые элементы, а временные файлы размещаются во временных файлах на жестком диске. Предназначен для моделей с большим количеством конечных элементов и с большой полушириной матрицы жесткости.

InterMinRez, CG, BICGSTAB\_DP, BICGSTAB\_ILUT – итерационные методы расчета, позволяющие проводить статический и другие виды расчета при минимальном количестве используемой памяти компьютера. Выбор того или иного метода зависит от конкретной конструкции и вида расчета.

### **Линейная устойчивость**

Для расчёта устойчивости есть возможность выбора метода решения.

ПКД (Поиск корней детерминанта) – более ресурсоёмкий метод, позволяющий получить решение для больших систем. Метод определяет только один минимальный коэффициент запаса устойчивости. Параметры – относительная точность вычислений и максимальное количество итераций задаются для обоих методов. «Максимальное значение коэффициента запаса устойчивости», «Размер оперативной памяти для работы алгоритма, МБ» и «Размер файла для хранения матрицы (размер сегмента), МБ» – параметры только для метода решения Поиск корней детерминанта, задающие область поиска решения, размер оперативной памяти выделяемой для работы алгоритма и размер файлов, создаваемых на жёстком диске в процессе работы, соответственно. Для вычисления устойчивости задач большой размерности целесообразно использовать ПКД (Sparse).

Замечание: общий размер файлов на жёстком диске будет зависеть от размерности и топологии задачи. Для расчета больших моделей целесообразно использовать метод ПКД (Sparse) адаптированный для работы с разреженными матрицами.

Ланцош – позволяет находить несколько форм потери устойчивости в окрестности заданного значения коэффициента запаса устойчивости. Будет искать несколько коэффициентов запаса и несколько форм потери устойчивости в диапазоне от заданного значения и выше.

FEAST – позволяет находить несколько форм потери устойчивости в заданном диапазоне коэффициентов запаса устойчивости. Важно в параметрах задать количество искомых форм потери устойчивости в диапазоне большее, чем обладает конструкция, иначе будут найдены не все формы.

#### **Частоты собственных колебаний**

Для расчёта собственных колебаний также есть возможность выбора метода решения: Итерации подпространств, Итерации подпространств (Sparse), Итерации подпространств (Sparse) без ортогонализации, Ланцоша.

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

#### **Вынужденные колебания**

В настройках расчётного ядра для ГА по умолчанию назначен алгоритм решения СЛАУ как Sparse.

При расчёте значительной модели необходимо соответственно изменять значение в пункте «Объём оперативной памяти», иначе возможен вариант нештатного завершения расчёта.

Параметр «Окончание временного интервала, [мин]» позволяет задать финальное значения времени расчёта (стартовое время нулевое), задаётся в текущих единицах времени, может быть в диапазоне от  $1e-20$  до  $1e9$  секунд;

«Кол-во моментов времени» отвечает за число моментов времени, в которых будет производиться сохранение данных, это число не учитывает начальный момент времени, может быть в диапазоне от 1 до  $1e9$ ;

Список «Алгоритм решения» позволяет выбрать пункт «Разложение по собственным формам» или «Прямое интегрирование»;

Параметр «Логарифмический декремент колебаний» задаёт коэффициент, учитываемый при расчёте разложением по собственным формам, может быть в диапазоне от  $1e-8$  до 100;



Параметр «Кол-во собственных форм» позволяет задать общее число собственных форм, которые будут учитываться при расчёте разложением по собственным формам, может быть в диапазоне от 1 до  $1e3$ ;

«Минимальная частота учёта собственных форм, [Гц]» задаёт значение минимальной частоты, выше величины которой будет производиться учёт собственных форм, может быть в диапазоне от 0 до  $1e8$  Гц;

В параметре «Шаг по времени, [мин]» задаётся максимальное значение шага по времени, используемое в расчёте прямым интегрированием, рекомендуется назначать не менее 0,1 от периода (!!!) наибольшей из предполагаемых к учету частот, задаётся в текущих единицах времени, может быть в диапазоне от  $1e-20$  до  $1e6$  секунд;

Включённый переключатель «Усталостный расчёт» позволяет при расчёте прямым интегрированием сохранять данные только для созданных (!!!) групп элементов для последующего усталостного расчёта. Производится только при заданном графике случайного нагружения.

#### **Усталостный расчет**

Список «Тип приведения к симметричной нагрузке» позволяет выбрать одно из четырёх типов приведения: «Goodman», «Soderberg», «Gerber» и «Серенсен-Кинасошвили», рассматриваемые в осях амплитудных значений относительно величин среднего;

Список «Теория расчёта амплитуды» цикла позволяет выбрать одно из пяти: "Максимальных главных напряжений", "Максимальных линейных деформаций", "Максимальных касательных напряжений", "Удельной энергии формоизменения" и "Максимальное абсолютное по теориям"; Для хрупких материалов предпочтительно выбирать «Максимальных главных напряжений»; для литых лёгких сплавов «Максимальных линейных деформаций». «Максимальных касательных напряжений» применим как для деформируемых алюминиевых, медных, магниевых сплавов, так и титанов. «Удельной энергии формоизменения» применим для сталей и деформируемых цветных металлов;

Список «Теория расчёта среднего» значения цикла позволяет выбрать одно из шести: "Максимальных главных напряжений", "Максимальных линейных деформаций", "Максимальных касательных напряжений", "Удельной энергии формоизменения", "Максимальное абсолютное по теориям" и "Максимальное с учётом знака по теориям";

Переключатель «Расчёт  $\Psi_{\sigma}$ » задаёт вариант расчёта соответствующего значения при приведении к симметричному циклу по типу «Серенсен-Кинасошвили».

Выбор «По умолчанию» задаёт вычисление из предела прочности по формуле  $\langle \Psi_{\sigma} \rangle = 0.02 + \sigma_b \cdot 2e-4$ ,  $\sigma_b$  в МПа. Выбор «Значение» позволяет задавать эту величину непосредственно в параметре «Значение  $\Psi_{\sigma}$ »;

«Значение  $\Psi_{\sigma}$ » используется при приведении к симметричному циклу по типу «Серенсен-Кинасошвили» и выбору переключателя Расчёт  $\Psi_{\sigma}$  в положение «Значение», может быть в диапазоне от  $1e-7$  до 1;

Переключатель «Расчёт  $\Psi_{\tau}$ » задаёт вариант расчёта соответствующего значения при приведении к симметричному циклу по типу «Серенсен-Кинасошвили». Выбор «По умолчанию» задаёт вычисление из предела прочности по формуле  $\langle \Psi_{\tau} \rangle = 0.01 + \sigma_b \cdot 1e-4$ ,  $\sigma_b$  в МПа. Выбор «Значение» позволяет задавать эту величину непосредственно в параметре «Значение  $\Psi_{\tau}$ »;

«Значение  $\Psi_{\tau}$ » используется при приведении к симметричному циклу по типу «Серенсен-Кинасошвили» и выбору переключателя Расчёт  $\Psi_{\tau}$  в положение «Значение», может быть в диапазоне от  $1e-7$  до 1;

«Значение  $K_{mul}$ » позволяет задать кумулятивное значение коэф. снижения предела выносливости, не учтённые в усталостных свойствах материала, значение 1.0 - всё учтено в свойствах материала. Для  $K_{mul} > 1.0$  - вводимые факторы ещё больше снижают предел выносливости, может быть в диапазоне от  $1e-1$  до 10;

Переключатель «Тип задания базового числа циклов» позволяет выбрать желаемый вариант. Выбор «По умолчанию» задаёт значение базового числа циклов  $2e6$ . Параметр используется только в случае, если кривая Вёлера (кривая усталостной прочности или выносливости) не задавалась для материала через свойства материал «Усталость»;

В поле «Базовое число циклов» указывается конкретное значение. Параметр используется только в случае, если кривая Вёлера не задавалась для материала, может быть в диапазоне от  $1e3$  до  $1e10$ ;

Переключатель «Тип задания показателя степени» позволяет выбрать желаемый вариант. Выбор «По умолчанию» задаёт показателя степени наклонного участка кривой Вёлера. «По умолчанию» - вычисляется по формуле  $\langle m \rangle = (5 + \sigma_b / 80) / K$ ,  $\sigma_b$  в МПа,  $K$  - итоговый коэф. снижения предела выносливости, задаваемый по соответствующим свойствам материала (по ГОСТ) и домноженного на  $K_{mul}$ . Параметр используется только в случае, если кривая Вёлера не задавалась для материала;

В поле «Показатель степени» указывается конкретное значение показателя степени для единственного наклонного участка кривой Вёлера, предшествующего

горизонтальному участку. Параметр используется только в случае, если кривая Вёлера не задавалась для материала, может быть в диапазоне от 1.1 до 12;

«Тип интерполяции» применяется для вычисления значений числа циклов по приведённым величинам амплитуд на кривой Вёлера (если она задана в усталостном свойстве материала). `Полулогарифмическая` интерполяция означает логарифмирование по числу циклов, иначе используется линейная интерполяция;

Параметр «Тип схематизации» содержит пока единственный элемент «Метод дождя»;

«Теория сложения повреждений» содержит единственный элемент «Линейная»;

Переключатель «Учёт малых напряжений» позволяет задать тип учёта влияния приведённых эквивалентных напряжений ниже предела выносливости. `Запретить` - малые напряжения (что ниже предела выносливости) не будут вносить повреждения; `По проценту` - означает учитывать только те напряжения, что превышают заданное значение, вычисляемое через процент от предела выносливости;

В параметре «Процент учёта от предела» задаётся Значение процента от предела выносливости, ниже которого повреждения не учитываются, используется при выборе типа `По проценту` переключателя «Учёт малых напряжений». Предел выносливости (предел усталостной прочности) задаётся в свойствах материала в свойстве «Общие», ему соответствует базовое число циклов. Если кривая усталости задавалась в свойстве материала «Усталость», то предел выносливости и базовое число циклов определяется как заключительная точка кривой, и рисовать горизонтальный участок нет необходимости. Параметр может быть в диапазоне от 3 до 500;

Параметр «Гистогр. интервалов» задаёт число карманов для 2D-гистограммы эквивалентных значений. Чем меньше значение, тем грубее итоговый результат. Параметр может быть в диапазоне от 20 до 1024;

Список «Тип задания  $N_{min}$ » предназначен для выбора типа задания величины минимума для 2D-гистограммы. `От расчётного` - назначение по минимальному из вычисленных значений эквивалентных напряжений; `От предела` - назначение по проценту от величины предела выносливости, задаваемого в следующем параметре; `От меньшего` - назначение ведётся по минимальному от первых двух опций;

Параметр «Процент для  $N_{min}$ » задаёт значение процента от предела выносливости при расчёте нижней границы для гистограммы. Если флаг `Учёт малых напряжений` выбран и `Процент учёта` больше текущего задаваемого значения, то

гистограмма будет обрезана снизу, если меньше, то в гистограмму просто не войдут значения, которые необходимо учесть;

Список «Тип задания  $H_{max}$ » предназначен для выбора типа задания величины максимума для 2D-гистограммы. `От расчётного` - назначение по максимальному из вычисленных значений эквивалентных напряжений; `От предела` - назначение по проценту от величины предела текучести, задаваемого в следующем параметре; `От большего` - назначение ведётся по максимальному от первых двух опций;

Параметр «Процент для  $H_{max}$ » задаёт значение процента от предела текучести при задании верхней границы для гистограммы;

Флаг «Отрисовка предупреждения» позволяет отключить вывод на график по усталостным значения предупреждения о превышении эквивалентных напряжений предела текучести. Если усталость стохастическая, то рассматриваются эквивалентные напряжения только для тех КЭ, которые заданы в группах элементов.

## Глава 3. Описание команд

### Меню Файл

Команды этого раздела позволяют создавать новую конструкцию или сечение, работать с файлами и печатью.

#### **Создать | Конструкция**

Команда создает новый документ конструкции.

Ускоренный выбор: 

#### **Создать | Сечение**


Команда создает новый документ сечения.

#### **Создать | Соединение**

Команда вызывает модуль APM Joint для расчета болтовых, заклепочных или сварных соединений.

#### **Открыть**

Команда загружает сохраненный ранее файл.


Ускоренный выбор: 

#### **Закрыть**

Команда закрывает активный документ. Если в документ были внесены какие-либо изменения, то на экране появиться стандартное диалоговое окно, которое предложит Вам сохранить документ.



#### **Сохранить (Сохранить как)**

Команда сохраняет активный документ в файл. Если до этого документ не сохранялся или выбрана опция «Сохранить как», то на экране появляется стандартное диалоговое окно. Файл можно сохранить без результатов расчета, что существенно сократит его размер. Опция может быть использована при необходимости пересылки файла по электронной почте. Для получения результатов расчет необходимо повторить.

Ускоренный выбор: 

#### **Сохранить / загрузить результаты**


Команда позволяет сохранить результаты расчета модели в отдельный файл или загрузить результаты расчета из отдельного файла с расширением \*.FRMres,

Ускоренный выбор:  / 

#### **Загрузить часть модели**

Команда позволяет в открытую модель конструкции добавить модель, сохраненную в отдельном файле. После выбора этой команды открывается стандартное

окно, в котором можно выбрать файл части конструкции, которая будет вставлена в текущий документ.

Ускоренный выбор: 

### **Параметрическая модель**

Команда вызывает диалоговое окно, показанное ниже, и позволяет создать стержневую модель по стандартным шаблонам.

После нажатия на кнопку с рисунком требуемой модели появляется диалог, в котором можно задать размеры и другие параметры шаблона.

### **Дополнительные модели**

Команда вызывает диалоговое окно, показанное ниже, и позволяет создать стержневую модель по дополнительным шаблонам.

### **Импорт**

Команда импортирует объекты в активный документ из следующих форматов файлов:

- DXF files (\*.dxf)
- APM Studio files (файлы конечно-элементного разбиения APM Studio) (\*.sfm)
- BulkDataFormat files (NASTRAN Bulk Data File) (\*.dat, \*.bdf)
- Lira/SCAD files (\*.txt)
- MS Access Date Exchange files (обменный формат из системы «КЗ-Коттедж») (\*.mdb)
- IFC files (\*.ifc)
- STL files (\*.stl)
- RAW files (\*.raw)
- WPL files Parus (\*.wpl)

Для правильной работы команды с DXF файлами, необходимо чтобы все объекты были разбиты на составляющие (для системы AUTOCAD – команда explode). Следующие объекты DXF файла преобразуются в модель конструкции: LINE, POLYLINE в стержневые элементы, 3DFACE в пластины.

### **Экспорт**

Команда экспортирует КЭ модель в файлы следующих форматов:

- DXF 2D files (\*.dxf). Экспорт текущего вида модели. При экспорте стержни преобразуются в объекты LINE, пластины в объекты 3DFACE.

- DXF 3D files (\*.dxf). Экспорт всей модели в dxf. При экспорте стержни преобразуются в объекты LINE, пластины в объекты 3DFACE.
- DAT/BDF (NASTRAN Bulk Data File) (\*.dat, \*.bdf);
- APM Graph (\*.agr). Экспорт выделенных стержней, лежащих в одной плоскости в формат графического редактора APM Graph с учетом габаритных размеров сечений;
- Wood Construction Document (\*.agw). Экспорт плоской конструкции в документ APM Wood для последующей подготовки распиловки деревянной конструкции.
- Lira /SCAD files (\*.txt)
- STL files (\*.stl) Формат файлов для вывода для печати на 3D принтер.

### **Импорт из Компас-3D**

Команда импортирует стержневую модель из ЗАПУЩЕННОГО приложения КОМПАС-3D V11 – Металлоконструкции 3D (разработчик ЗАО «АСКОН»). Поддерживается передача узлов, стержней, материалов и сечений с учетом их ориентации.

### **Свойства**

Команда вызывает диалоговое окно с информацией о текущей версии файла (версии программы, в которой файл был сохранён).

### **Печать**

Команда позволяет вывести на печать данные по конструкции и результатам расчета. Команда вызывает соответствующее диалоговое окно. Поставьте галочку напротив тех параметров, которые Вы хотите распечатать. Нажатие кнопки Ок приведет к распечатке выбранных данных по модели и результатов расчета на принтере, RTF – сохранении их в файл с расширением (\*.rtf), который открывается и редактируется с помощью большинства текстовых редакторов, таких, как, например, MS Word.

### **Установка принтера**

Команда позволяет произвести настройку печатающего устройства.

### **Последние файлы**

Команда загружает последний сохраненный файл конструкции или сечения. Номер в списке ранее открытого файла позволяет осуществить его быструю загрузку. Меню может содержать восемь такие файлов

## **Выход**

Команда закрывает текущую конструкцию, сечения и завершает работу программы.

## **Меню Редактирование**


Команды этого раздела позволяют выделять объекты, инвертировать выделение и отменить или повторить одну из последних команд.

Все команды выбора/отмены выбора – универсальны. В случае однократного щелчка мыши по объекту команда работает в режиме одиночного выбора/отмены выбора. При удержании нажатой клавиши Shift выделений ранее выбранных объектов не снимается.

### **Редактировать элемент**

Команда позволяет перемещать узлы и элементы. Нажатие на клавишу Shift во время использования команды позволяет создать копию редактируемого объекта.

Вы можете также использовать режим привязки, если хотите присоединить редактируемые объекты к какому-то конкретному узлу. Для использования режима привязки вам необходимо взяться за тот узел, который вы хотите присоединить и тащить выбранные элементы по экрану так, чтобы этот узел попал в зону чувствительности того узла, к которому вы хотите присоединить элементы. В результате выбранные элементы сдвинутся и связываемые узлы соединятся. При этом автоматически соединяются все совпадающие в результате этой операции узлы.

Ускоренный выбор: 

### **Копировать**

Скопировать выделенные элементы модели в буфер обмена с целью его последующей вставки в другую часть конструкции.

Ускоренный выбор: , Ctrl+C

### **Вставить**

Вставить скопированные ранее элементы модели из буфера обмена с целью его последующей вставки в другую часть конструкции.

Ускоренный выбор: , Ctrl+V


### **Выделение прямоугольником**

Выделение группы объектов осуществляется охватывающей или секущей прямоугольной рамкой при удержании нажатой левой кнопки мыши. Если в редакторе



активна любая другая команда, то перейти в режим комбинированного выбора можно нажатием клавишу Esc.


Развыделение группы объектов осуществляется охватывающей или секущей прямоугольной рамкой при удержании нажатой правой кнопки мыши.

Ускоренный выбор: 

### **Выделение окружностью**

При удержании нажатой левой кнопки мыши осуществляется выделение охватывающей или секущей рамкой в форме окружности группы объектов.


При удержании нажатой правой кнопки мыши осуществляется развыделение охватывающей или секущей рамкой в форме окружности группы объектов.

Ускоренный выбор: 

### **Выделение произвольным контуром**

Команда позволяет выделять объекты произвольным контуром (при удержании левой кнопки мыши) или в форме многоугольника (вершины которого задаются однократным нажатием левой кнопки мыши).

Развыделение происходит с помощью правой кнопки мыши.

Ускоренный выбор: 

### **Выделение элементов по нормали**

Команда позволяет выделять соседние пластины со схожим направлением нормали. Для использования команды необходимо предварительно выделить пластины, для которых будут искаяться соседние пластины. После активации команды клавиши Space и Backspace позволяют расширять и сокращать область выделения. Клавиша Enter позволяет установить угла отклонения нормали.

Ускоренный выбор: 

### **Инвертировать выделение**

Команда инвертирует выделение конструкции.

### **Выбрать всё**

Команда производит выделение всех элементов модели.

Ускоренный выбор: Ctrl+A

### **Отменить**

Команда отменяет последнюю команду пользователя при включенной отмене операций.

Ускоренный выбор:  , Ctrl+Z

### **Повторить**

Команда повторяет отмененную ранее команду при включенной отмене операций.

Ускоренный выбор: , Ctrl+Y

### **Отмена операций**

Команда включает/выключает поддержку отмены операций. Максимальное количество операций, доступных для отмены – 10.

## **Меню Вид**

Команды этого раздела позволяют изменять установки видовой плоскости. Перед вызовом большинства команд этого раздела следует выбрать тот вид, чьи установки вы хотите изменить.

### **Строка состояния**

Команда включает/отключает показ панели состояния в которой параметры создаваемых элементов, количество выделенных элементов, подсказки к конкретной команде и т.п.

### **Дерево объектов**

Команда открывает специальное дерево объектов слева от основных окон программы, в котором могут быть заданы материалы, нагрузки (тепловые, электрические, электромагнитные и т.п.), задаваться системы координат, производиться запуск на расчет и просматриваться результаты расчета.


### **Окно свойств**

В нем пользователь имеет возможность задать свойства тех или иных объектов.

### **Поворот вида**

Данная команда активна только в режиме поворота с фиксированной ось Z.


Команда вызывает диалоговое окно, которое позволяет изменить поворот видовой плоскости. Команда вызывает диалоговое окно Поворот Вида. Поля ввода Phi и Theta позволяют точно задать углы  $\varphi$  и  $\theta$  соответственно. Кнопки группы Установить как позволяют установить вид, как один из шести главных видов. В левой части окна Просмотр показана проекция глобальной системы координат на видовую плоскость.

Ускоренный выбор: 

### **Положение плоскости**

Команда вызывает диалоговое окно, которое позволяет изменить положение видовой плоскости в пространстве. Это можно сделать двумя способами: изменив

глубину или изменив вектор положения вида. Радиокнопки группы Способ позволяют Вам выбрать любой способ. Поле ввода Глубина служит для ввода значения глубины, поля Положение для ввода вектора положения.

Ускоренный выбор: 

### **Установить глубину вида**

Команда включает режим, который позволяет двигать видовую плоскость в направлении, перпендикулярном самой плоскости. Эта операция удобна, когда вы хотите работать с разными параллельными плоскостями. Режим позволяет вам задавать глубину плоскости ТОЛЬКО в главных видах, двигая след видовой плоскости по экрану. Например, вы можете задать глубину вида сверху в виде спереди или в виде слева. После вызова команды в главных видах показывается след выбранной Вами плоскости. Глубина задается нажатием левой кнопки мыши в виде. В этом режиме Вы можете использовать привязку к узлу.

Ускоренный выбор: 


### **Вид по 3 узлам**

Команда включает режим, который позволяет задать видовую плоскость так, чтобы она проходила через 3 выбранных узла. После вызова команды выберите последовательно 3 узла в любом виде. В результате видовая плоскости передвинется и повернется так, что центр системы координат будет находиться в первом выбранном узле, а оси будут иметь расположение, показанное на рисунке.

Ускоренный выбор: 


### **Центр поворота**

Команда включает режим установки центра видовой плоскости. Щелкните мышкой в виде, чтобы передвинуть проекцию центра в новую точку. Режим позволяет использовать привязку к узлу.

Ускоренный выбор: 

### **Показывать шкалу размеров**


Команда включает в видовых окнах отображения шкалы размеров.

Ускоренный выбор: 

### **Режим динамического вращения**

Команда включает режим динамического вращения видом. Первый щелчок мыши включает вращение, движение мыши по вертикали и горизонтали вращают вид на углы  $\varphi$  и  $\theta$  соответственно. Второй щелчок завершает поворот. Правый щелчок отменяет

поворот и возвращает вид в начальное состояние. Режим динамического вращения доступен при активной любой команды при удерживании нажатой клавиши Ctrl.

Ускоренный выбор: 

### **Использовать локальные координаты**

Команда включает/выключает использование локальных координат в видовой плоскости. Локальные координаты – двумерные координаты, связанные с плоскостью вида.

### **Сетка**

Команда позволяет изменять установки вспомогательной сетки.

Ускоренный выбор: 


### **Шаг курсора и привязка**

Команда позволяет задавать шаг курсора по длине и углу, а также задавать размер области чувствительности узла.

Ускоренный выбор: 

### **Палитра**

Команда позволяет изменить цвета всех элементов редактора конструкций.

Ускоренный выбор: 

### **Единицы измерения**

Команда позволяет выбирать основные и составные единицы измерения, в которых будет осуществляться ввод исходных данных и просмотр результатов расчета текущего документа. На экране появляется диалоговое окно, показанное ниже. Параметры выбранных единиц изменения сохраняются в файле конфигурации системы APM Structure3D и будут использованы для следующего создаваемого документа.

Ускоренный выбор: 

### **Масштаб**

Команда позволяет изменить масштаб изображения активного вида. На экране появляется диалоговое окно, показанное ниже. Кнопки группы Уменьшить позволяют уменьшать масштаб, кнопки группы Увеличить – соответственно увеличивать масштаб. Поле ввода позволяет вводить значение масштаба.

Ускоренный выбор: 

### **Параметры привязки**

Команда позволяет выбирать один из двух режимов привязки.

Ускоренный выбор: 

### **Увеличить область**

Команда включает режим увеличения прямоугольной области вида во все окно.

Ускоренный выбор: 

### **Установки для всех видов**

Команда включает/выключает применение установок для всех видов редактора одновременно.

### **Наборы стандартных видов**

Позволяет выбрать набор видов «по умолчанию»: либо Стандартный набор видов, либо Строительный набор видов, либо Классический набор видов. Наборы видов будут отличаться положением ГСК в видах.

### **Произвольный вид**

Включает/выключает окно произвольного вида.

### **Вид слева**

Включает/выключает окно вида слева

### **Вид сверху**

Включает/выключает окно вида сверху

### **Вид спереди**

Включает/выключает окно вида спереди

## **Меню Рисование**

### **Узел | По координатам**

Команда устанавливает режим простановки узлов. Щелкните мышкой в нужном месте в любом из видов для простановки узла. Для редактирования координат проставленного узла нажатие правой кнопки мыши вызывает диалоговое окно.

Нажатие клавиш Space/Enter вызывает диалоговое окно для ручного ввода координат создаваемого узла.


Ускоренный выбор: 

### **Узел | На стержне**

Команда устанавливает режим простановки узлов на стержне или на линии продолжения стержня. Первым щелчком мыши выберите нужный стержень, затем мышью двигайте появившийся узел, вторым щелчком мыши зафиксируйте положение узла в пространстве. При этом появляется диалоговое окно, в котором можно подкорректировать положение узла на стержне. Положение узла задается двумя способами: координатой относительного одного из концов стержня или отношением

полной длины стержня к длине части стержня. Переключатели группы Координата Узла позволяют выбирать один из этих способов.

Переключатели группы Отсчет координаты от позволяют выбирать один из двух узлов стержня в качестве системы отсчета. При способе задания положения узла абсолютной координатой, эта координата будет отсчитываться от выбранного узла, при использовании относительной координаты в качестве части стержня используется та часть, которая которой принадлежит выделенный узел. При этом выделенный узел выделяется во всех видах.


Ускоренный выбор: 

### Узел | Локальная система координат

Команда переводит редактор в режим задания локальной системы координат для выделенных узлов. В системе координат узла задаются закрепления, упругие опоры, осадка в опорах (перемещения в направлении фиксированных степеней свободы). Чтобы задать систему координат в одном или нескольких узлах, Вам необходимо в этом режиме выбрать требуемый узел или один из выделенных, нажав на нем мышкой, после чего появляется окно диалога задания ориентации системы координат. Локальная система координат узла задается тремя последовательными поворотами исходной системы координат, совпадающей с глобальной, вокруг осей  $Z$ ,  $Y'$ ,  $X''$ . Обозначения  $Y'$  и  $X''$  используются вместо  $Y$  и  $X$ , чтобы показать, что после поворота оси  $Z$  оси  $Y$  и  $X$  изменяют своё положение.

Кнопка Указать позволяет задать углы выбором точек, через которые будут проходить оси системы координат. Начало системы координат расположено в выбранном узле, первым щелчком мыши выбирается узел или точка в трёхмерном пространстве, через которую будет проходить ось  $X$ . Вторым щелчком мыши выбирается точка лежащая в плоскости  $XU$ , а также направление оси  $Y$ . Направление оси  $Z$  выбирается для формирования правой тройки векторов.

Кнопка Ориентировать по стержню позволяет ориентировать ЛСК узла по ЛСК стержня, который был выбран.

Ускоренный выбор: 

### Узел | Масса

Команда переводит редактор в режим задания сосредоточной массы в узлах конструкции, которая учитывается только при проведении динамических расчетов.

Чтобы задать массу в одном узле или нескольких узлах, вам необходимо в этом режиме выбрать требуемый узел или один из выделенных, нажав на нем мышкой, после

чего появляется окно диалога ввода сосредоточенной массы. Значение массы задается в локальной системе координат узла.

В полях ввода задаются значения масс в соответствующих направлениях.

Если включен флаг Добавить к существующим, то вводимые массы будут добавлены к уже существующим в узле. Если включен флаг Заменить существующие, то все ранее введенные массы будут удалены.


Чтобы удалить сосредоточенные массы в выделенных узлах нажмите кнопку Удалить.

Ускоренный выбор: 

### **Стержень | Создать стержень**

Команда включает режим рисования стержней. В этом режиме могут соединяться уже существующие узлы или создаваться новые. Первым щелчком задается первый узел, вторым – второй. Если вы уже выбрали или создали первый узел, нажатием правой кнопки мыши вы можете отменить команду. Команда использует режим привязки, когда соединяет уже созданные узлы. Если вы хотите создать новый узел, а не использовать уже существующий, например, когда узлы лежат в разных плоскостях, но совпадают в виде, вам следует отключать режим привязки.

Координаты или номер можно задать вручную, нажав клавишу Space или Enter. После определения первого узла, нажав клавишу Space или Enter можно построить стержень по длине и углу. Направление стержня может отсчитываться от горизонтали или от другого стержня. Если предварительно был выбран стержень, то отсчет угла ведется от этого стержня. Кнопка Применить фиксирует направление стержня, после чего можно изменять только длину стержня. Кнопка Создать создает стержень.

Ускоренный выбор: 

### **Стержень | Разбить стержень**

Команда включает режим разбивки стержня на равные по длине элементы. Если стержни были выделены заранее, то после вызова команды на экране появляется диалоговое окно, которое позволяет задать число стержней или максимальную длину.

Если стержни заранее выделены не были, то после вызова команды доступен режим комбинированного выбора объектов. Вызов диалога для ввода параметров с клавиатуры производится нажатием на «Ввод» (Enter) или «Пробел» (Space). Нажатие правой кнопки мыши позволяет отменить предыдущее действие в рамках одной операции.


В случае выбора способа разбиения по числу стержней каждый, из выделенных стержней, будет разбит на равное количество.

В случае выбора способа разбиения по длине каждый стержень будет разбит на равное количество так, чтобы максимальная длина не превышала заданную.

Пример: Выделены 2 стержня длиной 150 мм и 850 мм. При задании длины разбиения 100, 1-й стержень будет разбит на пополам, а 2-й – на 9 частей.

Помещать новые объекты в – позволяет выбрать в какой слой будут помещены полученные стержни.

Копировать нагрузки – позволяет выбрать нагрузки, которые должны быть скопированы на стержни, созданные после разбиения.

Ускоренный выбор: 


### **Стержень | Обойма**

Команда позволяет усилить существующий стержневой элемент обоймой заданной толщины. Для выполнения команды необходимо выделить необходимые стержневые элементы с заданными сечениями, после активации появляется диалоговое окно Сечения, где выбирается сечение обоймы.

### **Элементы трубопроводов | Участок трубы**

Команда позволяет создать прямолинейный участок трубы с поперечным сечением по типу «кольцевое». Прямолинейный участок трубы создается по имеющимся узлам.

Возможно также ранее созданные стержни сделать участками трубопровода. Для этого им нужно будет задать этим стержням свойства «Участок трубы».

Ускоренный выбор: 

### **Элементы трубопроводов | Тройник**

Команда позволяет создать прямолинейный участок трубопровода, в произвольном месте которого можно пририсовать отвод, отходящий под прямым углом.

Возможно также ранее созданные стержни сделать участками трубопровода. Для этого им нужно будет задать этим стержням свойства «Участок трубы».

Ускоренный выбор: 


### **Элементы трубопроводов | Отвод по трем точкам**

Команда позволяет создать отвод (изогнутую с постоянным радиусом часть трубопровода) для соединения двух прямолинейных участков между собой. Отвод по трем точкам создается также, как создается дуга:



- сначала задается центральная точка дуги;
- затем узел первого соединяемого трубопровода;
- узел второго трубопровода.

Отметим, что отвод может быть создан между теми прямолинейными участками трубопровода, где в местах соединения с отводом трубопроводы будут касательными к дуге отвода. Поэтому центр отвода должен выбираться исходя из этих соображений. Во всех остальных случаях будет выдано сообщение, что соединить выбранные участки с помощью отвода – невозможно.


Ускоренный выбор: 

#### **Элементы трубопроводов | Отвод по концам двух стержней**

Команда позволяет создать отвод (изогнутую с постоянным радиусом часть трубопровода) для соединения двух прямолинейных участков между собой. Данной командой могут соединяться только узлы тех трубопроводов, которые отстоят на равные части от точки их пересечения.

Для выполнения команды необходимо:

- щёлкнуть ЛКМ на первом соединяемом трубопроводе вблизи того конца, к которому должен присоединиться отвод;
- щёлкнуть ЛКМ на втором соединяемом трубопроводе вблизи того конца, с которым должен соединиться присоединяемый отвод.

Ускоренный выбор: 


#### **Элементы трубопроводов | Отвод по двум стержням и радиусу**

Команда позволяет создать отвод (изогнутую с постоянным радиусом часть трубопровода) для соединения двух прямолинейных участков между собой. Данная команда создает отвод двух труб (пересекающихся или непересекающихся) по типу создания скругления между отрезками. В этом случае «лишние» части трубопроводов – исчезнут.

Для выполнения команды необходимо:

- щёлкнуть поочередно ЛКМ на первом, а затем на втором соединяемом трубопроводе;
- в появившемся диалоговом окне «Радиус отвода» задать значение радиуса, с которым будет создан отвод между стержнями.

В случае, если введено значение радиуса, требующее удлинения трубопроводов для их скругления с заданным радиусом – соединяемые прямолинейные части труб будут удлинены и соединены отводом с заданным радиусом.


Ускоренный выбор: 

### **Элементы трубопроводов | Трубопроводная арматура**

Команда позволяет задать массу и расположение арматуры для учета ее массово-инерционных характеристик при расчете трубопроводных систем. После выбора узла появляется соответствующее диалоговое окно. В группе Параметры задаются массы арматуры и привода. В группе Смещение привода задается смещение привода относительно арматуры в ГСК. В группе Отрисовка задается диаметр отображаемого элемента при объемной отрисовке стержней.


### **Пластина | Четырехугольная прямоугольная**

Команда устанавливает режим создания прямоугольных пластин. Пластина задается четырьмя узлами. В этом режиме могут соединяться уже существующие узлы или создаваться новые. Первым щелчком мыши задается первый узел, вторым второй и так далее. Если Вы уже выбрали или создали первый узел, нажатием правой кнопки мыши Вы можете отменить команду. Команда использует режим привязки, когда выбирает уже созданные узлы.

Ускоренный выбор: 

### **Пластина | Четырехугольная произвольная**

Команда устанавливает режим создания произвольных четырехугольных пластин. Данная команда аналогична предыдущей, отличием является то, что создаваемая пластина может быть произвольным четырехугольником.

Ускоренный выбор: 

### **Пластина | Произвольная с разбиением**

Команда устанавливает режим создания группы пластин. Данный режим позволяет Вам разбить сложный контур на конечные элементы – пластины. Каждый щелчок мыши добавляет один узел в контур, для замыкания контура необходимо выбрать первый узел контура. Дополнительно можно указывать одиночные узлы, принадлежащие контуру. Два щелчка на одном узле задают одиночный узел, который будет включен в сетку разбиения. Нажатие клавиши Ввод вызывает диалоговое окно задания параметров разбиения.

Разбивать на четырехугольники – по умолчанию разбиение производится на треугольные конечные элементы, т.к. не любой замкнутый контур можно разбить на четырехугольники.

Создавать дополнительные точки на границе – дополнительно подвергаются разбиению те отрезки, длины которых превышают указанную максимальную длину стороны. Разбиение отрезков осуществляется на равные части.

Оптимизировать разбиение – снятие флага может привести к разбиению на пластины, углы которых выходят за пределы требуемого диапазона 30°–150°.

Создавать плиту – данная опция позволяет создать объект плита. Объект плита характеризуется теми же свойствами, что и пластина (толщина, материал), только состоит из нескольких конечных элементов. Для разбиения объекта Плита на конечные необходимо выделить Плиту, задать максимальную длину стороны (команда Рисование / Плита / Параметры разбиения) а затем выбрать команду Рисование / Плита / Расчленить плиту. При этом во всех узлах, которые находятся в плоскости и внутри контура плиты будут созданы внутренние узлы. Для отображения КЭ сетки плиты необходимо включить на панели Фильтры вида / Разбиение объекта «плита».

Ускоренный выбор: 

### **Пластина | Треугольная**

Команда устанавливает режим создания треугольных пластин. Пластина задается тремя узлами. В этом режиме могут соединяться уже существующие узлы или создаваться новые. Первым щелчком мыши задается первый узел, вторым второй и так далее. Если Вы уже выбрали или создали первый узел, нажатием правой кнопки мыши Вы можете отменить команду. Команда использует режим привязки когда выбирает уже созданные узлы.


Ускоренный выбор: 

### **Пластина | Сфера**

Команда позволяет создать сферическую поверхность с одновременным разбиением ее на элементы.

Щелчком ЛКМ на одном из выбранных видов задается центр создаваемой сферы, а второй щелчок ЛКМ в другом месте вида – задает радиус создаваемой сферы, как расстояние между двумя заданными точками.

После этого появляется диалоговое окно Создание сферы в котором можно уточнить параметры создаваемой сферы и размер элемента разбиения. По умолчанию, максимальный размер элемента разбиения равен 0.1 радиуса сферы.

Ускоренный выбор: 

### **Пластина | Цилиндр из треугольных элементов**

Команда позволяет создать цилиндрическую поверхность (с торцами или без них) с одновременным разбиением ее на элементы.

Щелчком ЛКМ на одном из выбранных видов задаётся центр одного из оснований создаваемого цилиндра, второй щелчок ЛКМ – задает направление оси цилиндра в ГСК, третий щелчок ЛКМ – определяет точку, лежащую на поверхности цилиндра, т.е. его радиус.

После этого появляется диалоговое окно Создание цилиндра, в котором можно уточнить параметры создаваемого цилиндра (радиус, центр основания, направление оси цилиндра) и размер элемента разбиения. По умолчанию, максимальный размер элемента разбиения равен 0.1 радиуса цилиндра.

Ускоренный выбор: 

### **Пластина | Тор**

Команда позволяет создать тороидальную поверхность с одновременным разбиением ее на элементы.

Щелчком ЛКМ на одном из выбранных видов задаётся центр тора, второй щелчок ЛКМ – задает направление оси тора в ГСК, третий щелчок ЛКМ – определяет точку, задающую центр образующей окружности, четвертая точка определяет радиус образующей окружности.

После этого появляется диалоговое окно Создание тора, в котором можно уточнить параметры создаваемой тороидальной поверхности (радиус1, радиус2, координаты центра тора, направление оси тора) и размер элемента разбиения. По умолчанию, максимальный размер элемента разбиения равен 0.1 радиуса тора.

Ускоренный выбор: 

### **Пластина | Разбить пластину**


Команда устанавливает режим разбиения пластины на более мелкие. Режим позволяет разбить пластину или группу пластин.

Количество элементов задает количество элементов по двум направлениям в системе координат пластины.

Тип элемента позволяет задать тип элемента. После разбивки исходная пластина удаляется.

Толщина для новых пластин – позволяет задать толщину пластин, полученных в результате разбиения. Иначе пластины будут иметь толщину исходной пластины.

Помещать новые объекты в – позволяет выбрать в какой слой будут помещены полученные пластины.

Ускоренный выбор: 

### **Пластина | На свободных гранях объемных элементов**

Команда позволяет создавать пластины на свободных гранях выделенных объемных элементов. Такая необходимость может возникнуть при создании сложных оболочек и комбинированных конструкций, состоящих из твердотельных и оболочечных элементов.

Ускоренный выбор: 

### **Пластина | Прямоугольная пластина с отверстием**

Команда позволяет построить из 4-х узловых пластинчатых КЭ прямоугольную пластину с отверстием по центру. Первый щелчок ЛКМ задает начало пластины, второй – конец, после этого появляется диалоговое окно Прямоугольная пластина с отверстием по центру.

В группе Размеры пластины задаются размеры пластины в осях пластины.

В группе Центр отверстия задаются координаты центра отверстия в осях ГСК, а также радиус или диаметр отверстия.

Ряды хороших элементов – число рядов (уровней) КЭ хорошего качества (по критерию Jacobian от 0.7 до 1).

Толщина для новых пластин – толщина создаваемых 4-х узловых пластинчатых КЭ.

Прямоугольную пластину с отверстием по центру можно создать двумя способами.

Способ 1: максимальный размер элемента – ограничение на максимальный размер КЭ, создаваемых в прямоугольной пластине с отверстием по центру.

Способ 2: с помощью задания числа разбиений или максимального размера элемента в областях n1 и n2.

Кнопка Показать запускает процесс создания прямоугольной пластины с отверстием по центру. Результатом процесса является прямоугольная пластина с отверстием по центру, созданная в плоскости экрана.

Перед созданием прямоугольной пластины с отверстием по центру может выйти информационное сообщение о неудовлетворительном качестве создаваемых КЭ с

предложением продолжить (нажатием кнопки ОК) или отменить (нажатием кнопки Отмена) процесс.

#### **Плита | Создать плиту**

Команда открывает графический редактор APM Graph для построения контура объекта Плита. Из нескольких плит может быть в редакторе APM Graph создан блок, который будет называться блок плит.

#### **Плита | Редактировать плиту**

Команда открывает выделенный объект Плита в редакторе APM Graph для последующего редактирования.

#### **Плита | Параметры разбиения**

Команда вызывает диалоговое окно с параметрами разбиения для выделенных плит. Описание диалогового окна Параметры разбиения приводится в пункте Пластина | Произвольная с разбиением

#### **Плита | Удалить всю КЭ сетку**

Команда удаляет КЭ сетку для выделенных плит.

#### **Плита | Расчленив плит**

Команда преобразует созданную на плите сетку в отдельные конечные элементы – пластины.

#### **Плита | Расчленив блок плит**

Команда преобразует созданную на блоке плит сетку в отдельные конечные элементы – пластины.

#### **Объемные элементы**

В данном пункте меню представлены команды, позволяющие создавать различные объемные элементы: гексаэдры, призмы, пирамиды, тетраэдры. Каждый элемент задается соответствующим числом узлов: 8, 6, 5, 4 для линейный элементов и 20, 15, 13, 10 для квадратичных.

В этом режиме могут соединяться уже существующие узлы или создаваться новые. Первым щелчком мыши задается первый узел, вторым второй и так далее. Если Вы уже выбрали или создали первый узел, нажатием правой кнопки мыши Вы можете отменить команду. Команда использует режим привязки, когда выбирает уже созданные узлы. При вводе узлов КЭ необходимо следить за локальной нумерацией узлов.

#### **Объемные элементы | Геометрические примитивы**


Данная группа команд позволяет создавать различные геометрические примитивы из различных объемных конечных элементов: прямоугольный

параллелепипед из гексаэдров, толстостенная труба из гексаэдров, шар из тетраэдров, шар из гексаэдров, шар из тетраэдров и гексаэдров, цилиндр из тетраэдров, цилиндр из гексаэдров. тор из тетраэдров, тор из гексаэдров.

Пользователь задает начальную точку щелчком левой кнопки мыши на выбранной точке какого-либо из окон, последующие нажатия задают характерные размеры примитива. По окончании создания примитива открывается соответствующее диалоговое окно, в котором можно уточнить параметры создаваемого объекта и КЭ сетки.

### **Объемные элементы | Разбить 8/20-узловой элемент**


Команда устанавливает режим разбиения 8-узлового или 20-узлового объёмного элемента на более мелкие. Режим разбиения позволяет разбить один элемент или группу выделенных элементов. Количество элементов задаёт количество разбиений по рёбрам объёмного элемента. После разбиения исходный элемент удаляется.

Ускоренный выбор: 

### **Дуга**

Команда включает режим создания дуговых участков конструкции. Дуговой участок создается в плоскости вида и аппроксимируется прямолинейными стержнями с устанавливаемой пользователем точностью разбиения. Первый щелчок левой кнопкой мыши задает центр дуги, второй – угол начала дуги, третий – радиус, четвертый – угол конца дуги.


На каждом этапе построения дуги нажатие клавиш SPACE или ENTER позволяет вызвать диалоговое окно для задания соответствующих параметров (координаты центра, начальной и конечной точки, радиус, начальный и конечный углы) вручную.

Ускоренный выбор: 

### **Окружность**

Команда включает режим создания окружностей. Также, как и дуга, окружность создается в плоскости вида, и аппроксимируется прямолинейными стержнями. Первый щелчок левой кнопкой мыши задает центр окружности, второй задает радиус.

Во время построения окружности нажатие клавиш SPACE или ENTER позволяет вызвать диалоговое окно для ручного задания координат центра окружности, радиуса или диаметра окружности.

Ускоренный выбор: 


### **Опора | Жесткое закрепление**

Команда устанавливает режим простановки двухсторонних опор, действующих в обоих направлениях по или вокруг осей ЛСК узла на существующие узлы. Опоры задаются в системе координат узла.

После выбора узла появляется соответствующее диалоговое окно. Кнопки группы Тип Опоры позволяют установить такие типы опор как заделка, шарнир или свободный узел одним нажатием кнопки мыши. Опции Перемещения запрещают перемещения вдоль осей X, Y, Z. Опции Поворот запрещают поворот вокруг осей X, Y, Z.

Возможно также задание жесткого закрепления по поверхности для объекта плита, что может быть использовано, в частности, для моделирования сплошного фундамента на упругом основании.

Опоры отображаются цветными стрелочками, направление стрелочки соответствует направлению оси ГСК, в котором задана опора, цвет стрелочки – цвету оси ГСК, одинарная стрелочка означает запрет перемещений по соответствующей оси, двойная – запрет поворотов вокруг оси.

Ускоренный выбор: 

### **Опора | Упругое закрепление**

Команда устанавливает режим ввода упругих двухсторонних закреплений, действующих в обоих направлениях по или вокруг осей ЛСК узла в существующих узлах. Упругие закрепления задаются в системе координат узла.

В полях ввода задаются жесткости пружины в соответствующих направлениях. Если включена опция Добавить к существующим, то вводимые жесткости будут добавлены к уже существующим в узле. Если включена опция Заменить существующие, то все ранее введенные пружины будут удалены.

Чтобы удалить пружины в выделенных узлах нажмите кнопку Удалить.

Ускоренный выбор: 

### **Опора | Односторонняя опора**

Команда устанавливает режим простановки односторонних опор на существующие узлы. Опоры задаются в системе координат узла. По умолчанию система координат узла совпадает с ГСК.


В отличие от команды Опора | Жесткое закрепление данная команда позволяет задавать запрет на перемещения и/или повороты только в одном направлении – положительном или отрицательном.



Также данная команда позволяет задавать упругие односторонние опоры с зазором.

Одним из примеров такой опоры является фундамент, который может отрываться от земли.

При выборе данной команды необходимо следить, чтобы конструкция не стала подвижным механизмом – в этом случае расчет может быть некорректным.

Ускоренный выбор: 

### **Опора | Упругое основание**

Команды позволяют в режиме проектирования железобетонных элементов задать основания под различные типы фундаментов: столбчатый, ленточный, сплошной, одиночный свайный.

### **Опора | Закрепление по линии**


Данная команда предназначена для закрепления сторон плит. После выбора данной команды и щелчком по какому-либо ребру плиты, появляется диалоговое окно, в котором можно задать типы опор, которые будут установлены по этому ребру плиты.

### **Упругая связь**

Команда устанавливает режим ввода специальных элементов типа «упругая связь» между двумя существующими или создаваемыми узлами.


В этом режиме могут соединяться уже существующие узлы или создаваться новые. Первым щелчком задается первый узел, вторым второй. Если Вы уже выбрали или создали первый узел, нажатием правой кнопки мыши Вы можете отменить команду. Команда использует режим привязки, когда соединяет уже созданные узлы. Если вы хотите создать новый узел, а не использовать уже существующий, например, когда узлы лежат в разных плоскостях, но совпадают в виде, вам следует отключать режим привязки.

При нажатии на кнопку Затухание появляется возможность задать характеристики демпфера в упругой связи. Учет демпфирующего элемента актуален для расчета задач вынужденных колебаний для метода расчета прямое интегрирование.

Ускоренный выбор: 

### **Шарнир | Выделенным узлам**

Команда создает шарнир в глобальной системе координат во всех выделенных узлах. После вызова команды на экране появляется диалоговое окно Шарнир в узле, позволяющее задать разрешения поворота относительно осей ГСК.

Ускоренный выбор: 

### **Шарнир | Всем узлам**

Команда создает шарнир во всех узлах конструкции, превращая таким образом всю конструкцию в ферму. После вызова команды на экране появляется диалоговое окно Шарнир в узле, позволяющее задать разрешения поворота относительно осей ГСК.

### **Шарнир | На конце стержня**

Команда создает шарнир на конце стержня. Команда переводит редактор в соответствующий режим. Для простановки шарнира необходимо щелкнуть мышкой возле нужного стержня и узла. После этого появится диалоговое окно. Узел 1 соответствует началу стержня (в нем отрисовывается ЛСК стержня).

Ускоренный выбор: 

### **Освобождение связи**

Команда позволяет задать освобождение связи для стержневого элемента. Данная операция позволяет моделировать односторонние связи, ползуны и соединения особого типа. Для задания освобождения связи (релиза) необходимо выделить стержень с узлами, и выбрать требуемые степени свободы для узлов стержня. Узел 1 соответствует началу стержня (в нем отрисовывается ЛСК стержня).


Ускоренный выбор: 

### **Совместные перемещения**

Команда предназначена для жесткого (или подвижного только в каком-либо направлении) соединения узлов различных элементов модели конструкции.


Для задания совместных перемещений необходимо выделить узлы. После активации команды необходимо указать узел, к которому будут сведены перемещения остальных выделенных узлов. В появившемся диалоговом окне для создания жесткого соединения необходимо обеспечить совместные перемещения по всем степеням свободы (кнопка «Отметить все»). Если необходимо разрешить какие-либо перемещения и повороты, то соответствующие степени свободы оставляем свободными.

Все поля диалога относятся к ГСК.

Ускоренный выбор: 

### **Удалить выбранное**

Команда удаляет, после запроса на подтверждение, все выбранные элементы конструкции.

Ускоренный выбор: 

### **Удалить все**

Команда удаляет, после запроса на подтверждение, все элементы конструкции.

### **Несколько узлов в одной точке**

Команда включает/выключает режим, позволяющий создавать несколько узлов в одной точке пространства. Данный режим предназначен для решения задач о контактном взаимодействии. По умолчанию команда **ВЫКЛЮЧЕНА** (птичка не проставлена), а совпадающие узлы объединяются автоматически.

## **Меню Нагрузки**

Команды этого раздела позволяют прикладывать нагрузки к узлам, стержням, пластинам и объемным элементам.

### **Сила к узлу**

Команда устанавливает режим простановки сил на существующие узлы. После выбора узла появляется соответствующее диалоговое окно. Все действия с нагрузкой (установка, изменение, удаление) выполняются в загрузении, выбранном из списка загрузений.

Ускоренный выбор: 

### **Момент к узлу**

Команда устанавливает режим простановки моментов на существующие узлы. После выбора узла появляется соответствующее диалоговое окно. Все действия с нагрузкой (установка, изменение, удаление) выполняются в загрузении, выбранном из списка загрузений.

Ускоренный выбор: 

### **Перемещения в узле**


Команда устанавливает режим простановки перемещений узлов в направлениях зафиксированных степеней свободы (осадка опоры). Перемещения задаются в системе координат узла. Предварительно необходимо эти узлы зафиксировать в пространстве с помощью жестких опор, действующих в направлении задаваемого перемещения. После выбора узла или группы выделенных узлов появляется диалоговое окно для задания перемещений в узлах.

Перемещение задаваемое в направлении зафиксированной степени свободы считается осадкой опоры, в противном случае – начальным перемещением узла. Перемещения задаются относительно недеформированного положения узлов. Если включена опция **Добавить к существующим**, то вводимые перемещения будут

добавлены к уже существующим в узле. Если включена опция Заменить существующие, то все ранее введенные перемещения будут удалены.


Чтобы удалить перемещения в выделенных узлах нажмите кнопку Удалить.

Все действия с нагрузкой (добавление, замена, удаление) выполняются в загрузении, выбранном из списка загрузений.

Ускоренный выбор: 

### **Температура в узле**

Команда устанавливает режим задания температуры в узлах, которые будут использоваться при тепловом расчете. В этом режиме щелкните левой кнопкой мыши на узле или на одном из выделенных узлов. В результате появится диалоговое окно для задания температуры в этих узлах. Температура 20°C принимается за ту температуру, при которой отсутствуют термонапряжения. Для учета поля температур для расчета термонапряжений необходимо провести Расчет стационарной теплопроводности с установкой птички Учитывать поле температур (из стационарной теплопроводности) при выполнении статического расчета. Расчет стационарной теплопроводности выполняется только для одного загрузения (комбинации загрузений).

Ускоренный выбор: 

### **Предварительная деформация**

Команда переводит редактор в режим задания предварительной деформации стержню или группе стержней со свойствами балки, фермы или участка трубопровода.

В этом режиме щелкните левой кнопкой мыши на стержне или на одном из выделенных стержней. В результате появится диалоговое окно для задания предварительной деформации. Возможно задание различных типов предварительного напряжённо-деформированного состояния стержневых элементов:

Относительная деформация  $dL/L$  – отношение разности расстояния между узлами конструкции, соединяемыми данным элементом, и длины недеформированного элемента к расстоянию между узлами конструкции;

Начальная длина элемента  $L_0$  – длина элемента в ненагруженном состоянии;

Сила – действующая в элементе;

Напряжение – напряжение, возникающее в элементе.


Ускоренный выбор: 

### **Распределенная на стержень в ЛСК**

Команда устанавливает режим простановки нагрузки на стержень или группу стержней.


Чтобы ввести нагрузку на один стержень вам необходимо в этом режиме выбрать стержень, нажав на нем мышкой, после чего появляется окно редактора ввода нагрузок на стержень. В этом редакторе становятся доступными команды для перехода в режим задания конкретного типа нагрузки из меню Нагрузки | Тип Нагрузки на Стержень. Ранее введенные нагрузки редактируются по нажатию правой кнопки мыши (в плоскости  $xy$  или в осевом направлении) или по нажатию правой кнопки мыши одновременно с клавишей SHIFT (в плоскости  $xz$ ).

Чтобы задать нагрузку группе стержней предварительно выделите требуемые стержни и нажмите Enter/Space, после чего появляется окно редактора ввода нагрузок на этих стержнях. Далее выберите одну из команд меню Нагрузки | Тип Нагрузки на Стержень для задания соответствующей нагрузки.

Ускоренный выбор: 

### **Распределенная на стержень в ГСК**

Команда позволяет задать распределенную нагрузку группе стержней. Группу стержней предварительно нужно выделить с помощью команды Выбрать. Нагрузка вводится в диалоге Распределенная сила. Направление действия сил задается вектором в трехмерном пространстве. Компоненты этого вектора задаются в глобальной или локальной системе координат и вводятся в поля ввода Направление в глобальной системе координат. Например, если нужно задать Нагрузку 2 Н/мм в направлении обратном оси Z, то можно в поле Значение силы ввести 2 и в полях Направление ввести 0, 0, -1 или в поле Значение силы ввести -2 и в полях Направление ввести 0, 0, 1. Нагрузка добавляется в загрузение, установленное в списке загрузений.

Ускоренный выбор: 

### **Ветровая нагрузка на стержень**

Команда устанавливает режим ввода ветровой нагрузки на стержни. Нагрузка прикладывается на выделенные стержни. После выделения стержней, на которые необходимо приложить нагрузку появится соответствующее диалоговое окно.

Нагрузка задается зависимостью давления ветра от высоты. Значения давления вводятся через запятую в поле Интенсивность, соответствующие высоты через запятую

в поле Высота. Направление действия ветровой нагрузки задаётся направляющими косинусами к глобальной системе координат в группе полей ввода Направление.


Среднюю составляющую ветровой нагрузки в виде этой зависимости можно сформировать в автоматическом режиме. Данная возможность реализована для СНиП 2.01.07-85\* (СП 20.13330.2011) с «Нагрузки и воздействия») в соответствии с п. 6.3. Для этого используется группа Автоматическое задание давления от высоты. В диалоге необходимо задать высоту и ширину здания, аэродинамический коэффициент, нормативное значение ветрового давления (вручную или выбрав ветровой район) и тип местности. При этом коэффициент надежности по нагрузке учитывается, умножением на него нормативного значения ветрового давления или умножением на него непосредственно величины давления ветра при задании зависимости давления ветра от высоты. После установки вышеуказанных параметров нажмите кнопку Пересчитать давление от высоты. В результате поля Интенсивность и Высота заполнятся автоматически.

Если стержней несколько, и они «затеняют» друг друга в направлении действия ветра, то это может быть учтено заданием коэффициента затенения. Для задания параметров для его вычисления следует в окне Ветровая нагрузка на стержень нажать кнопку Вычислить, после этого откроется диалоговое окно Коэффициент затенения.

Для его вычисления необходимо выбрать схему работающих совместно стержней, задать требуемые размеры, коэффициент проницаемости  $\Phi$  и Коэффициент затенения будет сразу вычислен и его значение будет показано в соответствующем поле. Нажатие кнопки Ок переносит рассчитанное значение Коэффициента затенения в соответствующее поле окна Ветровая нагрузка на стержень.


### **Температура на стержень**

Команда переводит редактор в режим задания температурной нагрузки на стержни. В этом режиме щелкните левой кнопкой мыши на стержне или на одном из выделенных стержней. В результате появится диалоговое окно для задания температуры на выделенные стержни. Группа переключателей Тип нагрузки упрощает задание конкретных типов нагрузки.

Ускоренный выбор: 


### **Удалить нагрузки на стержень**

Команда удаляет все нагрузки, приложенные к выбранному стержню.

Ускоренный выбор: 


### **Тип нагрузки на стержень | Осевая сила**

Команда позволяет приложить к стержню сосредоточенную осевую силу. Выбрав эту команду, редактор переходит в режим задания осевой нагрузки или редактирования осевой нагрузки для одного стержня. Чтобы ввести новую нагрузку нажмите левую кнопку мыши в точке приложения силы. В появившемся диалоге введите требуемые значения и нажмите ОК. Для редактирования или удаления нагрузки нажмите правую кнопку мыши. Все действия с нагрузкой (установка, изменение, удаление) выполняются в загрузении, выбранном из списка загрузений.

Ускоренный выбор: 


### **Тип нагрузки на стержень | Поперечная сила**

Команда позволяет приложить к стержню сосредоточенную поперечную силу. Выбрав эту команду редактор переходит в режим задания или редактирования поперечной силы стержня. Чтобы ввести новую нагрузку нажмите левую кнопку мыши в точке приложения силы. В появившемся диалоге введите требуемые значения и нажмите ОК. Для редактирования или удаления нагрузки в плоскости ху нажмите правую кнопку мыши или правую кнопку с клавишей SHIFT в плоскости хz. Все действия с нагрузкой (установка, изменение, удаление) выполняются в загрузении, выбранном из списка загрузений.

Ускоренный выбор: 


### **Тип нагрузки на стержень | Момент кручения**

Команда позволяет приложить к стержню или группе стержней сосредоточенный момент кручения. Работа команды полностью аналогична команде Тип Нагрузки на Стержень/Осевая сила. Все действия с нагрузкой (установка, изменение, удаление) выполняются в загрузении, выбранном из списка загрузений.

Ускоренный выбор: 

### **Тип нагрузки на стержень | Момент изгиба**

Команда позволяет приложить к стержню или группе стержней сосредоточенный момент изгиба. Работа команды полностью аналогична команде Тип Нагрузки на Стержень/Поперечная сила. Все действия с нагрузкой (установка, изменение, удаление) выполняются в загрузении, выбранном из списка загрузений.

Ускоренный выбор: 


### **Тип нагрузки на стержень | Осевая распределенная сила**

Команда позволяет приложить к стержню или группе стержней распределенную осевую силу. Выбрав эту команду, редактор переходит в режим задания осевой нагрузки или редактирования осевой нагрузки для одного стержня или сразу вызывает диалог задания силы для группы стержней, если они были предварительно выбраны. Чтобы ввести новую нагрузку в режиме ввода для одного стержня нажмите левую кнопку мыши в точке в начале и конце участка приложения силы. В появившемся диалоге введите требуемые значения и нажмите ОК. Для редактирования или удаления нагрузки нажмите правую кнопку мыши. Все действия с нагрузкой (добавление, изменение, удаление) выполняются в загрузении, выбранном из списка загрузений.

Ускоренный выбор: 


### **Тип нагрузки на стержень | Поперечная распределенная сила**

Команда позволяет приложить к стержню или группе стержней распределенную поперечную силу. Выбрав эту команду, редактор переходит в режим задания или редактирования осевой нагрузки для одного стержня или сразу вызывает диалог задания распределенной силы для группы стержней, если они были предварительно выбраны. Чтобы ввести новую нагрузку в режиме ввода для одного стержня нажмите левую кнопку мыши в точке в начале и конце участка приложения силы. В появившемся окне введите требуемые значения и нажмите ОК. Для редактирования или удаления нагрузки в плоскости  $xy$  нажмите правую кнопку мыши или правую кнопку с клавишей SHIFT для нагрузки в плоскости  $xz$ . Все действия с нагрузкой (добавление, изменение, удаление) выполняются в загрузении, выбранном из списка.

Ускоренный выбор: 

### **Тип нагрузки на стержень | Распределенный момент кручения**

Команда позволяет приложить к стержню или группе стержней распределенный момент кручения. Работа команды полностью аналогична команде Тип Нагрузки на Стержень/Осевая распределенная сила. Все действия с нагрузкой (добавление, изменение, удаление) выполняются в загрузении, выбранном из списка загрузений.

Ускоренный выбор: 

### **Тип нагрузки на стержень | Распределенный момент изгиба**

Команда позволяет приложить к стержню или группе стержней распределенный момент изгиба. Работа команды полностью аналогична команде Тип Нагрузки на



Стержень/Поперечная распределенная сила. Все действия с нагрузкой (добавление, изменение, удаление) выполняются в загрузении, выбранном из списка загрузений.


Ускоренный выбор: 

### **Распределенная нагрузка на пластину**

Команда устанавливает режим ввода распределенной нагрузки на пластины. Нагрузка прикладывается или к одной пластине или к группе выделенных пластин. В этом режиме нажмите левую кнопку мыши на одной из требуемых пластин, после чего появляется окно диалога ввода нагрузки. Нагрузка может быть задана в локальной или глобальной системах координат в виде давления или силы.

Установка птички в опции Неравномерное распределение делает все поля ввода активными и становится возможным задание линейно изменяющейся нагрузки на пластину в определенном направлении.

Чтобы удалить распределенную нагрузку у выделенных пластин нажмите кнопку Удалить в этом диалоговом окне. Все действия с нагрузкой (добавление, замена, удаление) выполняются в загрузении, выбранном из списка загрузений.

Ускоренный выбор: 

### **Линейная распределенная нагрузка на пластину**

Команда устанавливает режим ввода линейной распределенной нагрузки на пластины.

После активации команды выделите пластины и по окончании выбора нажмите Enter/Space. Затем необходимо указать 3 граничные точки приложения нагрузки. После указания 3-й точки появится диалоговое окно ввода нагрузки. В общем случае нагрузка может быть задана в локальной или глобальной СК.

В нижней части диалогового окна приведены координаты указанных точек, а в верхней соответствующие давления в локальной (как в нашем случае) или глобальной СК – в зависимости от положения переключателя.

Для контроля правильности задания нагрузки служат команды панели инструментов Дополнительные фильтры вида – Давление на пластины и Значения давления на пластины.

Чтобы удалить распределенную нагрузку у выделенных пластин нажмите кнопку Удалить в этом диалоговом окне. Все действия с нагрузкой (добавление, замена, удаление) выполняются в загрузении, выбранном из списка загрузений.


## **Снеговая нагрузка**

Команда устанавливает режим ввода снеговой нагрузки на пластины. Нагрузка прикладывается на выделенные пластины. В этом режиме вам нажмите левую кнопку мыши на одной из требуемых пластин, после чего появляется окно диалога ввода нагрузки. Все действия с нагрузкой (добавление, удаление) выполняются в загрузении, выбранном из списка загрузений.

В списке Номер снегового района кроме номеров снеговых районов в скобках указано расчетное значение веса снегового покрова из таблицы 4\* СНиП 2.01.07-85\* (таблица 10.1 СП 20.13330.2011).

$C_e$  – коэффициент, учитывающий снос снега с покрытий зданий под действием ветра или иных факторов, принимаемый в соответствии с 10.5 СП 20.13330.2011;

$C_t$  – термический коэффициент, принимаемый в соответствии с 10.6 СП 20.13330.2011.

Ускоренный выбор: 


## **Ветровая нагрузка**

Команда устанавливает режим ввода ветровой нагрузки на пластины. Нагрузка прикладывается на выделенные пластины. В этом режиме вам нажмите левую кнопку мыши на одной из требуемых пластин, после чего появляется окно диалога ввода нагрузки.

Нагрузка задается зависимостью давления ветра от высоты. Значения давления вводятся через запятую в поле Интенсивность, соответствующие высоты через запятую в поле Высота. Направление действия ветровой нагрузки задаётся направляющими косинусами к глобальной системе координат в группе полей ввода Направление.

Среднюю составляющую ветровой нагрузки в виде этой зависимости можно сформировать в автоматическом режиме. Данная возможность реализована для СНиП 2.01.07-85\* (СП 20.13330.2011) с «Нагрузки и воздействия» в соответствии с п. 6.3. Для этого используется группа Автоматическое задание давления от высоты. В диалоге необходимо задать высоту и ширину здания, аэродинамический коэффициент, нормативное значение ветрового давления (вручную или выбрав ветровой район) и тип местности. При этом коэффициент надежности по нагрузке учитывается, умножением на него нормативного значения ветрового давления или умножением на него непосредственно величины давления ветра при задании зависимости давления ветра от высоты. После установки вышеуказанных параметров нажмите кнопку Пересчитать


давление от высоты. В результате поля Интенсивность и Высота заполнятся автоматически.

Ускоренный выбор: 

### **Температурная на пластину**

Команда переводит редактор в режим задания температурной нагрузки на пластину или группу пластин. В этом режиме нажмите левую кнопку мыши на пластине или одной из требуемых пластин, после чего появляется окно диалога ввода данного вида нагрузки. Все действия с нагрузкой (добавление, удаление) выполняются в загружении, выбранном из списка загружений.


Тип нагрузки Температура соответствует равномерному изменению температуры по всей пластине. Тип нагрузки Градиент соответствует равномерному изменению температуры по толщине пластины.  $dT1$  – изменение температуры на грани в направлении нормали локальной системы координат пластины,  $dT2$  – в противоположном направлении.

Ускоренный выбор: 

### **Линейная температура на пластину**

Команда переводит редактор в режим задания температурной нагрузки на группу пластин, изменяющуюся по линейному закону вдоль заданного направления. Вектор изменения температуры указывается точкой начала и конца с помощью левой кнопки мыши. При этом активна привязка к узлам, что позволяет выбирать узлы в качестве начала и конца вектора. После задания вектора направления появляется диалоговое окно, для задания нагрузки. Все действия с нагрузкой (добавление, удаление) выполняются в загружении, выбранном из списка загружений.


Тип нагрузки Температура соответствует изменению температуры по поверхности пластины. Тип нагрузки Градиент соответствует изменению температуры по толщине пластины. Значения в разделе Начало и Конец соответствуют температуре в точках начала и конца вектора направления.  $dT1$  – изменение температуры на грани в направлении нормали локальной системы координат пластины,  $dT2$  – в противоположном направлении. Поля ввода Направление задают вектор линейного изменения температуры.

Ускоренный выбор: 

### **Давление на объемный элемент**


Позволяет задать давление на грани выбранных объёмных элементов. Вызывает диалоговое окно для задания величины и типа добавления распределённой нагрузки.

Знак давления может быть положительным или отрицательным в зависимости от того совпадает ли направление давления с направлением нормали к грани объемного элемента, или нет

Ускоренный выбор: 


### **Ускорение | Линейное ускорение**

Вызывает диалоговое окно для задания линейного ускорения, действующего на конструкцию. Необходимо указать направление действия ускорения и его величину.

Ускоренный выбор: 

### **Ускорение | Угловое ускорение**

Вызывает диалоговое окно для задания угловых скорости и ускорения. Необходимо указать точку – центр вращения, направление действия угловой скорости (считается что вектора угловых скорости и ускорения коллинеарны).

Ускоренный выбор: 

### **Загрузки**

Команда вызывает диалог Загрузки, показанный ниже.

Загрузка может включать в себя комбинацию нагрузок любого вида и характеризуется именем и двумя состояниями: включен/выключен и активный/неактивный. Далее поведение конструкции можно рассчитать от любого загрузения и от комбинации загрузений. Работа с загрузениями аналогична работе со слоями. Если загрузение выключено, то нагрузки из него не будут отображаться на экране. Если загрузение активно, то при задании новой нагрузки по умолчанию будет предлагаться поместить ее в активное загрузение. Каждому загрузению соответствует свой цвет, который, при желании может быть изменен щелчком ЛКМ на цвете того загрузения, который хотелось бы изменить.

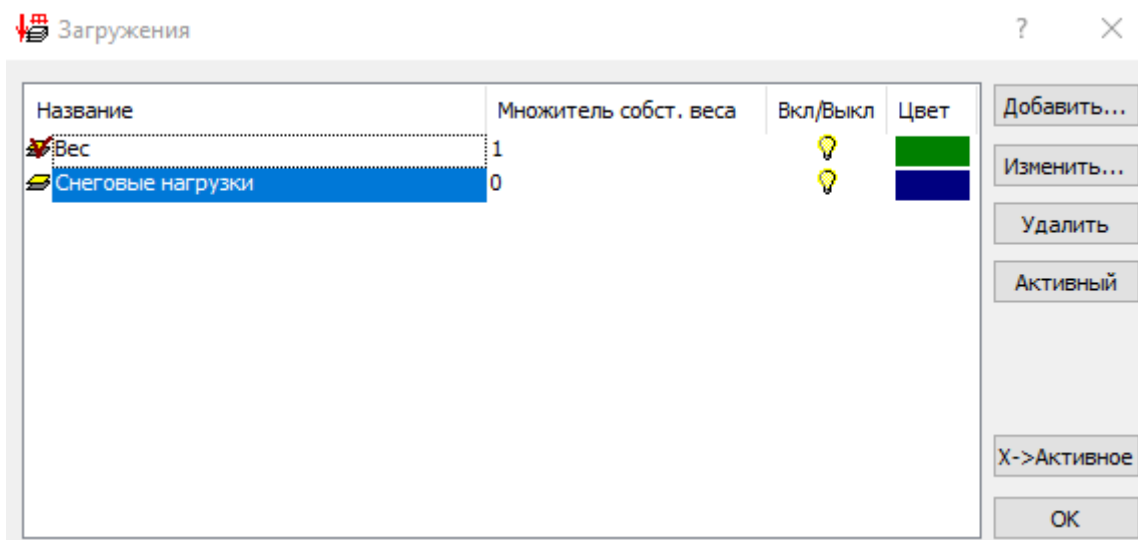


Рисунок 3.1 – Диалог Загрузки

Чтобы создать новое загрузие нажмите кнопку **Добавить**.

Чтобы изменить старое загрузие щелкните на нем в списке и нажмите кнопку **Изменить**.

Чтобы удалить загрузие выделите его в списке и нажмите кнопку **Удалить**.

Нажмите кнопку **Активный** чтобы сделать активным выбранное в списке загрузие.

При нажатии кнопки **X → Активное** все нагрузки из выбранного загрузия будут перемещены в активное.

Ускоренный выбор:

Команда **Цветные загрузия панели инструментов Текущие параметры** включает / выключает режим цветного отображения всех силовых факторов всех загрузий в соответствии с тем цветом, который соответствует конкретным загрузиям.

### **Динамические загрузия**

Команда позволяет создавать новые или редактировать существующие динамические загрузия, вызывая соответствующее диалоговое окно.

Подробное описание данной функции находится в главе 4

### **Комбинация загрузий**

Команда вызывает диалог **Комбинация загрузий**, показанный ниже.

Комбинация загрузий представляет собой линейную комбинацию одновременно действующих загрузий. Возможно создание нескольких комбинаций загрузий.

Для создания комбинации загружений необходимо нажать кнопку Новая и в диалоговом окне ввести название комбинации. Чтобы добавить загрузку в комбинацию выберите название необходимой комбинации в списке. Затем нужно выбрать загрузку в выпадающем списке загрузок, ввести для него множитель и нажать кнопку Добавить. Чтобы изменить множитель загрузки, выберите требуемое загрузку в списке загрузок или множителей, в поле Множитель задайте новое значение и нажмите кнопку Изменить. Чтобы удалить загрузку из комбинации загрузок, выберите требуемое загрузку в списке загрузок или множителей и нажмите кнопку Удалить.

### **Статические нагрузки в массы**

Преобразование статических нагрузок в массы позволяет учитывать не только массу построенной модели, но и массы, заданные в модели в виде нагрузок. Это позволяет более грамотно вести расчеты собственных частот, сейсмике, пульсаций ветра. Команда вызывает соответствующее диалоговое окно.

Порядок задания преобразования нагрузки:

1. В выпадающем меню «Добавить в» выбрать одно из динамических загрузок в которое будет добавлены массы. Пункт Динамические массы означает, что загрузка добавится в матрицу масс при вычислении собственных частот. Если ранее заданы динамические загрузки (сейсмические или пульсации ветра), то также есть возможность выбрать одного из них.
2. В выпадающем меню выбрать загрузку для преобразования, ввести для него коэффициент и нажать кнопку Добавить. Компоненты нагрузки по оси  $Z$  при этом будут преобразованы в массы и приведены к узлам.

Замечание: Масса модели конструкции один раз учитывается в матрице масс и дополнительно преобразовывать загрузку с множителем собственного веса не требуется.

3. В нижней части диалогового окна представлен список динамических нагрузок и загрузок, нагрузки которых преобразованы массы. При необходимости загрузка может быть удалено из преобразования масс.

### **Случайные нагрузки**

Вызывает окно задания случайной усталостной нагрузки для загрузок. Возможно задание случайной усталостной нагрузки для всех загрузок или для отдельных.


Подробнее об усталостном расчете изложено в главе 4.

### **График нагрузки**

Вызывает окно выбора загружений для задания графиков.

Возможно задание единого графика нагрузки для всех загружений или отдельного графика для каждого загружения. Если график для загружения не задан, а это загружение включено в комбинацию загружений, для которой проводится расчет вынужденных колебаний, то расчет останавливается с выдачей сообщения, что не для всех загружений задан график изменения нагрузки от времени.

Кнопка «Задать график» вызывает окно редактора функций для задания графика изменения нагрузки во времени для динамического расчета. В редакторе задается закон изменения коэффициента пропорциональности, на который умножается статическая нагрузка для получения нагрузки в конкретный момент времени.

Ускоренный выбор: 

### **Линейная нагрузка на плиту**

Команда позволяет задать линейную нагрузку на грань плиты. После выбора грани появится диалоговое окно для задания параметров нагрузки.

### **Собственный вес**

Данная команда позволяет учитывать вес отдельных частей конструкции. Для активации данной команды необходимо в диалоговом окне меню Расчет | Параметры расчета сделать активной опцию Вес на часть конструкции, при этом множители собственного веса во всех загружениях обнулятся. После этого станет доступна возможность задать собственный вес на часть конструкции в меню Нагрузка. При активации данной опции появляется диалоговое окно Собственный вес на выделенные элементы, в котором указывается загружение для собственного веса выделенных элементов. Кнопка Не заданные позволяет выделить элементы, для которых не задан собственный вес.

## **Меню Инструменты**

Команды этого меню позволяют производить различные операции с конструкцией для создания более сложных геометрических моделей.

### **Выталкивание**

Позволяет создавать многосекционные конструкции с линейным изменением размеров и поворотом секций. Эти конструкции характеризуется вектором перемещения одной секции, числом секций, коэффициентом изменения размеров и углом поворота

секций. Вначале следует выбрать узел, стержень, пластину или группу произвольной комбинации этих элементов, чтобы команда стала доступной. Затем нужно задать вектор, характеризующий одну секцию. Первое нажатие мыши задает начало вектора, причём в качестве начала вектора необходимо задавать существующий узел (если начало вектора задаётся в произвольной точке пространства без привязки к существующему узлу, то опции изменения размеров и поворота секций будут недоступны). Этот узел становится базовым для изменения размеров, и поворот секции будет осуществляться вокруг данного узла в плоскости перпендикулярной вектору перемещения. Второе нажатие – задаёт конец вектора. После этого появляется диалоговое окно, в котором можно изменить компоненты вектора, задать число секций, полный угол поворота секции и коэффициент изменения размеров.

Вектор умножения задаётся для одной секции, т.е. для  $N$  секций общий вектор умножения будет в  $N$  раз больше, а угол поворота и коэффициент изменения размеров задаётся для общего количества секций, т.е. для каждой секции угол поворота будет делиться на  $N$ , а размеры будут изменяться по линейному закону. При создании объёмных элементов из пластин инструментом умножения необходимо помнить, что кроме объёмных элементов создаются и пластины, копированием исходных на вектор выталкивания.

Параметр «Поместить новые объекты в» позволяет:

- поместить создаваемые объекты в активный слой;
- поместить создаваемые объекты в родительский слой (исходный слой выталкиваемых элементов);
- поместить каждую создаваемую секцию в отдельный слой (наиболее актуально, например, для построения многоэтажных строительных конструкций и оболочечных конструкций).

Выталкивание происходит в несколько шагов:


- Копирование выделенных узлов и узлов, принадлежащих выделенным элементам на вектор выталкивания;
- Поворот скопированных узлов вокруг базового;
- Масштабирование узлов относительно базового;
- Создание стержней, пластин и объёмных элементов;

Опция «Повторение нагрузок и опор» позволяет выполнить копирование всех нагрузок и опор во вновь создаваемые элементы, но при этом не гарантируется, что узлы,



появившиеся в результате выталкивания будут автоматически объединяться с существующими узлами.

Поэтому после выполнения операции Выталкивания с включенной опцией Повторение нагрузок и опор может потребоваться для обеспечения целостности конструкции проведение операции Объединение узлов.

Ускоренный выбор: 

### **Полярный массив**

Команда включает режим создания полярного массива выделенных элементов. Массив характеризуется вектором вращения и полным углом поворота. При выполнении команды происходит копирование выделенных элементов вокруг вектора вращения. Инструмент обладает возможностью не только копировать, но и соединять последовательные копии стержнями, пластинами или объёмными элементами. Угол поворота задаётся для общего количества секций, т.е. при общем количестве копий  $N$ , для каждой секции угол поворота будет делиться на  $N$ .


Вначале следует выбрать узел, стержень, пластину, объёмный элемент или группу произвольной комбинации этих элементов, чтобы команда стала доступной. Затем нужно задать вектор – ось вращения. Первое нажатие мыши задает начало вектора, причём в качестве начала вектора необходимо задавать существующий узел. Через этот узел будет проходить ось вращения. Второе нажатие мыши – конец вектора. После этого появляется диалоговое окно, в котором задаются остальные параметры: количество секций, угол и включается возможность соединения копий стержнями, пластинами или объёмными элементами.

Параметр «Поместить новые объекты в» позволяет:

- поместить создаваемые объекты в активный слой;
- поместить создаваемые объекты в родительский слой (исходный слой выталкиваемых элементов);
- поместить каждую создаваемую секцию в отдельный слой.

Опция «Повторение нагрузок и опор» позволяет выполнить копирование всех нагрузок и опор во вновь создаваемые элементы, но при этом не гарантируется, что узлы, появившиеся в результате выталкивания будут автоматически объединяться с существующими узлами.

Поэтому после выполнения операции Полярный массив с включенной опцией Повторение нагрузок и опор может потребоваться для обеспечения целостности конструкции проведение операции Объединение узлов.

Ускоренный выбор: 


### **Повернуть**

Команда включает режим поворота выделенных элементов. Редактор позволяет Вам поворачивать элементы в плоскости вида, то есть вокруг вектора перпендикулярного видовой плоскости, поэтому перед поворотом необходимо перейти к нужному виду.

Поворот осуществляется вокруг центра вращения. После того как Вы выделили те элементы, которые Вам необходимо повернуть, следует задать щелчком ЛКМ по какому-либо узлу конструкции или по произвольной точке вида, которая будет служить центром поворота.

Далее, смещая указатель мыши, за ним потянется динамический объект в виде луча, на конце которого будет подписываться текущее значение угла поворота, на которое будет повернута выделенная конструкция (или ее часть) если завершить поворот еще одним щелчком ЛКМ.

Чтобы иметь возможность задания угла поворота с клавиатуры, до второго (завершающего) щелчка ЛКМ следует вызвать диалоговое окно Задать с возможностью задания угла поворота с клавиатуры, следует нажать или клавишу Space или Enter. Кроме того, на панели статуса будет показываться текущее значение угла поворота. Приращение угла поворота осуществляется по угловому шагу. Щелчок ПКМ мыши отменяет команду.

Ускоренный выбор: 

### **Поворот+**

Команда позволяет выполнить поворот части конструкции с привязкой к двум узлам и оси.

### **Зеркало**

Команда включает режим создание зеркальной копии (симметрии) выделенных элементов. Симметрия строится по умолчанию относительно плоскости симметрии, перпендикулярной выбранному виду. Для задания плоскости симметрии необходимо нарисовать линию – след плоскости симметрии в видовой плоскости. Первый щелчок

ЛКМ определяет первую точку линии, второй щелчок определяет вторую точку и вызывает открытие диалогового окна Зеркальное отображение.

В данном режиме Вы можете использовать привязку к узлам при рисовании линии. Щелчок ПКМ мыши отменяет команду.


В диалоговом окне предусмотрено редактирование координат точек линии симметрии.

Параметр «Поместить новые объекты в» позволяет:

- поместить создаваемые объекты в активный слой;
- поместить создаваемые объекты в родительский слой (исходный слой выталкиваемых элементов);
- поместить созданные объект в новый слой.

Опция «Повторение нагрузок и опор» позволяет выполнить копирование всех нагрузок и опор во вновь создаваемые элементы, но при этом не гарантируется, что узлы, появившиеся в результате выталкивания будут автоматически объединяться с существующими узлами.

Поэтому после выполнения операции Зеркальное отображение с включенной опцией Повторение нагрузок и опор может потребоваться для обеспечения целостности конструкции проведение операции Объединение узлов.

Ускоренный выбор: 

### **Выравнивание узлов**

Команда позволяет выравнивать выделенные узлы по координатам базового узла. С помощью этого инструмента можно “спроектировать” узлы на плоскость, проходящую через базовый узел и параллельную одной из координатных плоскостей, или на прямую, проходящую через базовый узел и параллельную одной из осей координат.

Для проектирования узлов на плоскость параллельную плоскости XY глобальной системы координат необходимо выбрать узел, лежащий в этой плоскости и отметить галочкой Выровнять по оси Z в окне диалога. Если отметить пункты Выровнять по оси X и Выровнять по оси Y, то узлы будут спроектированы на прямую, параллельную оси Z.

Ускоренный выбор: 

### **Пружина**

Команда создает пружину. После вызова команды на экране появляется диалоговое окно, которое позволяет Вам задать основные параметры пружины: радиус,

шаг, число витков, а также число стержней на один виток пружины. Этот параметр определяет степень точности модели пружины. Пружина проходит через точку (0, 0, 0) и имеет вертикальное расположение в пространстве (ось пружины располагается в направлении оси Z ГСК).

### **Шаблонная сетка**

Команда включает специальный режим, позволяющий создавать стержни одним нажатием левой кнопки мыши, используя при этом шаблонную сетку, которая создается после вызова команды в активном виде. Сетка состоит из горизонтальных, вертикальных и наклонных отрезков. Шаблонная сетка задается тремя параметрами: шагом по оси X, шагом по оси Y и углом поворота всей сетки. Для создания стержня необходимо щелкнуть мышкой на нужном отрезке. При этом будет создан стержень, в точности совпадающий с этим отрезком. Для удаления созданного стержня достаточно щелкнуть на нем второй раз. Шаблонная сетка создает стержни, лежащие в плоскости вида.

### **Установка шаблона**

Команда позволяет задать параметры описанной выше шаблонной сетки. После вызова команды на экране появляется диалоговое окно для задания соответствующих параметров.

### **Слои**

Команда вызывает диалоговое окно для управления слоями.

Выключить все – команда выключает показ всех слоев (гасятся лампочки всех слоев).

Включить все – команда включает показ всех слоев (включаются лампочки всех слоев).

Инвертировать слои – команда изменяет значение вкл/выкл слоя на обратный для всех слоев.

Возврат к предыдущему состоянию – команда восстанавливает предыдущее состояние показа слоев, которое было до текущего момента.

Вкл/Выкл – команда включает/выключает показ всех слоев (включаются/гасятся лампочки всех слоев)

Создать – команда создает новый слой с именем «Слой n» где n – текущий номер нового слоя, следующий за количеством существующих слоев.

Активный – команда делает статус выделенного слоя активным. Активный – это тот слой, в который будут помещаться вновь создаваемые элементы конструкции. У

активного слоя слева от его названия проставляется «птичка». Название активного слоя показывается в инструментальной панели «Текущие параметры».

Поместить выделенное в активный слой – команда помещает выделенные элементы конструкции в активный слой.



– Переместить вверх списка – команда перемещает выделенный слой в первую строчку списка слоев.



– Переместить вверх на одну позицию – команда перемещает выделенный слой на одну строку выше в списке слоев.



– Переместить вниз на одну позицию – команда перемещает выделенный слой на одну строку ниже в списке слоев.



– Переместить в низ списка – команда перемещает выделенный слой в последнюю строчку списка слоев.

Удалить – удаляет выделенный слой. При удалении слоя, который содержит элементы, последние перемещаются в активный слой.

Удалить пустые – удаляет те слои, в которых отсутствуют элементы конструкции.

Щелчок ЛКМ на цветовой полоске позволяет задать каждому слою свой цвет.



– Цветные слои – кнопка на инструментальной панели «Текущие параметры», позволяет «раскрасить» элементы, принадлежащие различным слоям в тот цвет, который им соответствует.




– Полупрозрачные оболочечные элементы - кнопка на инструментальной панели «Текущие параметры», позволяет «окрасить» в разные оттенки тени оболочечные элементы в погашенных слоях, чтобы, тем не менее, определить их положение в конструкции.

Пользователь может создавать новые слои, назначать им имена, назначать активный, отключать/включать или удалять их, а также, для удобства визуального контроля, назначать цвет. Редактор всегда имеет один активный слой, в который помещаются элементы при создании. Элементы, которые находятся в выключенном слое, не показываются на экране и недоступны для выделения. Выделенные элементы могут быть перемещены из тех слоев, в которых они находятся в активный слой.

Ускоренный выбор:

### **Добавить в текущий слой**

Команда перемещает все выделенные элементы из тех слоев, где они находятся в активный слой.

Ускоренный выбор: 

### **Проверки | На связанность**

Команда проверяет связанность всех элементов. В том случае, если будут найдены отдельные элементы, не соединенные со всей конструкцией, появляется соответствующее сообщение. Несвязанные элементы, после нажатия кнопки **Ок** выделяются.

### **Проверки | На соответствие материалов**

Команда проверяет, чтобы для стержневых и твердотельных конечных элементов не был задан композитный материал. Композитный материал может быть задан только для пластин.

### **Проверки | На наличие сечения**

Команда определяет стержни и элементы трубопроводов для которых не заданы сечения. Стержни и элементы трубопроводов, у которых не задано сечение, выделяются.

### **Проверки | Совпадения стержней**

Команда проверяет наличие между двумя узлами двух и более стержней. Подобная ситуация может возникнуть при импорте конструкции из других CAD/CAE систем. Если будут такие совпадающие стержни обнаружены, то будет выдано сообщение, что все совпадающие стержни удалены.

### **Проверки | Углов пластин**

Команда проверяет углы пластин на попадание в заданный диапазон. Минимальный и максимальный углы задаются в появляющемся диалоговом окне.

### **Проверки | Совпадения пластин**

Команда проверяет наличие между теми же узлами двух и более пластин. Подобная ситуация может возникнуть при импорте конструкции из других CAD/CAE систем, а также создана в модуле APM Structure3D. Если будут такие совпадающие пластины, появится сообщение.

### **Проверки | Объемных элементов**

Команда выводит диалоговое окно с информацией об объемных элементах модели.

После нажатия кнопки «**Рассчитать**» вычисляются критерии объемных элементов текущей модели (Объем, Якобиан, Отношение размеров, Схлопывание).

Выбор критерия осуществляется в выпадающем списке. После расчета максимальная, средняя и минимальная величины модели выводятся в верхней части диалогового окна для выбранного критерия.

Далее задаются нижняя и верхняя границы проверки для выбранного критерия

После нажатия кнопки «Проверить» системы выделит объемные элементы, проверка для которых не выполняется.

#### **Проверки | Совпадения объемных элементов**

Команды осуществляют проверку совпадения элементов. В случае невыполнения проверки система выдает соответствующее предупреждение.

#### **Проверки | Относительный размер**

Команда осуществляет проверку отношения максимальной длины стороны (ребра) элемента к минимальной. Соотношение размеров должно редко превышать 5:1.

#### **Проверки | Сужение**

Команда осуществляет проверку сужения элементов. Для треугольных КЭ и тетраэдров сужение равно 0. Допустимый диапазон значений от 0 до 1. Значение 0 считается идеальным, близким к 1 – очень плохим.

#### **Проверки | Якобиан**

Команда осуществляет проверку якобиана элементов. Допустимый диапазон значений от 0 до 1. Значение 1 считается идеальным, близким к 0 – очень плохим. Приемлемое значение до 0.7.

#### **Проверки | Коробление**

Команда осуществляет проверку коробления элементов. Для треугольных КЭ и тетраэдров коробление равно 0, для остальных пластинчатых и твердотельных КЭ коробление до пяти градусов в целом приемлемо.

#### **Проверки | Качество элементов**

Команда выводит диалоговое окно с информацией о качестве элементов. Работа команды аналогична работе команды Проверки | Объемных элементов.

#### **Совместить узлы**

Позволяет соединить узлы конструкции, лежащие на расстоянии не большем указываемого в диалоговом окне Совместить узлы.

Если предварительно выделить группу узлов и провести ту же операцию, то она будет производиться только для узлов выделенной части конструкции.

Выпадающий список Алгоритм позволяет выбрать алгоритм совмещения узлов.

В соответствующем выпадающем списке можно выбрать узлы с меньшим или большим индексом будут сохранены после выполнения команды.

#### **Выделить свободные узлы**

Команда выделяет узлы, не принадлежащие ни одному элементу.

#### **Операции с сеткой | Повысить порядок объемных элементов**

Команда позволяет конвертировать твердотельные конечные элементы низкого порядка (4-х, 5-ти, 6-ти, 8-ми узловые) в твердотельные конечные элементы высокого порядка (10-ти, 13-ти, 15-ти, 20-ти узловые соответственно), что позволяет повысить точность вычислений, уменьшив при этом требования к качеству исходной сетки.

#### **Операции с сеткой | Разделить объемные элементы**

Команда позволяет отделить объемные элементы одной детали от объемных элементов другой детали. Например, необходимо для решения контактной задачи разделить две детали, которые выполнены в виде единой КЭ-модели и имеют общие узлы. Для этого помещаем элементы каждой детали в отдельные слои, выделяем элементы, расположенные в разных слоях и имеющие общие узлы и активируем команду Инструменты | Операции с сеткой | Разделить объемные элементы. При этом в каждом узле сопряжения будут созданы 2 несвязанных узла – один узел принадлежит одной детали (слою), а второй – другой. При выключении любого одного слоя узлы сопряжения будут все равно показаны на модели.

#### **Операции с сеткой | Сгущение сетки (4-узловые тетраэдры)**

Данный инструмент позволяет сгущать сетку конечных элементов на моделях, выполненных из твердотельных конечных элементов (4-х узловых тетраэдров). При активации команды Сгущение сетки появляется диалоговое окно, в котором пользователю предлагается выбрать параметры сгущения сетки и узел, вокруг которого будет сгущаться сетка.

#### **Операции с сеткой | Построить свободные ребра**

Команда позволяет упростить процедуру визуального поиска несвязности в модели. После активации данной функции, свободные ребра будут подсвечены во время динамического вращения модели



### **Операции с сеткой | Смещения пластин по нормали**

Команда позволяет построить пластины, находящиеся на расстоянии от исходных. После выделения исходных пластин и активации команды появится диалоговое окно, в котором можно задать величину смещения. Опции Копировать и Переместить позволяют сохранять или удалять исходные пластины после выполнения операции.

### **Операции с сеткой | Встроить трещину в модель (4-узловые тетраэдры)**

Команда позволяет встроить трещину в область КЭ-модели, состоящую из 4-х узловых тетраэдров и провести статический или усталостный расчет на трещиностойкость.

Подробнее процесс расчета моделей с трещинами описан в главе 12

### **Операции с сеткой | Всё со всем**

Команда позволяет соединить все выделенные узлы между собой стержневыми элементами.

### **Операции с сеткой | Сетчатые структуры**

Команда позволяет заменять объемные элементы на сетчатые структуры из стержневых и пластинчатых элементов.

### **Операции с сеткой | Объемная доля**

Подготовка к топологической оптимизации (ТО) и последующая постобработка выполняются с помощью диалогового окна Объемная доля (рисунок 3.2).

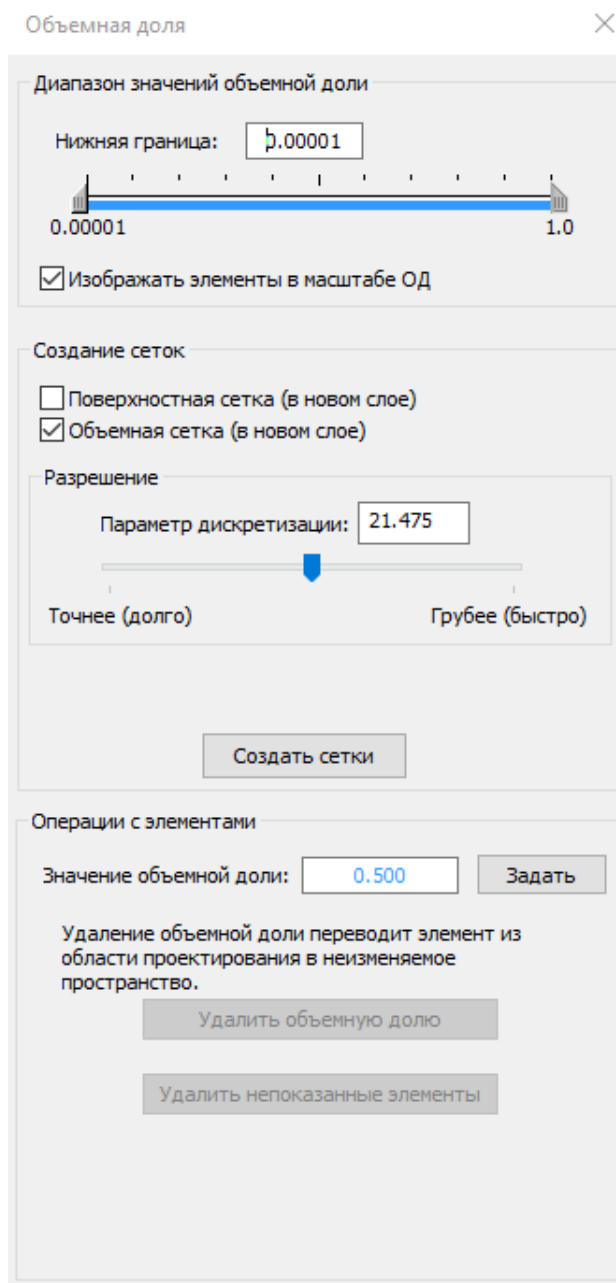


Рисунок 3.2 – Диалог Объемная доля

При открытии диалогового окна автоматически выключится показ узлов. Чтобы видеть узлы (и приложенные к ним нагрузки), включите показ узлов кнопкой Показать узлы на инструментальной панели Фильтры вида.

Ползунок в панели "Диапазон значений объемной доли" служит для изучения результатов расчета ТО. Перемещая его или меняя число в поле "нижняя граница", можно показывать только элементы с объемной долей, большей указанного значения. При этом, если установлен флажок "Изображать элементы в масштабе ОД", элементы будут отображаться уменьшенными пропорционально вычисленной объемной доле (1.0 соответствует исходному размеру элемента).

Панель "Создание сеток" служит для построения новых сеток в области, где производилась ТО (область или пространство проектирования). Устанавливая соответствующие флажки, можно заказать построение поверхностной (из пластин) или объемной (из тетраэдров) сеток. Поле и ползунок в разделе "Разрешение" управляют размером элементов в создаваемых сетках. Построение более точной сетки требует большего числа элементов и выполняется дольше.

Панель "Операции с элементами" объединяет инструменты для манипуляций с объемной долей. Для задания области, в которой будет производиться топологическая оптимизация, необходимо выделить элементы конструкции (пластины, стержни либо объемные элементы) и задать им произвольное значение объемной доли (по умолчанию 0.5), нажав кнопку Задать.

С помощью кнопки Удалить объемную долю возможно удалить объемную долю у выделенных элементов, указывая тем самым, какие части конструкции не должны подвергаться ТО (неизменяемые области).

Кнопка Удалить непоказанные элементы может использоваться вместе с ползунком в верхней части окна для быстрого удаления части объемных элементов, объемная доля которых меньше заданной.

Кнопка Бинаризация, доступная только на компьютерах с поддержкой технологии CUDA, позволяет избавиться от промежуточных (более 0, но менее 1) значений объемной доли, полученных в результате расчета.

Подробнее топологическая оптимизация описана в главе 11

### **Операции с сеткой | Сетка в замкнутой оболочке**

Команда позволяет заполнить объем, ограниченный треугольными пластинами, тетраэдрическими элементами.

### **Операции с сеткой | Создать твердотельную модель стержня**

Команда позволяет заменить стержневые элементы на параллелепипеды из твердотельных элементов.

Опции Звездочка в начале и конце стержня позволяют соединить все узлы на торцах созданной твердотельной модели с начальным и конечным узлом исходной стержневой модели соответственно.

Тип укорочения – настройка, определяющая, на сколько созданная твердотельная модель стержня будет короче исходной стержневой.

Следующие настройки определяют размеры создаваемых твердотельных конечных элементов. При выбранной опции Размеры элементов пользователь вручную

задает размеры создаваемых элементов. Опция Количество разбиений задает количество элементов в направлениях ГСК, на которое будет разбита создаваемая твердотельная модель. Интеллектуальное задание – задаются соотношения размеров, создаваемых элементов.

#### **Создать контактные элементы**

Данный инструмент предназначен для создания одной зоны контакта (контактных элементов на свободных гранях выделенных объёмных элементов). Перед выполнением данной команды, необходимо модели контактирующих деталей расположить в разных слоях и выделить объёмные элементы, которые, предположительно, будут участвовать в контактном взаимодействии. Если предполагается наличие контакта в более чем одной области, то данную команду следует последовательно выполнить для каждой предполагаемой области. В процессе выполнения команды будут созданы контактные КЭ на одной детали, и целевые КЭ на другой детали.

#### **Области и группы | Подконструкции**

Данный инструмент предназначен для разделения расчетной модели на подконструкции (ПК) для выполнения статического расчета модели большей размерности.

Особенности работы с ПК:

- вся конструкция должна быть разнесена на отдельные подконструкции;
- каждая из ПК должна состоять из связанных между собой КЭ;
- при разделении модели не должно остаться узлов или КЭ, которые не вошли ни в одну ПК;
- выполнить расчет отдельной ПК нельзя, расчет выполняется только для всех ПК.

Список ПК – список подконструкций модели.

Режим работы с ПК:

"+" – добавление/удаление элементов конструкции в ПК. При выделении элементов конструкции становятся активными кнопки Текущее выделение КЭ, которые позволяют:

- добавить КЭ в новую ПК;
- добавить в текущую ПК;
- удалить из текущей ПК.

"Info" – режим информации о ПК. При щелчке ЛКМ на каком-либо элементе конструкции, выделится в списке ПК, которая содержит выбранный элемент, и эта ПК подсвечивается красным цветом на модели.

После выделения одной из ПК и нажатия кнопки Текущей в Пересчет степ. своб. ПК – в свойствах ПК показывается количество Внутренних и Внешних степеней свободы и их отношение.

Внутренние степени свободы – степени свободы узлов ПК, которые соединены только с узлами этой же ПК.

Внешние степени свободы – степени свободы узлов ПК, которые соединены только с узлами другой (других) ПК.

Внутр/Внешн – показывает отношение внутренних к внешним степеням свободы. Чем это отношение выше, тем выгоднее (с точки зрения использования памяти компьютера) использование подконструкций.

Для выполнения расчета конструкции с под-конструкциями необходимо выбрать в меню Расчет | Расчет подконструкций.

Для просмотра результатов расчета выбрать Результаты | Выбор модели для вывода результатов... и откроется окно Вывод результатов статического расчета. Результаты расчета будут доступны как для всей модели, так и для отдельных ПК.

### **Области и группы | Группы элементов**

Данный инструмент предназначен для объединения разнотипных конечных элементов в единую группу для выполнения усталостного расчета при стохастическом (случайном) внешнем нагружении и расчета по топологической оптимизации.

Особенности работы с ГЭ:

- в конструкция должен быть создана хотя бы одна группа элементов, для которой и будет производиться расчет;

Список ГЭ – список групп элементов модели.

Режим работы с ПК:

"+" – добавление/удаление элементов конструкции в ГЭ. При выделении элементов конструкции становятся доступными кнопки Текущее выделение ГЭ, которые позволяют:

- добавить в новую ГЭ;
- добавить в текущую ГЭ;
- удалить из текущей ГЭ.

"Info" – режим информации о ГЭ. При щелчке ЛКМ на каком-либо элементе конструкции, выделится в списке ГЭ, которая содержит выбранный элемент, и эта подсвечивается красным цветом на модели.

Кнопки Удалить текущую ГЭ и Удалить все ГЭ удаляют, соответственно или выделенную ГЭ или все ГЭ.

Кнопка В ГЭ по слоям позволяет создать ГЭ по принципу принадлежности разным слоям, но для этого в Списке ГЭ не должно быть ни одного ГЭ.

#### **Связь группа узлов – узел**

Данный инструмент предназначен для создания нескольких упругих связей, соединенных с одним узлом. Сначала необходимо выделить группу узлов, после активации команды указать узел, к которому должны быть присоединены упругие связи.

В появившемся диалоговом окне выбрать какими элементами будут связаны узлы: жесткими стержнями или упругими связями.

При выборе упругих связей необходимо в диалоговом окне задать жесткостные характеристики по степеням свободы упругих связей.

#### **Связь группа узлов – группа узлов**

Данный инструмент предназначен для создания нескольких связей, соединенных попарно. Активируйте команду Инструменты / Связь группа узел – группа узлов. Затем следует выделить первую группу узлов (они будут выделены синим цветом), затем выделить вторую группу соответствующих им узлов (они будут выделены зеленым цветом) и нажать клавишу Enter. В появившемся диалоговом окне выбрать какими элементами будут связаны узлы: жесткими стержнями, упругими связями, объединениями перемещений. При выборе упругих связей необходимо в диалоговом окне задать их жесткостные характеристики по степеням свободы упругих связей.


#### **Дополнительные операции | Пересечение стержней и/или пластин**

Команда предназначена для получения точек пересечения 2-х стержней, стержня и пластины или 2-х пластин. После активации команды щелкните по одному элементу, а затем по-другому.

Например, при пересечении 2-х стержней – если стержни пересекаются, то они будут разбиты строго в точке пересечения узлом, если стержни НЕ пересекаются, то до точки пересечения они будут достроены новыми стержнями. В результате пересечения стержня и пластины появится один новый узел. Результатом пересечения 2-х пластин являются узлы на линии пересечения.

### **Дополнительные операции | Соединение скрещивающихся стержней**

Команда позволяет соединить два скрещивающихся стержня по минимальному расстоянию.

Ускоренный выбор: 

### **Дополнительные операции | Угол между двумя стержнями**

Команда позволяет измерить угол между двумя стержнями. Выделите 2 пересекающихся стержня. После активации команды система в диалоговом окне укажет угол между осями X их ЛСК в градусах. В зависимости от расположения ЛСК этих стержней реальный угол будет показываться или непосредственно, или значение смежного с ним угла

### **Дополнительные операции | Угол между двумя пластинами**

Команда позволяет измерить угол между двумя пластинами. Выделите 2 пересекающихся пластины. После активации команды система в диалоговом окне укажет угол между осями Z их ЛСК в градусах. В зависимости от расположения ЛСК этих стержней реальный угол будет показываться или непосредственно, или значение смежного с ним угла.

### **Дополнительные операции | Угол между стержнем и пластиной**

Команда позволяет измерить угол между стержнем и пластиной. Выделите пересекающиеся в пространстве стержень и пластину. После активации команды система в диалоговом окне укажет угол между ними в градусах.

### **Дополнительные операции | Проекция узлов на стержень**

Выделите 1 стержень и несколько узлов, после чего активируйте команду. При этом будут созданы узлы проекций на стержне и его продолжении.

### **Дополнительные операции | Проекция узлов на пластину**

Выделите 1 пластину и несколько узлов, после чего активируйте команду. При этом будут созданы узлы проекций на пластине и ее продолжении.

### **Дополнительные операции | Найти центр тяжести контура**

Команда позволяет найти центр тяжести контура, определенного группой узлов

### **Дополнительные операции | Найти центр по 3 точкам**

Команда позволяет построить узел, находящийся на равном расстоянии от трех выбранных.

Ускоренный выбор: 

### **Проецирование узлов на плоскость**

Команда позволяет перенести выделенные узлы на заданную плоскость. Соответствующие конечные элементы после выполнения операции будут изменены. Важно, чтобы изменяемые конечные элементы не были помещены в конструктивные элементы.

После активации команды необходимо указать 3 точки, определяющие плоскость, на которую будут перенесены узлы. Затем, необходимо указать вектор переноса этих узлов.

В ходе выполнения команды, нажатие клавиш Enter или Space вызывает диалоговое окно для задания необходимых параметров вручную


Ускоренный выбор: 

### **Проецирование узлов на цилиндр**

Команда позволяет перенести выделенные узлы на заданную цилиндрическую поверхность. Соответствующие конечные элементы после выполнения операции будут изменены. Важно, чтобы изменяемые конечные элементы не были помещены в конструктивные элементы.

После активации команды необходимо указать 2 точки, лежащие на оси и торцах цилиндра, на которую будут перенесены узлы, а также точку, лежащую на поверхности цилиндра. Затем, необходимо указать вектор переноса узлов.

В ходе выполнения команды, нажатие клавиш Enter или Space вызывает диалоговое окно для задания необходимых параметров вручную.


Ускоренный выбор: 

### **Проецирование узлов на сферу**

Команда позволяет перенести выделенные узлы на заданную сферическую поверхность. Соответствующие конечные элементы после выполнения операции будут изменены. Важно, чтобы изменяемые конечные элементы не были помещены в конструктивные элементы.

После активации команды необходимо указать центр сферы и точку на поверхности сферы, на которую будут перенесены узлы. Затем, необходимо указать вектор переноса узлов.

В ходе выполнения команды, нажатие клавиш Enter или Space вызывает диалоговое окно для задания необходимых параметров вручную.

Ускоренный выбор: 



### **Измерить расстояние между узлами**

После активации команды укажите один узел (узел будет выделен синей точкой), затем второй узел (узел будет выделен зеленой точкой). После выделения второго узла система в диалоговом окне укажет номера выделенных узлов и расстояние между ними в текущих единицах.

Ускоренный выбор: 

### **Инерция выделенных объектов**

Команда позволяет вычислить инерционные характеристики группы выделенных элементов относительно выбранной точки (узла).

После выделения элементов для которых требуется определить инерционные характеристики следует задать узел, относительно которого будут определяться инерционные характеристики и выводится соответствующее окно с результатами.

### **Сервер расчета | Сервер обмена TCP/IP**

Команда позволяет создать сервер обмена по протоколу TCP/IP для совместного решения задач течения жидкости и газа (FGA) и задач расчета напряженно деформированного состояния (FSI).

Более подробно процесс расчета FSI описан в главе 7

### **Сервер расчета | Импорт нагрузок из FlowVision**

Команда позволяет импортировать из текстовых файлов FlowVision силовых факторов, действующих на модель. Это необходимо для совместного решения задач течения жидкости и газа (FGA) и задач расчета напряженно деформированного состояния (FSI).

Более подробно процесс расчета FSI описан в главе 7

## **Меню Свойства**

### **Сечения**

Команда вызывает диалоговое окно Сечения для работы со списком сечений и выбора текущего сечения. Всем вновь создаваемым стержням будет присвоено текущее сечение. Возле каждого из сечений показан его тип (соответствующий типу сечения из библиотек, из которой оно было загружено), раскрашенный одним из цветов, который будет использоваться для визуализации стержней. С помощью кнопки Цвет можно задать каждому сечению другой цвет.

Кроме того, с помощью кнопок «Присвоить всем» и «Присвоить выделенным» можно задать присвоить сечение всем или только выделенным стержням.

Кнопки «Заменить сечение из библиотеки» и «Заменить сечение из БД» позволяет в конструкции полностью заменить выбранное сечение на другое сечения, выбранное в первом случае из библиотеки сечений, а во втором из Базы Данных (БД).

С помощью кнопки «Экспорт» пользователь может добавить сечение, например, полученного из базы данных в выбранную библиотеку сечений, а с помощью кнопки «Удалить» – удалить выбранное сечение из списка сечений конструкции, если данное сечение не присвоено каким-либо стержневым элементам конструкции.

Кнопка «Параметры» позволяет открыть/закрыть правую часть окна «Сечения» с параметрами сечения и его типом. Первоначально диалоговое окно сечения открывается в неразвернутом виде.

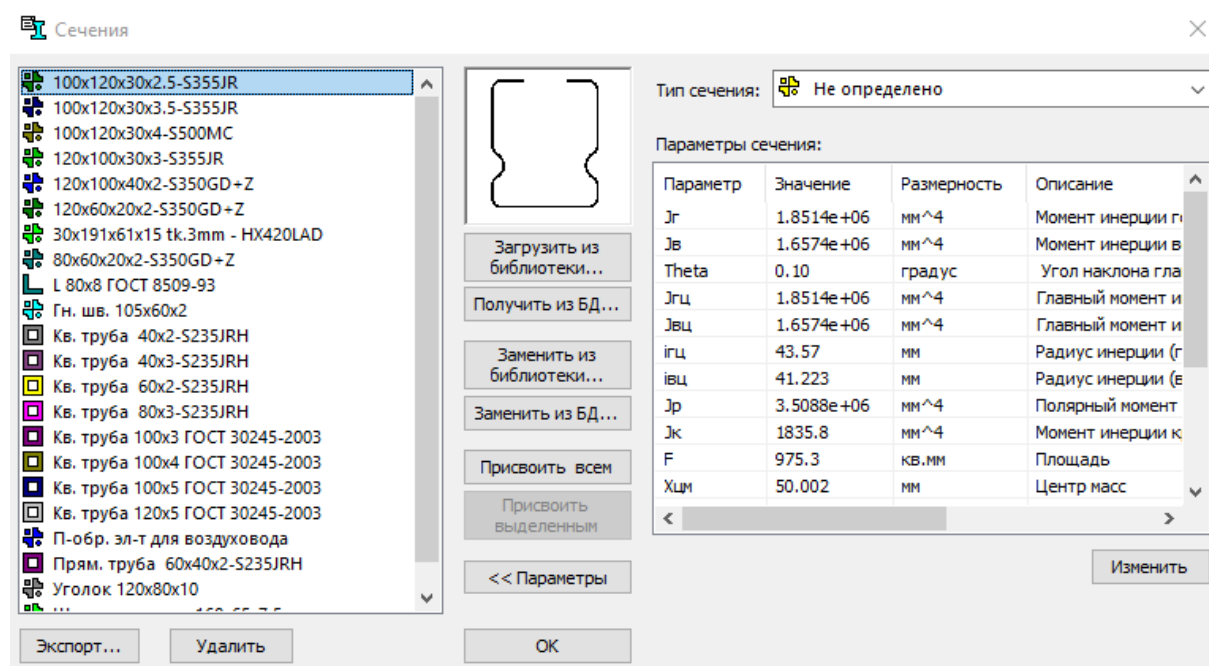


Рисунок 3.3 – Диалог Сечения

Кнопка «Получить из БД» приводит к открытию Базы данных, содержащих параметрические модели, из которых может быть создано сечение и добавлено в список сечений.

Кнопка «Загрузить из библиотеки» вызывает окно загрузки загрузить сечения из библиотеки сечений. Библиотеки сечений, поставляемые с системой, находятся в папке, куда установлена система APM WinMachine.

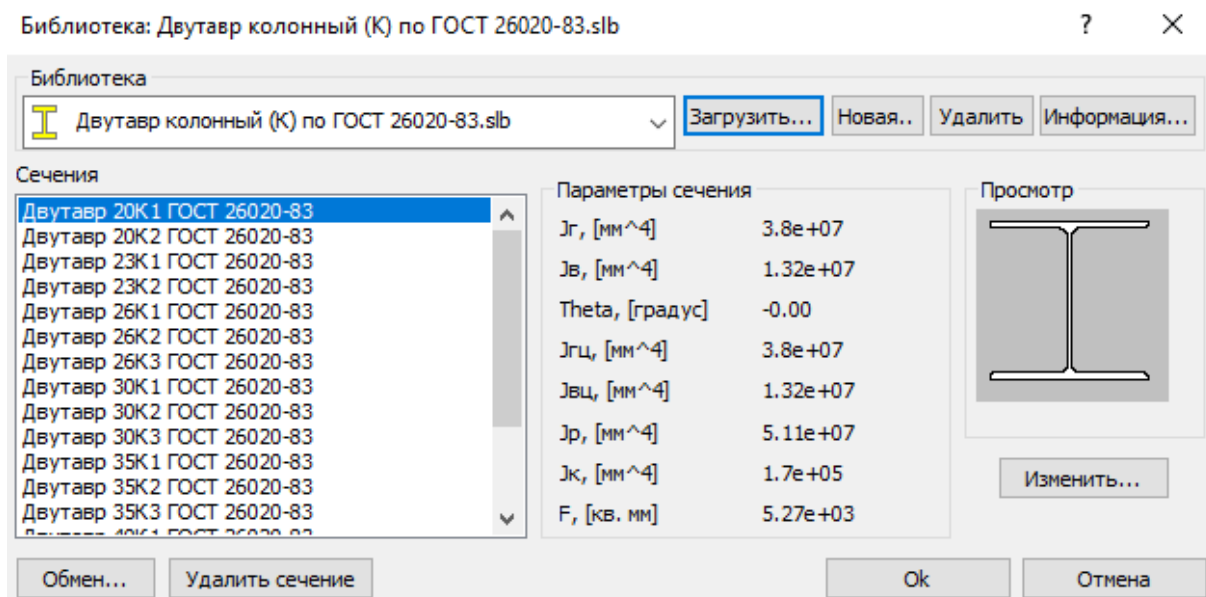


Рисунок 3.4 – Диалог Библиотека

В группе параметров Библиотека этого окна:

- выпадающий список содержит библиотеки, из которых пользователь ранее добавлял сечения с список сечений конструкции;
- кнопка Загрузить позволяет загрузить новую библиотеку из которого будет добавлено сечение;
- кнопка Новая позволит создать новую библиотеку сечений;
- кнопка Удалить – удалит ранее использовавшуюся библиотеку из выпадающего списка ранее использовавшихся библиотек, но сама библиотека останется неизменной на жестком диске;
- кнопка Информация вызывает окно, содержащее информацию о библиотеке.

Кнопка Изменить – позволяет изменить геометрические характеристики выбранного сечения вручную.

Кнопка Удалить сечение – позволяет удалить выбранное сечение из библиотеки.

Кнопка Обмен – вызывает окно, позволяющее двум библиотекам обмениваться сечениями.


Кнопка Новая – позволяет создать новую библиотеку сечений и вызывает диалоговое окно Новая библиотека.

Кнопка «Получить из БД» в диалоге Сечения позволяет добавить сечение в модель непосредственно из базы параметрических сечений, минуя библиотеки. Для вызова менеджера баз данных кликните правой кнопкой мыши в дереве базы данных.

Откройте в дереве интересующий тип сечения двойным кликом мыши, затем выберите необходимый размер сечения в списке и нажмите кнопку «Ок». При необходимости вы можете изменить параметры сечения в диалоговом окне «Переменные». Без необходимости не меняйте размеры стандартных сечений.


Замечание. Для корректного расчета армирования необходимо обязательно указать тип сечения: -1 – не определено, 0 – равнополочный двутавр, 1 – неравнополочный двутавр, 2 – тавр, 3 – швеллер, 4 – уголок, 5 – труба квадратная, 6 – прямоугольник, 7 – круг, 8 – кольцо.

Далее система автоматически определит размеры сечения и предложит ввести название сечения. Рекомендуется использовать размеры сечения в его названии. После этого сечение будет добавлено в список сечений текущего документа.

Ускоренный выбор: 

### **Сечение стержням**

Команда позволяет присвоить текущее сечение всем стержням конструкции, если никаких стержней не выделено, или только выделенным стержням. Подробное описание в команде Свойства | Сечения


Ускоренный выбор: 

### **Ориентация сечения**

Команда позволяет просматривать ориентацию сечения стержня относительно его оси, а также изменять эту ориентацию, поворачивая сечение вокруг неё. Для этого, выбрав данную команду, щелкните мышкой на требуемом стержне. В результате стержень выделится цветом и на нем будет нарисована его локальная система координат и жестко связанное с ней поперечное сечение стержня, если оно задано. Для поворота системы координат стержня щелкните на нем второй раз, и редактор перейдет в режим поворота системы координат стержня. Установите требуемый угол поворота, перемещая мышь вправо или влево. Шаг изменения угла поворота устанавливается в опциях курсора по команде Вид/Шаг курсора. Этот режим позволяет ориентировать ось у системы координат стержня в направлении указываемого узла, при этом ось стержня, ось у системы координат стержня и линия, соединяющая узел начала стержня и выбранного узла, будут лежать в одной плоскости. Чтобы выбрать узел, задающий направление ориентации, в режиме поворота локальной системы координат стержня подведите курсор к требуемому узлу, так чтобы он выделился цветом и щелкните левой кнопкой мыши.

По умолчанию у стержня устанавливается система координат, в которой ось X направлена по оси стержня от первого узла к второму. Ось Y находится в плоскости оси X стержня и глобальной оси Y. Ось Z системы координат стержня дополняет локальные оси X и Y до правой.

Для изменения масштаба показа поперечного сечения используются клавиши клавиатуры правые «+» и «-» в сторону увеличения и уменьшения соответственно.


Ускоренный выбор: 

### **Информация о стержне**

Команда включает режим, позволяющий просмотреть информацию о стержне. Для этого необходимо выбрать стержень в виде, после чего появляется диалоговое окно.

Список Стержни содержит все стержни конструкции и позволяет выбирать их для просмотра. Этот список позволяет также изменить имя стержня, которое присваивается по умолчанию. Для этого дважды щелкните на имени стержня в списке и введите имя в появившемся диалоговом окне. Под списком стержней находится выпадающий список типов элементов. С его помощью выбранный стержень можно сделать балочным / ферменным / канатным элементом, а также элементом трубопровода. Под выпадающим списком типов элементов указано название слоя, которому принадлежит выбранный стержень.

Далее показано сечение со своими параметрами, которое присвоено данному стержню, его угол поворота (который может быть изменен) и материал, присвоенный этому стержню.


Ускоренный выбор: 

### **Точка привязки сечения**

С помощью этой команды можно установить точку привязки сечения относительно оси стержня. По умолчанию ось стержня проходит через центр масс сечения. Команда вызывает соответствующий диалог.


В списке Точка привязки выберите требуемое положение сечения относительно оси стержня. Если выбрано Задана пользователем, то смещение точки привязки относительно центра масс сечения можно задать вручную в полях Смещение в ЛСК.

Отметим, что появление дополнительных силовых факторов в виде моментов, получающихся за счет смещения точки привязки стержня будет учтено при проведении статического и других видов расчета.

Ускоренный выбор: 


### Инвертировать систему координат стержня

Команда переносит начало координат в другой узел стержня. Направление оси X – также по длине стержня, но уже в другую сторону; направление оси Y не меняется; направление оси Z меняется на противоположное, т.к. система координат остается правой.

Ускоренный выбор: 

### Длина выделенных стержней

Команда позволяет узнать длину выделенных стержневых элементов.

Ускоренный выбор: 

### Тип стержневых элементов

Команда позволяет устанавливать и менять тип стержневых элементов (балка / ферма / канат или участок трубы).

### Начальные условия для SMA

Команда позволяет задать начальное состояние конечных элементов для расчета SMA.

### Свойства элементов трубопроводов

С помощью этой команды вызывается диалоговое окно Моделирование трубопроводов.

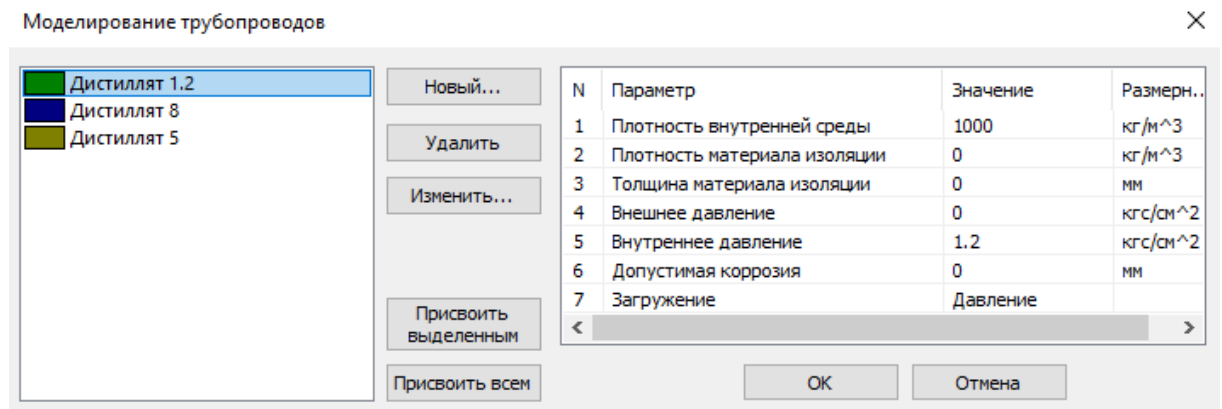


Рисунок 3.5 – Диалог Моделирование трубопроводов

Группе стержневых элементов с кольцевым сечением (секции трубопровода) присваивается определенное имя и элементам этой секции трубопровода задаются одинаковые параметры нагрузки.

С помощью кнопок данного окна для выбранной секции трубопровода можно задать:

Цвет – задать определенный цвет выделенной секции трубопроводов;

Присвоить выделенным или Присвоить всем – добавить или выделенные элементы трубопровода или все элементы в выбранную секцию трубопровода;

Удалить – удаляет заданные ранее свойства выбранной секции трубопровода (сами трубопроводные элементы конструкции остаются);

Изменить – изменить заданные ранее свойства секции трубопровода – открывает диалоговое окно Параметры свойств элементов трубопроводов для выбранной секции.

Новый – открывает диалоговое окно Параметры свойства элементов трубопроводов для выбранной секции.

Параметры свойства элементов трубопроводов

Название

Плотность внутренней среды  [кг/м<sup>3</sup>]

Плотность материала изоляции  [кг/м<sup>3</sup>]

Толщина материала изоляции  [мм]

Допустимая коррозия  [мм]

Заглушки на концах

Гибкость

Пользовательское значение

Множитель интенсивности нагрузки

Пользовательское значение

Для узла 0:  1:

Давление, [кгс/см<sup>2</sup>]

Внешнее  Внутреннее

Загружение

Рисунок 3.6 – Диалог Параметры свойства элементов трубопроводов

Название – задает название секции;

Плотность внутренней среды – задает плотность среды, заполняющей трубопровод;

Плотность и Толщину материала изоляции – задаются параметры изоляции трубы, если она есть;

Допустимая коррозия – задается допустимая коррозия стенки трубопровода (ее утонение);

Заглушки на концах – позволяет задать элемент с открытыми или закрытыми концами


Гибкость – величина, влияющая на момент инерции изгиба трубы. По умолчанию она равна 1, но пользователь может ее задать сам, числом больше 1.

Множитель интенсивности нагрузки – показывает, во сколько раз напряжение на конце прямолинейного участка трубопровода будет больше, чем напряжение в его середине от внешнего/внутреннего давления. Множитель задается для двух узлов – начала участка (0) и его конца (1). По умолчанию эти множители равны по единице, но пользователь может задать свои значения.

Внешнее и внутреннее давление на элементы трубопровода, соответственно снаружи и изнутри;

Загружение – выбирается загружение, в котором будет задано давление.

Ускоренный выбор: 

С помощью кнопки  Цветные свойства элементов трубопроводов можно включить или отключить отрисовку секций трубопроводов в цвет, присвоенный этим секциям.

### **Задать толщину пластинам**

С помощью этой команды можно задать толщину или всем пластинам, если никаких пластин не выделено, или выделенным пластинам. При выборе данной команды появляется диалоговое окно, показанное ниже.

Ускоренный выбор: 


### **Информация о пластине**

Команда включает режим, позволяющий просмотреть информацию о пластине. Для этого необходимо выбрать пластину в виде, после чего появляется диалоговое окно. Окно Список Пластин содержит список всех пластины конструкции и позволяет выбирать их для просмотра. Этот список позволяет также изменить имя пластины, которое присваивается по умолчанию. Для этого дважды щелкните на имени пластины в списке и введите имя в появившемся диалоговом окне.

Кроме того, из выпадающего списка можно задать/уточнить тип пластины ДКТ или МТС. По умолчанию для новых пластин задается тип ДКТ.

Из другого выпадающего списка можно задать тип жесткости пластины: Жесткость по Каноку / Фиктивная жесткость / Жесткость по Аллману. По умолчанию для новых пластин задается тип Жесткость по Каноку.




Ускоренный выбор: 

### **Привязка пластин**

С помощью этой команды можно установить точку привязки пластины относительно ее средней плоскости. По умолчанию узлы на пластине лежат в ее средней плоскости. Команда вызывает соответствующий диалог.

В списке Плоскость привязки выберите требуемое положение сечения относительно ее срединной плоскости. Если выбрано Задана пользователем, то смещение точки привязки относительно срединной плоскости можно задать вручную в полях Смещение по ЛСК.


Отметим, что появление дополнительных силовых факторов в виде моментов, получающихся за счет смещения точки привязки пластины будет учтено при проведении статического и других видов расчета.

Ускоренный выбор: 

### **Пластина без жесткости**


Команда позволяет установить/снять атрибут жесткости у пластины. Пластины без жесткости только передают нагрузки и не добавляют свою жесткость в систему. Пластины без жесткости не разбиваются и узлы пластин без жесткости должны приходиться или на узлы пластин с жесткостью, или на узлы стержней, или на опоры.

Команда применяется к выделенным пластинам и после ее вызова на экране появляется диалоговое окно. Чтобы сделать пластины без жесткости включите опцию Без жесткости в диалоговом окне. Чтобы вернуть пластине жесткость выключите опцию Без жесткости.

Ускоренный выбор: 

### **Инвертировать ЛСК пластин**

Команда изменяет направление нормали (ось Z) системы координат выделенных пластин на противоположное.

Ускоренный выбор: 

### **Ориентировать ЛСК пластин**

Команда применяется или ко всем пластинам, если никакие пластины не выделены, или только к выделенным пластинам. Она вызывает диалоговое окно для изменения ориентации системы координат пластин. Необходимость изменить ориентацию системы координат пластин может возникнуть для создания единой

ориентации систем координат группы пластин, просмотра значений нагрузок, получения информации о составляющих напряжениях и т.д.


В левой части диалогового окна необходимо выбрать ось, направление которой вы хотите сориентировать.

В средней части диалогового окна задается направление выбранной оси по координатам точки (точку можно также указать с помощью мыши, используя кнопку Указать). При этом система координат каждой пластины будет направлена в направлении указанной точки. Т.к. оси X и Y всегда расположены в плоскости пластины, то при определении направления оси Z будет учитываться лишь с какой стороны пластины расположена указанная точка, а для определения направления осей X и Y – проекция точки на плоскость.

Второй способ задания – по направлению глобальной системы координат. При этом выбранная ось систем координат пластин будет сонаправлена выбранной оси глобальной системы координат. С помощью кнопки Указать можно последовательно выбрать два узла конструкции, в направлении прямой их соединяющей будет ориентирована выбранная ось ЛСК пластины.

Замечание:

- Оси вновь сориентированной системы координат остаются ортогональными.
- Оси X и Y всегда расположены в плоскости пластины.
- Вновь сориентированная система координат может быть только правой.


Ускоренный выбор: 

### **ЛСК пластин по умолчанию**

Команда возвращает исходную ориентацию ЛСК, которая была при создании пластин. Это может потребоваться при разбиении большой пластины на более мелкие. Разбиения пластины происходит всегда в исходной ориентации ЛСК пластины, которая создавалась при создании пластины.

### **Площадь выделенных элементов**

Команда позволяет узнать площадь выделенных пластинчатых элементов.

Ускоренный выбор: 

### **Тип оболочечных элементов**

Команда позволяет устанавливать и менять тип пластин (DKT или MITC) и учитывать крутильную жесткость (Жесткость по Каноку, Фиктивная жесткость или Жесткость по Аллману).


DKT (Discrete Kirchhoff Theory) – ТОНКИЙ пластинчатый элемент DKT, который описывается теорией, основанной на гипотезе Кирхгофа: поперечное сечение элемента остается плоским в деформированном состоянии, а толщина не менее чем в десять раз меньше его максимального линейного размера. Но при работе с таким элементом учитываются не все внутренние силы, а только действующие в плоскости пластины (по осям X и Y). То же самое касается и моментов, вызывающих изгиб пластины. Таким образом, на использование пластинчатого элемента DKT налагается ограничение, связанное с неполным учетом внутренних силовых факторов в направлении, перпендикулярном плоскости пластины. Используется по умолчанию в APM Structure3D.

MITC (Mixed Interpolation of Tensorial Components) – ТОЛСТЫЙ пластинчатый элемент. толщина которого составляет не менее 1/5 их максимального линейного размера. Для этих конечных элементов в полной мере учитываются не только сдвиговые усилия, но и внутренняя сила в поперечном направлении. В том случае, когда недостаточно даже толщины пластины MITC, при моделировании можно использовать объемные конечные элементы.

Способ учета крутильной жесткости по Аллману следует выбирать тогда, когда в одном или нескольких узлах необходимо учесть передачу действующего в плоскости пластины крутящего момента к стержневому элементу, расположенному перпендикулярно этой пластине. Во всех остальных случаях нужно использовать принятую по умолчанию фиктивную жесткость.


### **Информация об объемном элементе**

Команда включает режим, позволяющий просмотреть информацию об объёмном элементе. Для этого необходимо выбрать элемент в виде, после чего появится диалоговое. Список Объёмные элементы слева содержит все объёмные элементы конструкции и позволяет выбирать их для просмотра. В этом списке показывается тип объемного элемента (4-узловой, 8-узловой и т.п.), слой, которому выбраный объемный элемент принадлежит и какой материал ему присвоен. Возможно также изменить имя объемного элемента, которое присваивается по умолчанию. Для этого дважды щелкните на имени в списке и введите имя в появившемся диалоговом окне.

Ускоренный выбор: 

### **Объем выделенных элементов**


Команда позволяет узнать объём выделенных твердотельных элементов.

Ускоренный выбор: 

### **Ориентировать ЛСК объемных элементов**

Команда ориентирует СК всех объемных элементов (если никакие объемные элементы не выделены) и выделенных (если какие-либо объемные элементы предварительно были выделены). Даная команда может быть использована расчёта конструкции из ортотропного/анизотропного материал, или если нужен вывод напряжений в определенном направлении.

После активации команды укажите узел начала координат ЛСК. Второй указанный узел задает направление оси X, третий указанный узел направление оси Y. Направление оси Z ЛСК объемных элементов достраивается автоматически до правой тройки векторов.

Ускоренный выбор: 

### **Информация о контактных элементах**

Команда включает режим, позволяющий просмотреть информацию и изменить свойства контактных зон и элементов. Для этого необходимо щёлкнуть левой кнопкой мыши на контактном/целевом элементе в виде, после чего на экране появится соответствующее диалоговое окно.

В левой верхней части диалога находится список существующих контактных зон в модели.

В правой верхней части диалога находится информация о контактных и целевых элементах в текущей зоне, а также кнопки инвертирования системы координат.

Для корректной работы алгоритма расчёта контактного взаимодействия необходимо чтобы ось Z локальной системы координат контактных элементов была направлена в сторону целевых элементов, а ось Z локальной системы координат целевых элементов была направлена в сторону контактных элементов. Предпочтительнее располагать контактные элементы на более массивной, менее подвижной детали с более грубой сеткой.

Кнопка Поменять местами меняет местами контактные и целевые элементы.

С помощью кнопки Удалить можно удалить выбранную зону из Списка контактных зон.

В нижней части диалога выводятся параметры текущей контактной зоны, которые можно изменить, нажав на кнопку Применить и Задать для всех зон.

Нажатие кнопки Ок позволяет принять изменения параметров выбранной контактной зоны и закрыть диалоговое окно «Информация о контактных элементах».

Тип контакта – может задаваться как:

- жесткий – не допускает проникновение одной детали в другую, если между деталями был зазор, то контакт начинает работать только после выработке этого зазора. Для него задаются и нормальная и тангенциальная жесткости;
- скользящий – допускает возможность перемещения одной детали по другой в зоне контакта. Задается только нормальная жесткость;
- склейка – запрещает относительное смещение контактирующих поверхностей;
- балочный – создает фиктивные стержневые элементы между узлами контактирующих поверхностей.

Жесткости


Нормальная жёсткость и Тангенциальная жёсткость – жёсткостные характеристики фиктивных элементов, связывающих контактирующие детали. Предпочтительно выбирать жёсткость близкую по величине к жёсткости поверхностного слоя контактирующих деталей, если в начальном состоянии зазор между деталями отсутствует и на порядки меньше при наличии зазора.

Опция Автоопределение и кнопка «Старт» – позволяют автоматически задать начальное значение жесткостей контакта, которое вычисляется из свойств материалов в зоне контакта.

Радиус – параметр для определения начальной зоны контакта. Если расстояние между контактным и узлом целевого элемента из одной зоны меньше данного параметра, то предполагается что на начальном этапе эта пара элементов участвует в контакте.

Максимально возможное проникновение – параметр точности, указывающий максимально допустимое проникновение одной детали в другую.

Коэффициент трения – параметр, определяющий коэффициент трения между контактирующими поверхностями для скользящего контакта.

Ускоренный выбор: 

## **Информация о грунтах**

Команда вызывает диалоговое окно Список грунтов для создания, редактирования и удаления грунтов. Диалоговое окно содержит список грунтов данного документа (слева), схематичное изображение выбранного грунта (справа) и кнопки для работы с выбранным грунтом и диалоговым окном (по центру).

Кнопка Редактировать вызывает для выбранного диалоговое окно Слои грунта, в котором вы можете изменить структуру грунта.

Кнопка Новый вызывает окно ввода названия создаваемого грунта. Далее пользователь использует диалоговое окно Слои грунта для задания структуры нового грунта. После создания новый грунт будет доступен для выбора в диалоговых окнах фундаментов.

Кнопка Удалить предназначена для удаления выбранного грунта. Грунт нельзя удалить до тех пока он используется в расчете какого-либо основания данного документа.


В левой части диалогового окна представлен последовательный список слоев грунта. Пользователь может задать структуру грунта на основании данных инженерно-геодезических изысканий. Для задания слоя необходимо, прежде всего, выбрать его тип из выпадающего списка. Возможно использование как predefined типа: песок крупный, песок средней крупности, песок мелкий, песок пылеватый или глина ( $I_L = 0,2; 0,3; 0,4; 0,6$ ) с известными физическими характеристиками, так и задание пользовательских слоев с вводом значений всех параметров: толщина, плотность, угол внутреннего трения, удельное сцепление, коэффициент поперечной деформации, модуль деформации.

После выбора типа возможна корректировка всех полей заданного слоя: имя, цвет, толщина, физические свойства. Для этого необходимо дважды кликнуть в поле для его редактирования. Проконтролировать заданную структуру грунта можно по схеме, расположенной в правой части диалогового окна.

Скальное основание обладает значительной прочностью на сжатие и в расчетах принимается недеформируемым. Если нижний слой грунта является скальным основанием, то толщина продавливания грунта и размеры фундамента ограничиваются глубиной залегания скального основания.

Расчет деформаций основания выполняется при среднем давлении под подошвой фундамента, не превышающем расчетное сопротивление грунта  $R$  (п. 5.5.8 СП 50-101-

2004), применяя расчетную схему в виде линейно деформируемого полупространства (п. 5.5.31 СП 50-101-2004).

Ускоренный выбор: 

### **Материалы**

Команда позволяет работать со списком материалов для данной конструкции и назначать элементам различные материалы. После вызова команды на экране появляется соответствующее диалоговое окно.

В данном диалоге представляется список материалов, которые, обычно, непосредственно используются в модели или предполагаются к использованию.

Добавить – позволяет добавить новый материал в список диалога. После нажатия на кнопку появляется диалоговое окно, в котором предлагается выбрать базовый тип материала (общий, бетон, кладка) с характерными предопределенными свойствами.

Изменить – позволяет редактировать свойства уже созданного материала. После нажатия на кнопку появляется диалоговое окно.

Цвет – выбор цвета текущего материала.

Удалить – удаление выбранного в списке материала. Если удаляемый материал уже используется в модели, то система выдаст дополнительное предупреждение.

Задать всем – присвоение текущего материала всем элементам модели.

Задать выделенным – присвоение текущего материала только выделенным элементам.

После выбора базового типа материала в появившемся диалоговом окне можно задать название материала и определить набор характерных для него свойств, которые, в свою очередь, разнесены по признакам в разные группы.

Группы свойств материала:

- Общий,
- Изотропный материал,
- Анизотропный материал,
- Физ. нелин. (т. течения изо.),
- Физ. нелин. (т. течения Д. – П.)
- SMA,
- Термический материал.
- Течение,
- Удельная электрическая проводимость,

- Относительная диэлектрическая проницаемость,
- Относительная магнитная проницаемость,
- Слоистый композит,
- Демпфирование,
- Усталость,
- Свойство для ЛУ Мех. Разр.

Например, такие общие механические свойства материала, как пределы текучести и прочности представлены в группе Общий; физические свойства материала, такие как модуль упругости, коэффициент Пуассона т.д., представлены в группе Изотропный материал. Подробнее группы свойств материала описаны в главе 5

<< – позволяет добавлять группу свойств из листа доступных в лист текущих свойств.

>> – позволяет убрать группу свойств из листа текущих свойств в лист доступных.

Изменить – позволяет редактировать свойства в группах текущих свойств материала.

БД... – позволяет выбрать свойства материала из базы данных.

При нажатии на выпадающее меню в диалоге Материал появляется возможность задать зависимость соответствующей физической характеристики материала от температуры. Зависимость может быть задана в виде графика, таблицы, функции.

При выборе зависимости в виде графика откроется редактор функций, в котором задается график функции соответствующей зависимости.

При выборе зависимости в виде таблице откроется диалоговое окно, в котором есть возможность загрузить существующую таблицу, или создать новую с выбранным количеством строк.

При выборе зависимости в виде функции будет открыт редактор выражений, в котором задается аналитическая функция.

Подробнее редактор графиков, таблиц, и выражений описаны в главе 13.

Ускоренный выбор: 

### **Информация о модели | Масса и моменты инерции выделенных элементов**

Команда вызывает диалоговое окно с информацией о массе, координатах центра тяжести и моментах инерции относительно глобальных осей координат выделенных элементов.



### **Информация о модели | Масса и моменты инерции модели**

Команда вызывает диалоговое окно с информацией о массе, координатах центра тяжести и моментах инерции относительно глобальных осей координат всей модели.


### **Информация о модели | Габаритные размеры модели**

Команда вызывает диалоговое окно с информацией о габаритных размерах модели и максимальных отклонениях по координатным осям.

Ускоренный выбор: 

### **Информация о модели | Общие сведения о модели**

Команда вызывает диалоговое окно с информацией о модели. В окне выводится информация о количестве узлов, элементов и т.п.

Ускоренный выбор: 

### **Информация о модели | Требования к оперативной памяти**

Команда вызывает диалоговое окно с расширенной информацией о модели, характеризующей аппаратные требования для проведения расчета. Для отображения информации для текущей модели необходимо нажать кнопку «Рассчитать».


## **Меню Проектирование**

### **Типы конструктивных элементов**

Команды этого раздела позволяют выбрать тип конструктивных элементов: стальные, армированные (железобетонные и армокаменные) или деревянные элементы. Подробное описание команд меню проектирования и порядок работы со стальными, армированными и деревянными конструктивными элементами в главе 9.

### **Конструктивные элементы**

Команда выводит окно управления, в котором можно создавать, редактировать свойства, делать активными и удалять конструктивные элементы, а также просматривать результаты расчёта и подбора сечений для стальных и деревянных элементов или подбор армирования для армированных. Интерфейс диалогового окна зависит от выбранного в меню Проектирование типа конструктивного элемента: стальные или армированные элементы.

Ускоренный выбор: 

### **Поместить в конструктивный элемент**

Команда помещает выделенные объекты в ОДИН конструктивный элемент. В случае если создать конструктивный элемент невозможно выводится предупреждение.

Причины, по которым элементы не могут входить в конструктивный элемент, отмечены флагом.

Ускоренный выбор: 

#### **Поместить в отдельные конструктивные элементы**

Команда помещает каждый выделенные объекты в отдельные конструктивные элементы. Каждый из выделенных объектов (конечных элементов) будет помещен в отдельный конструктивный элемент.

Ускоренный выбор: 

#### **Поместить в армокаменный конструктивный элемент**

Команда помещает выделенные объекты в армокаменный конструктивный элемент. В случае если создать конструктивный элемент невозможно выводится предупреждение. Причины, по которым элементы не могут входить в конструктивный элемент, отмечены флагом.

Ускоренный выбор: 

#### **Поместить в отдельные армокаменные конструктивные элементы**

Команда помещает каждый выделенный объект (конечный элемент) в отдельный армокаменный конструктивный элемент.

Ускоренный выбор: 


#### **Удалить из конструктивного элемента**

Команда удаляет выделенные объекты из конструктивных элементов.

Ускоренный выбор: 

#### **Обновление списка продавливаний**

Команда обновляет список продавливаний конструктивных элементов – железобетонных оболочек.

Ускоренный выбор: 

#### **Узлы металлоконструкций**

Команды этого раздела автоматически создают параметрические чертежи узлов металлоконструкции модуле APM Graph.

### **Меню Расчеты**

Команды этого раздела позволяют производить расчет и задавать его параметры.

## **Расчет**

Команда выполняет расчет конструкции. После вызова команды на экране появляется диалоговое окно Расчет, запрашивающее тип производимого расчета и их параметры.

В правой части диалога Расчет находится кнопка, раскрывающая дерево параметров выбранных типов расчетов. Подробнее параметры расчетов описаны в главе 2, а также в главах, посвященных отдельным типам расчетов.

Подробно о расчетах смотрите в главе 7.

Статический расчет выполняется для выбранных имеющихся загружений и комбинации загружений, список которых приведен в поле для загрузки.

Если развернуть выпадающий список для загрузки, то есть возможность с помощью птичек выбрать те загрузки и комбинации загружений, для которых будет производиться статический расчет. Щелчок ПКМ на одном из загружений позволяет снять/установить птички на всех загрузениях.

Расчёты устойчивости, нелинейный, стационарной и нестационарной теплопроводности, вынужденных колебаний, собственных частот с предварительным нагружением выполняются только для выбранного загружения.

Причем, если для проведения расчета на устойчивость, например, требуются результаты статического расчета, то будут доступны только те загрузки, для которых был проведен статический расчет.

Расчёт контактного взаимодействия выполняется при проведении нелинейного расчёта.

При выборе одного (или нескольких одновременно) пункта расчета открывается дополнительные параметры выбранного вида расчета. При проведении одновременно с расчетом стационарной или нестационарной теплопроводности статического расчета для учета в конструкции термонапряжений, необходимо при задании параметров статического расчета установить птички «Учитывать поле температур (из стационарной или нестационарной теплопроводностей)».

## **Расчет электромагнитных полей**

Команда вызывает диалоговое окно расчетов электромагнитных полей, работа которого аналогично диалогу Расчет.

Расчет электромагнитных полей описан в главе 7

### **Расчет подконструкций**

Команда выполняет статический расчет модели по подконструкциям (ПК). Данный инструмент предназначен для разделения расчетной модели на подконструкции (ПК) для выполнения статического расчета модели большей размерности. Время выполнения расчета для всех подконструкций немного больше, по сравнению с временем расчета модели целиком с учетом затрат времени на подготовку расчета ПК.

### **Усталостный расчет для случайных нагрузений**

Команда запускает усталостный расчет для предварительно заданных случайных нагрузений.

### **Проверка несущей способности**

Команда выполняет проверку несущей способности конструктивных элементов. Требуется предварительное проведение статического расчёта, т.к. использует значения напряжений и нагрузок. Все параметры расчёта и свойства конструктивных элементов можно задать в Результаты | Конструктивные элементы. Смотрите также главу 9.

### **Подбор армирования констр. элементов**

Команда запускает подбор армирования для всех армируемых (железобетонных и армокаменных) конструктивных элементов. Для подбора армирования необходимо провести статический расчет и расчет нагрузок в соответствии с расчетными комбинациями нагрузений. Параметры для подбора армирования вводятся в окне «Конструктивные элементы».

### **Проверка армирования констр. элементов**

Команда запускает проверку армирования для всех армируемых (железобетонных и армокаменных) конструктивных элементов. Для проверки армирования необходимо провести статический расчет и расчет нагрузок в соответствии с расчетными комбинациями нагрузений. Параметры армирования для проверки вводятся в окне «Конструктивные элементы».

### **Расчетные комбинации нагрузений**

Команда вызывает диалог Расчетные комбинации нагрузений, в котором можно задать таблицу нагрузений для вычисления Расчетных Сочетаний Усилий (PCU).

Подробнее процесс вычисления PCU описан в главе 9

### **Расчет соединений**

Команды данного раздела передают из APM Structure3D исходные данные для расчета соединений в APM Joint.

Выделите стержни с узлом для расчета соединения. Стержни должны иметь общий узел. Далее нажмите кнопку интересующего типа соединения.

В появившемся диалоговом окне выберете загрузку, из которой система автоматически заимствует силовые факторы в узлах. APM Structure3D передаст геометрический контур соединения в соответствии с выбранным сечением и нагрузки в APM Joint. Каждый стержень и приложенная к нему узловая нагрузка (сила и момент) передается в APM Joint в отдельный слой.

Дальнейшие действия по расчету соединений, переданных из APM Structure3D, подробно изложены в документации к APM Joint.

#### **Топологическая оптимизация**

Команда вызывает диалог Топологическая оптимизация.

Подробнее о топологическая оптимизация описана в главе 11

#### **Параметрическая оптимизация**

Команда вызывает диалог Параметрическая оптимизация.

#### **Параметры усталостного расчета**

Команда вызывает диалог Параметры усталостного расчета.

Настройки для простейшего расчёта нужны для того, чтобы задать коэффициенты, определяющие величины максимальных и минимальных напряжений, используемые в дальнейшем только для отображения карт по результатам статического расчёта при выборе типа результатов «Усталость».

Настройки, задаваемые на вкладке «Материалы», используются для вычисления усталости для всех трёх режимов, и для статики, и для стохастики по статике, и по вынужденным колебаниям, см. подписи к кнопкам «1», «2» и «3».

На вкладке «Материалы» есть возможность увидеть итоговое значение коэффициента, снижающего предел выносливости.

#### **Панель параметров расчета**

Команда показывает или скрывает панель параметров расчета, описанную в главе 2

### **Меню Результаты**

Команды этого меню позволяют Вам просмотреть результаты расчета.

#### **Выбор модели для вывода результатов**

Команда будет активна только в случае выполнения расчета подконструкций.

Команда вызывает окно, позволяющее выбрать одну из подконструкций или всю модель для просмотра результатов.

### Нагрузки

Команда вызывает окно, позволяющее просмотреть ряд расчетных параметров стержней и пластин: узловые нагрузки, перемещения, силовые факторы в стержнях, массу конструкции. См. главу 10.

Ускоренный выбор: 

### Карта результатов

Команда вызывает окно, для выбора результатов расчета и дальнейшего их просмотра. Кроме того, позволяет устанавливать различные опции представления результатов.

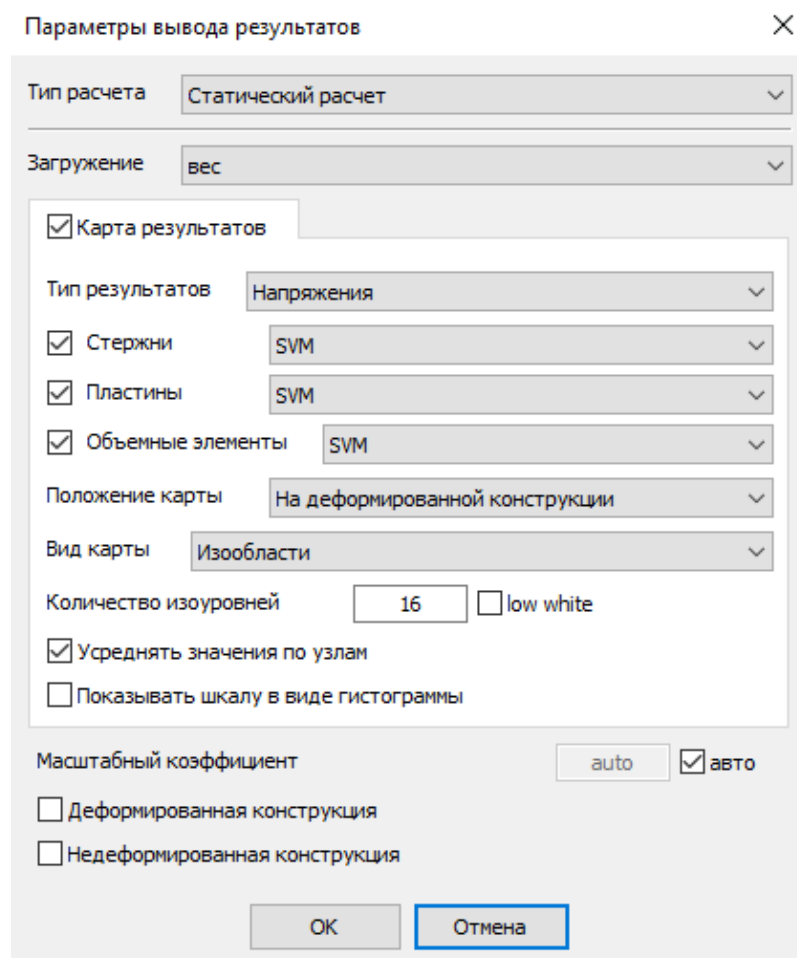


Рисунок 3.7 – Диалог Параметры вывода результатов

В группе Тип расчета выбираются доступные результаты из проведенных типов расчета.

В группе Загружение выбирается одно из тех загрузений, для которых был проведен соответствующий расчет.

Птичка в опции Карта результатов говорит о том, что будет выводиться карта результатов.

В группе Тип результатов могут быть выбраны Напряжения, Нагрузки, Перемещения, Коэф. Запаса, Главные напряжения, Усталость, Деформации, Главные напряжения в векторной форме.

Для того, чтобы показывать карту выбранного типа результатов для Стержни, Пластины, Объёмные элементы показываются при наличии птичек напротив соответствующего типа элементов. При отсутствии в модели каких-то типов элементов, эти элементы в окне Параметры вывода результатов – отсутствуют.

Для каждого из типов конечных элементов выбираются параметры вывода.

Ниже приводится описание некоторых параметров

- UX – перемещение по оси X глобальной системы координат
- ROTX – угол поворота вокруг оси X глобальной системы координат
- USUM – суммарное линейное перемещение
- ROTSUM – суммарный угол поворота
- 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
- SMAXTAU – эквивалентное напряжение по теории максимальных касательных напряжений
- SMOHR – эквивалентное напряжение по теории Мора

Аналогичные компоненты напряжений с индексом 0 (SX0, SXY0, SVM0 и т.д.) — это соответствующие компоненты напряжений для срединной поверхности пластины, т.е. поверхности, эквидистантной по отношению к внешним.

Нормальные и касательные напряжения могут быть как положительными, так и отрицательными – в отличие от всегда положительных эквивалентных напряжений, рассчитанных по теориям Мизеса и Мора, а также теории максимальных касательных напряжений. Напомним, что положительными считаются растягивающие напряжения, а отрицательными – сжимающие.

В выпадающем списке Вид карты может быть выбрана карта в виде Изообластей с усреднением или без усреднения значения в узлах, или в виде Максимального значения в элементе.

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


Поле масштабный коэффициент позволяет задавать коэффициент масштабирования перемещений для отрисовки деформированной конструкции.

После нажатия кнопки ОК на экране отображается окно с цветовой картой выбранного параметра результатов. Численные значения параметра в конкретной точке конструкции отображаются в окне статуса в режиме Комбинированное выделение прямоугольником, если поместить курсор в интересующую точку карты результатов при нажатой левой кнопке мыши.

При нажатии кнопки Выноска на панели инструментов Карта результатов пользователь может в интересующей части карты результатов проставить выноску, на которой будет изображаться значение параметра, по которому построена карта результатов. Щелчком правой кнопкой мыши на выноске – она может быть удалена. В файл результатов выноски не сохраняются.

### **Напряжения в сечении**

Команда включает режим, позволяющий просматривать карту распределения напряжений в произвольном сечении стержня. После открытия карты напряжений, для активизации команды нажмите кнопку Напряжения в сечении на инструментальной панели Карта результатов. Затем, для выбора стержня для просмотра напряжений в сечении щелкните в виде в области стержня, чтобы вызывать окно Напряжения в сечении. Команда доступна только в окне Карта Результаты и только при просмотре карты напряжений. Причем, в окне Напряжения в сечении будут показаны те напряжения, которые назначены для стержней к просмотру на карте Напряжений.

Ускоренный выбор: 

### **Силовые факторы в элементе**

Команда вызывает диалоговое окно для выбора силового фактора в стержнях, эпюру которого нужно построить.

В выпадающих списках Тип расчета и Загружение выбирается один из проведенных типов расчета и выбирается загружение, результаты расчёта которого будут использоваться для построения эпюр.



Группа кнопок Компоненты сил задает силовой фактор для построения эпюры. Нажмите кнопку ОК для отображения окна с эпюрой. Опция Показывать значения на графике устанавливает нужно ли выводить значения силового фактора на графике.

Выпадающий список в нижней части диалога позволяет выбрать метод построения положительных значений эпюр изгибающих моментов: На растянутом волокне или На сжатом волокне.

Силовые факторы в элементе отображаются в виде карты результатов. На карте результатов возможна простановка выносок с помощью команды Выноска панели инструментов Карта результатов.

### **Реакции в опорах**

Команда выводит окно с реакциями в опорах в виде таблицы. Выбранный в таблице узел или группа узлов выделяется цветом в окнах редактора конструкций.

### **Срез композита**

С помощью данной команды возможно посмотреть напряжения и деформации в поперечном сечении выбранной композитной пластины. Предварительно необходимо открыть любую карту результатов и после этого в меню Результаты выбираем Срез композита и затем следует выбрать пластину щелчком ЛКМ для просмотра результатов в ее сечении. После этого откроется диалоговое окно Сечение композита.

В окне Список пластин выбранная нами пластина выделена, но можно выбрать любую другую пластины для просмотра напряжения и деформации в ее сечении.

Из выпадающего списка Параметр отображения выбирается, что именно для данной пластины, Напряжения или Деформации мы хотим посмотреть.

Выбранный параметр можно посмотреть по Расчетному направлению: По ЛСК пластины или в Направлении укладки.

Далее после выбора Узла пластины (из выпадающего списка) нажимаем кнопку Показать графики.

### **Коэффициент концентрации напряжений**

Позволяет найти условное значение коэффициента концентрации напряжений в областях резких изменений формы упругого тела, а также в зонах контакта деталей, и оценить их прочность при заданных условиях нагружения.

Поддерживаются следующие типы КЭ:

- 4-х узловой тетраэдр;
- 5-ти узловая пирамида;
- 6-ти узловая призма;

- 8-ми узловой гексаэдр.

Более подробно процесс расчета коэффициента концентрации напряжений описан в главе 10

### **Таблица расхода**

Команда выводит сводную таблицу расхода профилей стержневых элементов модели.

### **Результаты РСУ**

Команда выводит таблицу результатов расчета РСУ.

### **Устойчивость**

Команда выводит окно с коэффициентами запаса устойчивости получающимся в результате расчета на устойчивость и деформационного расчета.

Для просмотра форм потери устойчивости выберете строчку в таблице и нажмите кнопку Форма.

### **Собственные частоты**

Команда выводит окно с частотами собственных колебаний конструкции и суммами модальных масс по направлениям глобальной системы координат. Нажмите кнопку форма для просмотра формы колебаний для выбранной частоты.

В сейсмических нормах многих стран (Еврокод 8, UBC-97, сейсмические нормы Украины и др.) принято, что сумма модальных масс по каждому из направлений сейсмического воздействия должна быть не менее установленной границы. Обычно для горизонтальной составляющей сейсмического воздействия принимается 85-90%, для вертикальной – 70-90%.

### **Анимация**

Команда позволяет выводить в виде анимации результаты расчета статики (напряжения, перемещения и т.д.), устойчивости и частот собственных колебаний.

Период анимации и время задается в диалоговом окне. Старт анимации осуществляется одноименной кнопкой диалогового окна.

Ускоренный выбор: 

### **Вынужденные колебания**

Команда вызывает на экран окно с картой напряжений конструкции по результатам динамического расчета. Карты напряжений показываются для каждого рассчитанного момента времени и последовательно сменяют друг друга.

### **Параметры вывода анимации вынужденных колебаний**

Команда вызывает диалоговое окно параметров карты результатов (напряжений, перемещений и т.п.) вынужденных колебаний.

### **График перемещения**

Команда позволяет выбрать произвольный узел конструкции и посмотреть для него зависимость перемещений по глобальным осям от времени.

### **График напряжений**

Команда позволяет посмотреть график изменения максимального эквивалентного напряжения в произвольном сечении стержня конструкции от времени.

### **Долговечность при случайном усталостном нагружении**

Команда выводит результаты расчета на долговечность.

### **Результаты теплового анализа**

Команда вызывает диалоговое окно карты результатов теплового анализа.

### **Параметры карты результатов теплового анализа**

Команда вызывает диалоговое окно параметров карты результатов теплового анализа.

### **Карта армирования**

Команда вызывает окно, для просмотра результатов армирования железобетонных элементов. Кроме того, позволяет устанавливать различные опции представления карт армирования.

### **Параметры вывода армирования**

Команда вызывает окно настроек вывода карт армирования.

### **Диапазон результатов**

Команда позволяет задать диапазон вывода результатов при отрисовке цветовой карты. Команда вызывает соответствующее диалоговое окно.

### **Параметры вывода результатов**

Команда вызывает окно настроек вывода карт результатов.

## **Меню Окно**

Команды этого раздела позволяют размещать окна на экране различными способами.

### **Каскад**

Команда размещает все окна на экране в виде каскада.

### **Расположить все**

Команда размещает все окна на экране в виде черепицы.

### **Расположить иконки**

Команда упорядочивает окна, уменьшенные до размера иконы, на экране.

## **Меню Справка**

### **Содержание**

Показывает окно с содержанием справочной системы по программе APM Structure3D.

### **Сайт компании НТЦ АПМ**

Команда отправляет в текущем браузере на сайт НТЦ «АПМ» по адресу <http://apm.ru/>

### **Примеры проектов НТЦ АПМ**

Команда отправляет в текущем браузере на сайт проектов НТЦ «АПМ» по адресу <http://cae.apm.ru/> , где представлена галерея выполненных проектов.

### **Видеоуроки**

Команда отправляет в текущем браузере на канал youtube компании НТЦ «АПМ», где представлены примеры различных расчетных задач, выполненных, в том числе, и в APM Structure3D.

### **Центр поддержки пользователей**

Команда отправляет в текущем браузере по адресу <http://helpdesk.apm.ru/> – центр обращений и поддержки зарегистрированных пользователей для получения оперативной техподдержки и учета пожеланий по доработке программных продуктов компании НТЦ «АПМ».

### **О модуле**

Команда вызывает диалоговое окно, содержащее информацию о модуле.

В окне содержится информация о ключе защиты, приобретенном продукте и опциях, входящих в этот продукт.

Также в окне содержится информация о версии операционной системы и архитектуре процессора.

## Глава 4. Динамические и случайные загрузки

### Динамические загрузки

В системе реализована возможность автоматической генерации сейсмического воздействия в соответствии со СНиП II-7-81\* от 2000 г., СП 14.13330.2014 и динамического ветрового нагружения в соответствии СНиП 2.01.07-85\* и СП 20.13330.2011.

Для расчета на динамические воздействия необходимо создать динамическое нагружение. Работа с динамическими нагружениями аналогична статическим нагружениям, описанным выше. Рекомендуется каждое вид нагрузки располагать в отдельном нагружении с последующим созданием комбинации нагружений или расчетного сочетания усилий.

Замечание. Пульсационная ветровая нагрузка является динамической составляющей статической ветровой нагрузки. Для выполнения расчета от одновременного действия статического и динамического ветрового нагружения необходимо в отдельном нагружении приложить статическую ветровую нагрузку, а потом задать динамическую составляющую ветровой нагрузки в другом нагружении и выполнить расчет от действия комбинации нагружений.

Для создания нового или редактирования старого нагружения используется команда Нагрузки | Динамические загрузки. Эта команда вызывает диалог Динамические загрузки.

Чтобы создать новое нагружение нажмите кнопку Добавить. В появившемся диалоге Новое динамическое нагружение выберите требуемый тип динамического нагружения и нажмите Ок.

Чтобы изменить старое нагружение щелкните на нем в списке и нажмите кнопку Изменить.

Чтобы удалить нагружение выделите его в списке и нажмите кнопку Удалить.

Параметры сейсмического воздействия задаются в диалоге сразу после его выбора в окне Новое динамическое нагружение. Сейсмическое воздействие может задаваться или в соответствии со СНиП (СП) или через задание спектра ответа, задаваемый, как правило, как зависимость величины ускорения от частоты колебаний. Задание сейсмической нагрузки через спектр ответа, как правило, характерно для объектов атомной отрасли.

## Задание сейсмического воздействия по СНиП (СП)

Окно диалога для задания сейсмического воздействия по СНиП II-7-81\* (СП 14.13330.2014) показано ниже.

Сейсмика СНиП II-7-81\* (СП 14.13330.2014) ? X

Название загрузки Сейсмика СП 14.13330.2014

Направление

X: 0

Y: 0

Z: 0

Коэф. СНиП II-7-81\* (СП 14.13330.2014)

K0-ответственности (таб. 3) 1

K1-повреждения (таб. 4) 1

K\_Psi - характеристика конструкции (таб. 5) 1.5

Количество собственных форм 5

Нижняя граница отсечения форм по модальной массе % 0

Категория грунта I категория

Расчетная сейсмичность 7 баллов

A 0.1

Поправочный коэффициент 1

OK

Отмена

Рисунок 4.1 – Диалог Сейсмика при задании по СНиП (СП)

Направление действия сейсмической нагрузки задается значениями косинусов углов по отношению к осям глобальной системы координат в полях Направление.

Поле Количество собственных форм определяет количество собственных форм, которые будут учтены при расчете сейсмического воздействия.

Категория грунта и Расчетная сейсмичность выбираются в соответствии с указаниями СНиП. В полях ввода Коэф. СНиП II-7-81\* (СП 14.13330.2014) задаются коэффициенты  $K_1$  – повреждений и  $K_\psi$  – характеристика конструкции.

Поправочный коэффициент задается для корректировки исходных данных, если имеется необходимость полнее учесть требования СНиП. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил от сейсмического воздействия.

Например, согласно п. 4.32 СНиП II-7-81\* при расчете мостов произведение коэффициентов  $K_1$  и  $A$  следует принимать равным 0.025, 0.05 и 0.1 при расчетной сейсмичности соответственно 7, 8 и 9 баллов. Коэффициент динамичности следует определять независимо от категории грунта по формуле (3) п. 2.6. Поэтому при задании сейсмической нагрузки для мостов при сейсмичности 8 баллов и грунте II – категории при  $K_1 = 1$ , в окне диалога следует установить расчетную сейсмичность – 8 баллов и поправочный коэффициент  $0.05 / 1 = 0.05$ .

Кроме того, согласно примечанию 2 п. 2.5 СНиП II-7-81\* (СП 14.13330.2014) при сейсмичности 8 баллов и более при грунтах III категории вводится дополнительный множитель 0.7 для расчетной сейсмической нагрузки. Поэтому при расчете мостов при грунтах III категории и сейсмичности площадки 8 баллов и выше в окне диалога следует установить II категорию грунта, а поправочный коэффициент умножить на 0.7. Например при задании сейсмической нагрузки для мостов при сейсмичности площадки 8 баллов и грунте III – категории при  $K_1 = 1$ , в окне диалога следует установить расчетную сейсмичность – 8 баллов, установить II категорию грунта и поправочный коэффициент  $0.05/1 \cdot 0.7 = 0.035$ .

При расчете на сейсмическое воздействие учет расчетных нагрузок на конструкцию в весе конструкции осуществляется путем задания сосредоточенных масс в соответствующих узлах.

Параметр Нижняя граница отсечения форм по модальной массе % позволяет учитывать только те формы собственных колебаний, для которых модальная масса будет не менее заданной величины. Это позволяет несколько ускорить расчет.

#### **Задание сейсмического воздействия через спектр ответа**

Окно диалога для задания сейсмического воздействия через спектр ответа показано ниже.

Сейсмика спектр ответа

Название загрузки: Сейсмика Спектр ответа

Тип графика спектра:  
 Ускорение  Скорость  Перемещение

Направление:  
x: 0 y: 0 z: 0

Количество собственных форм: 5

Поправочный коэффициент: 1

Нижняя граница отсечения форм по модальной массе %: 0

Рисунок 4.2 – Диалог Сейсмика при задании через спектр ответа

С помощью переключателя Ускорение, Скорость, Перемещение пользователь имеет возможность выбрать тот параметр, график которого в зависимости от частоты (периода колебаний) будет задан с помощью графика. Кнопка Задать график вызывает окно редактора функций для задания зависимости выбранного параметра от периода колебаний.

Данные графика по точкам могут быть прочитаны редактором функций из файлов форматов: \*.fnd, \*.prn, \*.csv, \*.cst. Перевести данные из одного формата в другой можно с помощью математических пакетов типа MathCAD т.п.

Направление действия сейсмической нагрузки задается значениями тангенсов углов по отношению к осям глобальной системы координат в полях Направление.

Поле Количество собственных форм определяет количество собственных форм, которые будут учтены при расчете сейсмического воздействия.

Поправочный коэффициент задается для корректировки исходных данных. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил от сейсмического воздействия.

Параметр Нижняя граница отсечения форм по модальной массе % позволяет учитывать только те формы собственных колебаний, для которых модальная масса будет не менее заданной величины. Это позволяет несколько уменьшить время расчета.

### Задание пульсационной ветровой нагрузки

Диалог "Пульсации ветра СП 20.13330.2016" с полями для задания параметров:

- Название загрузки: Пульсации ветра СП 20.13330.2016
- Ветровое статическое нагружение: Загрузка 0
- Количество собственных форм: 4
- Координата Z нижней точки сооружения, на которую действует ветер: 0 м
- Ширина сооружения по фронту обдува: 0 м
- Длина сооружения вдоль действия ветра: 0 м
- Высота сооружения: 0 м
- Параметры:
  - Ветровой район, (кПа) (кгс/м<sup>2</sup>): 1a (0,17) (17)
  - Тип местности: А
  - Тип здания: Здание
  - Направление ветра: Вдоль X
  - Логарифмический декремент: 0,3 - Ж/Б и каменные сооружения
- Поправочный коэффициент: 1

Рисунок 4.3 – Диалог Пульсации ветра

Название загрузки – название загрузки в списке динамических нагружений.



Ветровое статическое нагружение – название нагружения, в котором приложена только статическая ветровая нагрузка. Пульсация ветра – пульсация нагружения с одной только статической ветровой нагрузкой.

Количество собственных форм – количество учитываемых собственных форм колебаний конструкции, рекомендуемые значения 4...6.

Координата Z нижней точки сооружения, на которую действует ветер – может отличаться от координаты нижней точки здания при заглублении или при наличии низкой пристройки, не воспринимающей ветровую нагрузку.

Ширина сооружения по фронту обдува – ширина сооружения, перпендикулярная направлению обдува.

Длина сооружения вдоль действия ветра – высота сооружения со стороны обдува.

Параметры СНиП 2.01.07-85 (СП 20.13330.2011) – ветровой район, тип местности, направление ветра, логарифмический декремент колебаний.

Поправочный коэффициент задается для корректировки исходных данных, если имеется необходимость полностью учесть требования СНиП. Этот коэффициент может принимать любое положительное значение, и на него умножаются результаты расчета инерционных сил.

## Случайные нагружения

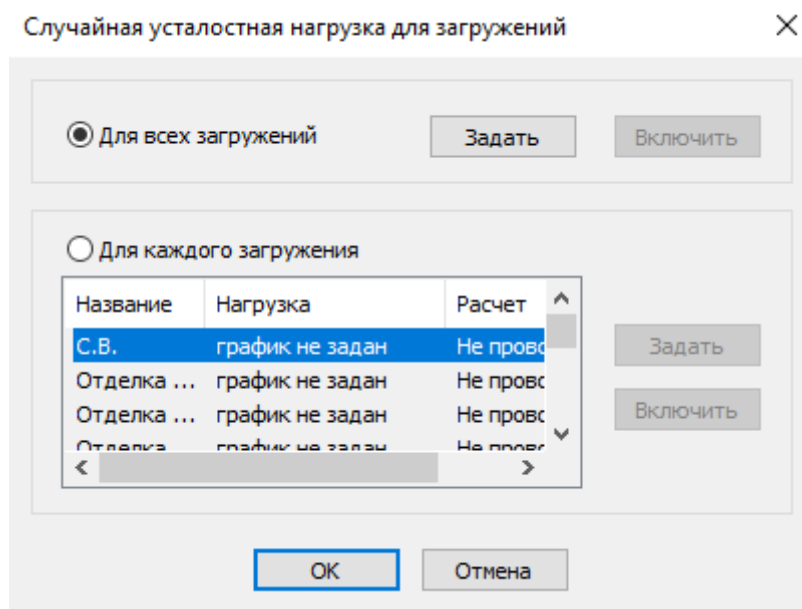


Рисунок 4.4 – Диалог Случайная усталостная нагрузка

Нажатие кнопки Задать или для всех нагружений или для одного из выбранных вызывает открытие окна Усталостная многостадийная случайная нагрузка.

Общие параметры нагрузки

Включить для расчета
  Расчет через вын. колебания

Число повторений многостадийной нагрузки

Общая частота оцифровки для всех стадий, [Гц]

Число точек для межстадийного сглаживания  =  , [с]

№.	Тип стадии	Имя стадии	Статус	Флаг	Число точек	Частота, [Гц]	Дл
<span style="float: left;">&lt;</span> <span style="float: right;">&gt;</span>							

Работа со стадиями усталостной нагрузки

Итоговые параметры многостадийной усталостной нагрузки

Суммарное число точек графика

Суммарное время графика, [с]

Суммарное время заданной нагрузки, [с]

График усталостной нагрузки

Экспорт

▼

Интервалов гистограммы

Рисунок 4.5 – Диалог Усталостная многостадийная случайная нагрузка

Случайная нагрузка состоит из стадий, следующих одна за другой. Рассмотрим создание одной из стадий случайной нагрузки.

Птичка в опции Включить для расчета соответственно включает заданную ранее случайную усталостную нагрузку в расчет. Возможен, когда нагрузка может быть задана, но в расчет не включена.

Кнопка Добавить стадию по спектральной плотности мощности открывает диалоговое окно Настройка стадии усталостной нагрузки для загрузок. В этом окне, при заданных по умолчанию параметрах спектральной плотности мощности и частотных параметрах, нажатием кнопки Вычислить получить временной график моделирования усталостной нагрузки.

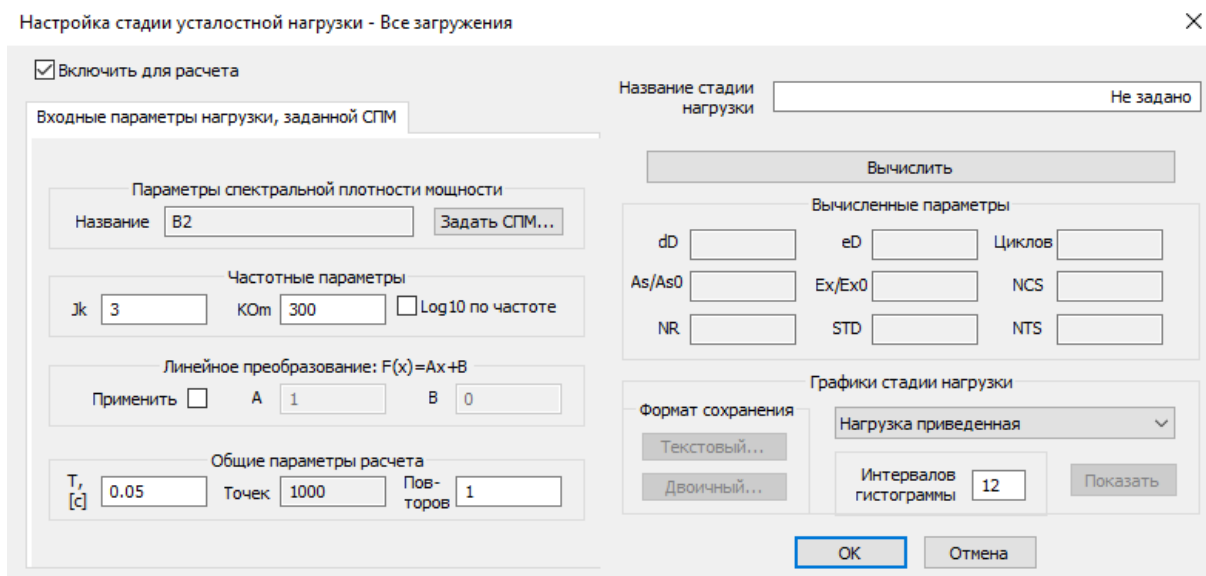


Рисунок 4.6 – Диалог Настройка стадии усталостной нагрузки

Для просмотра этого графика нажатием кнопки Показать вызываем открытие окна показа графиков, в котором построена временная реализации стадии усталостной нагрузки.

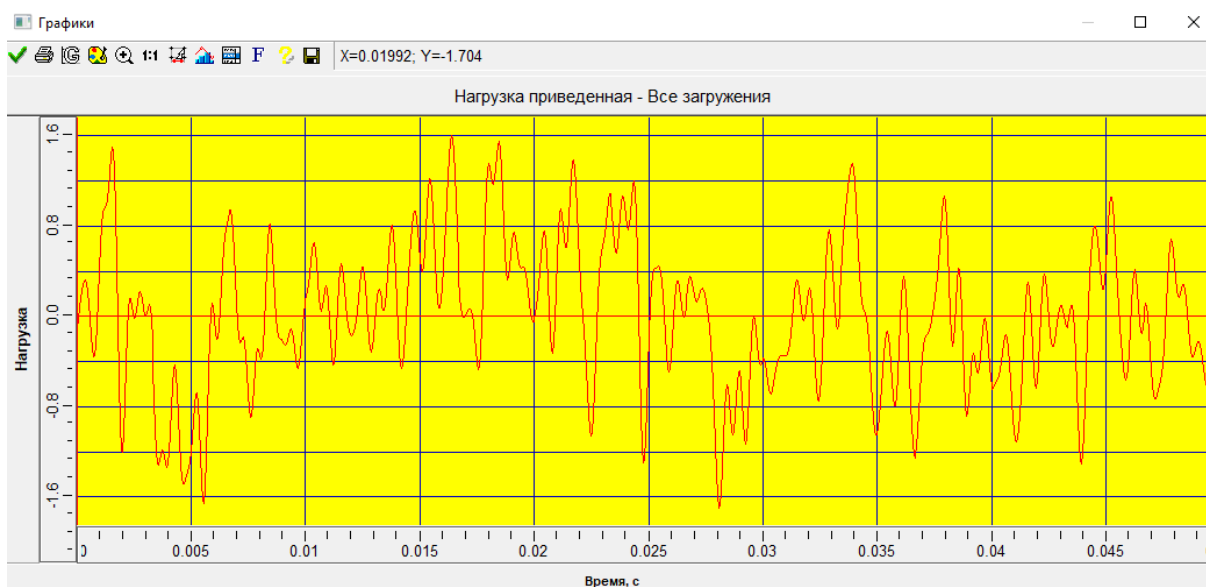


Рисунок 4.7 – Диалог Графики для показа временной реализации стадии усталостной нагрузки

Реализация стадии случайной усталостной нагрузки может быть сохранена в Текстовый или с расширениями \*.rpn или \*.csv, а также в Двоичный файл с расширением \*.pss, а также считан из файлов этих форматов с помощью кнопки Добавить стадию, загружаемую из файла.

## Глава 5. Свойства материалов

### Группа свойств Анизотропный материал

Анизотропный материал может быть задан для пластинчатых и твердотельных конечных элементов. Учет анизотропии материалов выполняется для всех видов расчетов. Подготовку модели для расчета с учетом анизотропных свойств изначально важно продумать таким образом, чтобы ЛСК конечных элементов одной детали конструкции были сонаправлены.

Анизотропный материал

Материал Анизотропный материал

Плотность, [кг/м <sup>3</sup> ]	7800
Кэффициент температурного расширения xx, [1/°C]	1.2e-05
Кэффициент температурного расширения yy, [1/°C]	1.2e-05
Кэффициент температурного расширения zz, [1/°C]	1.2e-05

БД...

ОК Отмена Применить

Рисунок 5.1 – Диалог задания анизотропных свойств материала для решения задачи теплопроводности

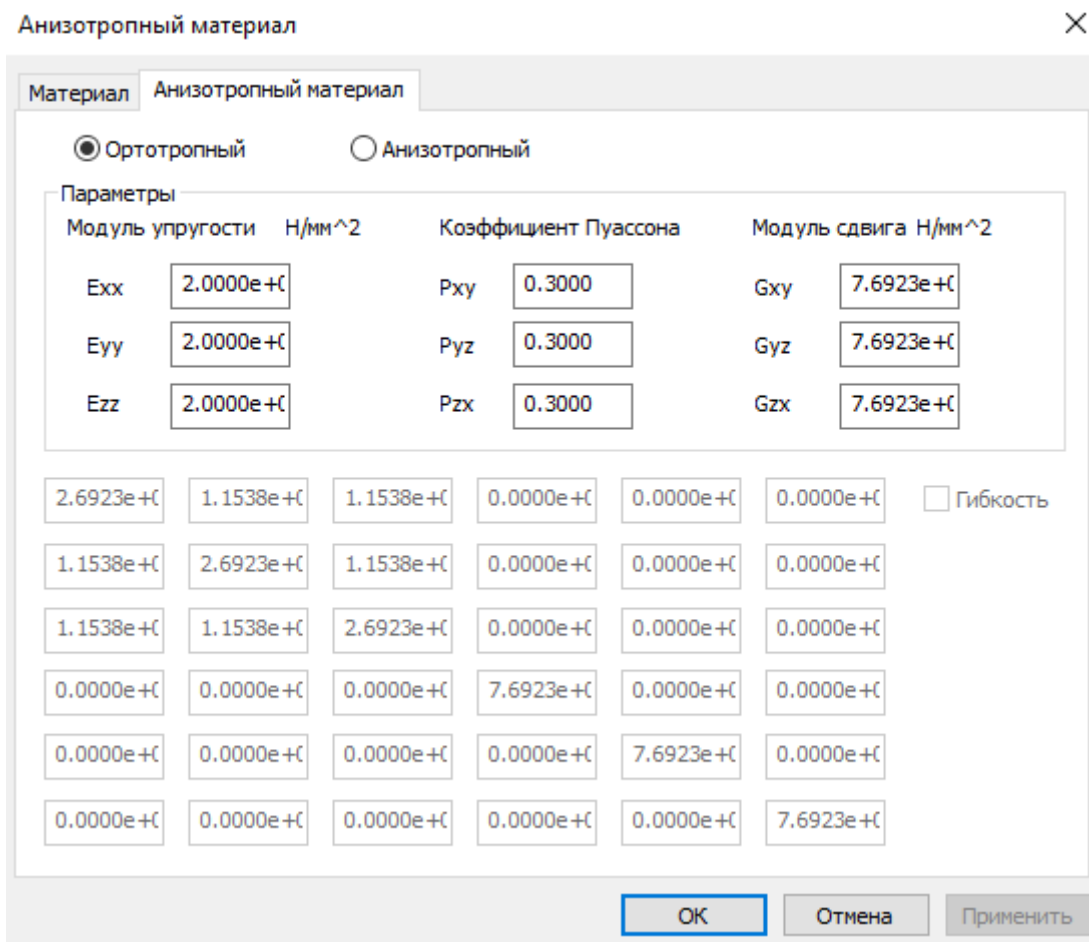


Рисунок 5.2 – Диалог задания механических свойств ортотропного или анизотропного материала

Для ортотропных материалов задаются модули упругости, коэффициенты Пуассона и модули сдвига по направлениям ЛСК КЭ.

Для анизотропных материалов задается матрица упругости в ЛСК КЭ. В качестве альтернативы может быть задана матрица гибкости.

### Группа свойств Физическая нелинейность

Для описания поведения физически нелинейных материалов используется группа свойств Физическая нелинейность (теория течения изо.), в которой необходимо задать зависимость поведения материала  $\sigma - \epsilon$  (Напряжение – относительная деформация) в области выше упругой зоны. Для задания графика при температуре 20 °C следует нажать кнопку Редактировать.

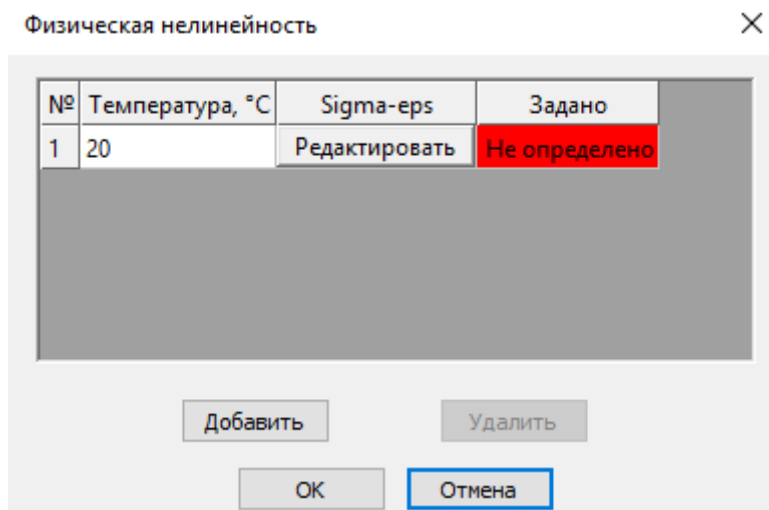


Рисунок 5.3 – Диалог Физическая нелинейность

Добавить – кнопка добавляет задание еще одной строки графика при другой температуре, для которой следует задать свой график зависимость поведения материала Sigma – Eps (Напряжение – относительная деформация) в области выше упругой зоны для другой температуры.

Замечание. Учет пластичности возможен для пластинчатых и твердотельных элементов при выполнении нелинейного расчета.

Для описания упругопластического поведения грунтов используется модель Друкера-Прагера, в которой необходимо задать угол внутреннего трения и сцепление.

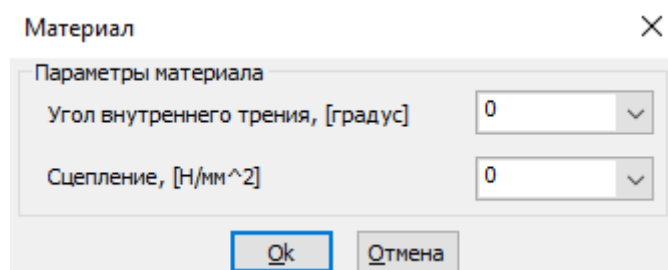


Рисунок 5.4 – Диалог Материал при задания свойств модели Друкера-Прагера

## Группа свойств SMA

Данная группа свойств позволяет описывать поведения материалов с эффектом памяти формы.

В диалоге Свойства SMA необходимо задать соответствующие физико-механические характеристики материала: модуль упругости мартенсита и аустенита, максимальное относительное удлинение, характерные температуры мартенситных переходов, границы зон фазовых переходов.

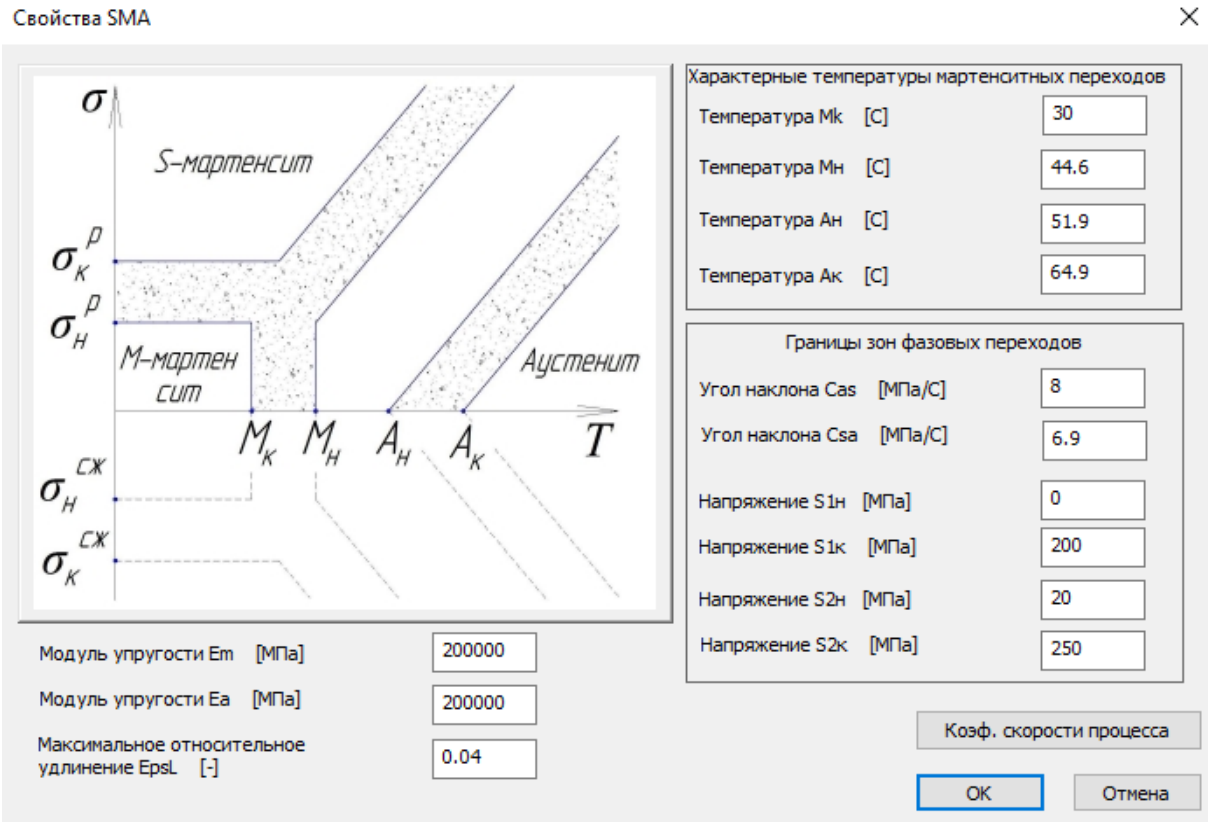


Рисунок 5.5 – Диалог Свойства SMA

Кнопка Коеф. скорости процесса вызывает соответствующее диалоговое окно для задания коэффициентов скорости процесса.

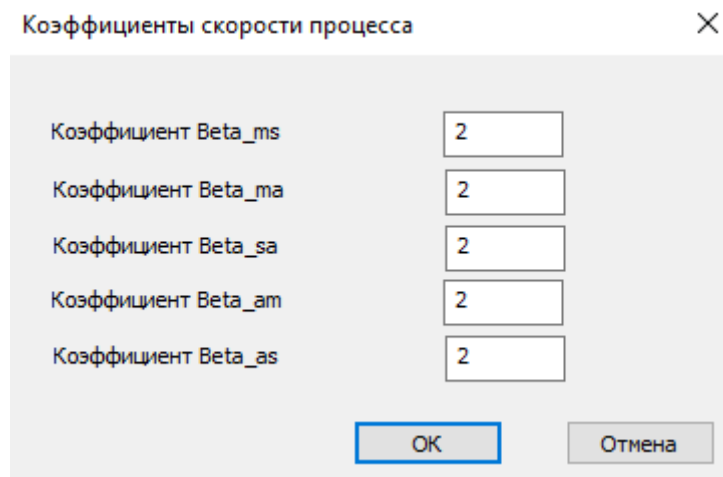


Рисунок 5.6 – Диалог Кoeffициенты скорости процесса

### Группы нелинейных свойств материала

Подробнее группы свойств Идеальный упругопластичный, Изотропное билинейное упрочнение, Изотропное мультилинейное упрочнения, Изотропное нелинейное упрочнение описаны в главе 8.

## Группа свойств Термический материал

Для проведения нестационарного теплового расчета всем элементам конструкции необходимо задать материалы с группой свойств Термический материал.

В диалоге задания свойств термического материала можно задать соответствующие свойства материала в виде постоянного значения, графика, таблицы или функции зависимости от температуры. При выборе опции Анизотропный материал в диалоге появляется возможность задания Теплопроводности по направлениям осей X, Y и Z ГСК.

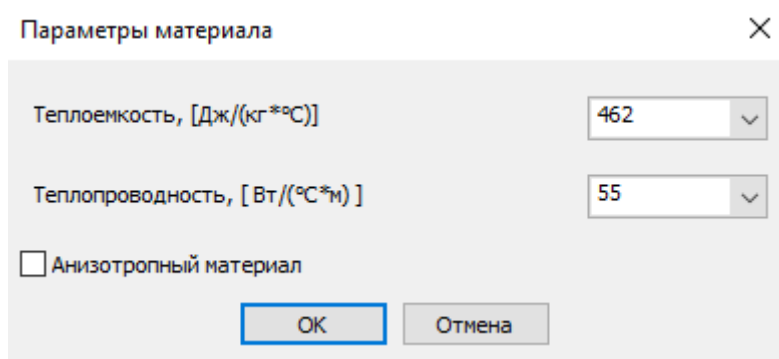


Рисунок 5.7 – Диалог Параметры материала для задания термического материала

## Группа свойств Течение

Данная группа свойств предназначена для задания свойств материала при анализе течения жидкостей и газов.

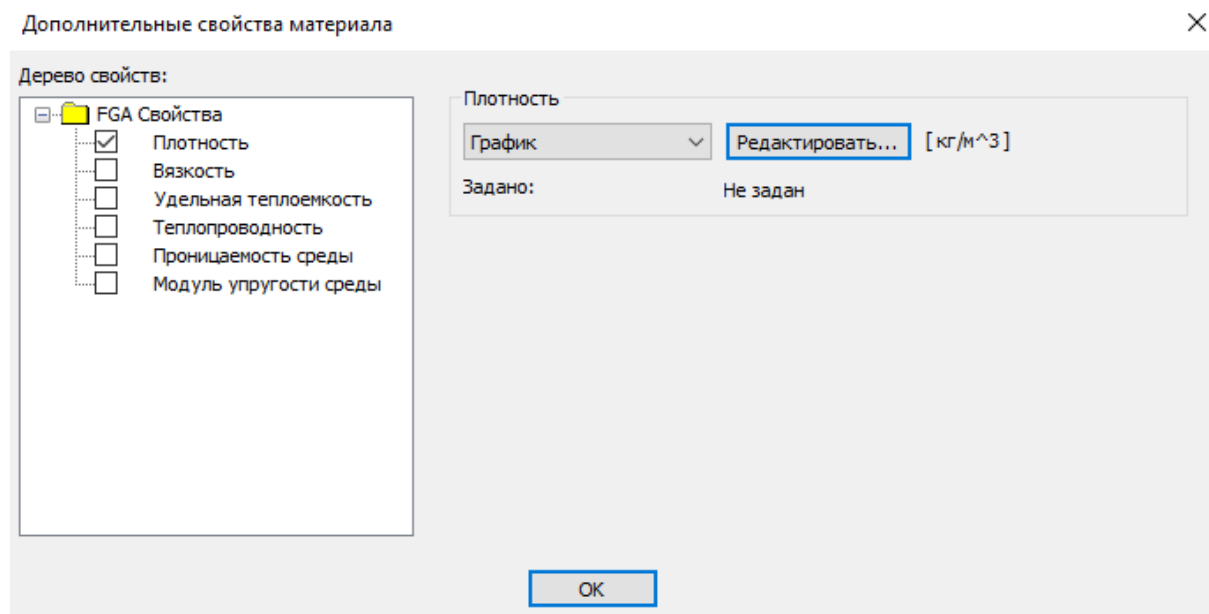


Рисунок 5.8 – Диалог Дополнительные свойства материала при задании свойств Течения

Подробнее см. руководство по модулю FGA анализа.



## Группы Электромагнитных свойств

Для выполнения расчетов, связанных с анализом электромагнитных полей, всем элементам конструкции необходимо задать материалы с соответствующими группами свойств: удельная электрическая проводимость, относительная диэлектрическая проницаемость, относительная магнитная проницаемость.

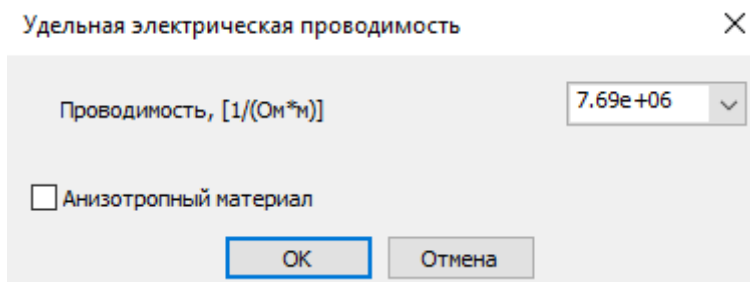


Рисунок 5.9 – Диалог Удельная электрическая проводимость

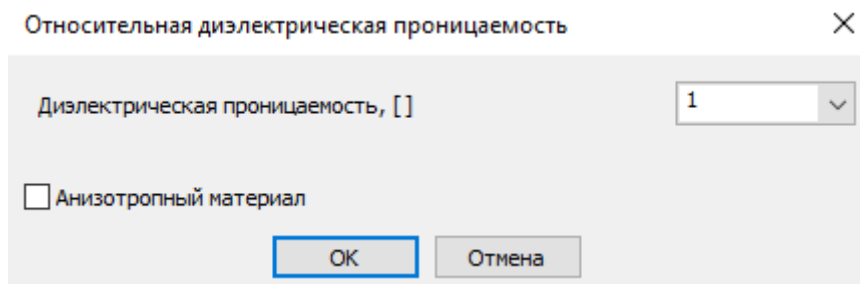


Рисунок 5.10 – Диалог Относительная диэлектрическая проницаемость

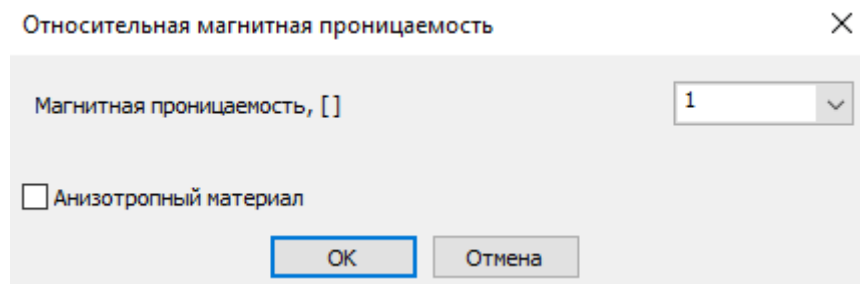


Рисунок 5.11 – Диалог Относительная магнитная проницаемость

## Группа свойств Слоистый композит

Эта группа свойств позволяет описать слоистый композит (ламинат), который представляет собой пластину с толщиной, малой по сравнению с размерами по двум другим измерениям. Плоскость ламината задаётся обычно как  $Oxy$ , ось  $Oz$  перпендикулярна этой плоскости. По толщине ламинат набирается, чаще всего, тонкими слоями ортотропного материала, каждый из которых уложен в плоскости под определённым углом.

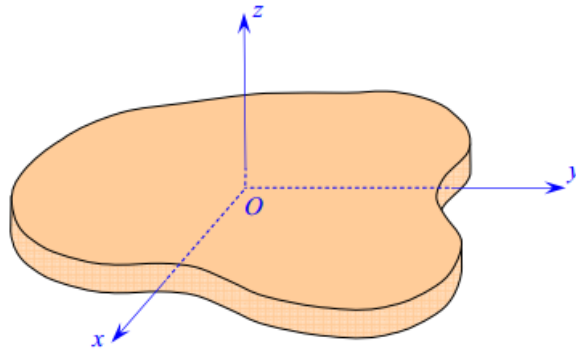


Рисунок 5.12 – Локальная система координат ламината

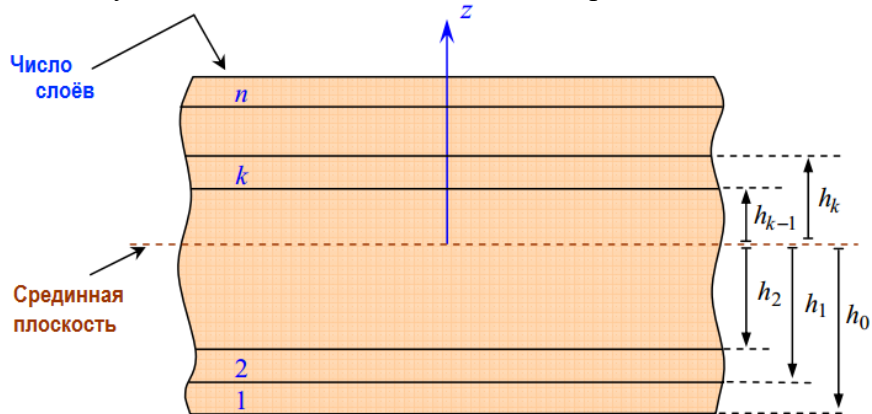


Рисунок 5.13 – Схема расположения слоёв ламината в пластине

В диалоговом окне можно набрать композит из отдельных слоёв с характерными для каждого слоя параметрами, такими как материал, толщина слоя и направление укладки волокна.

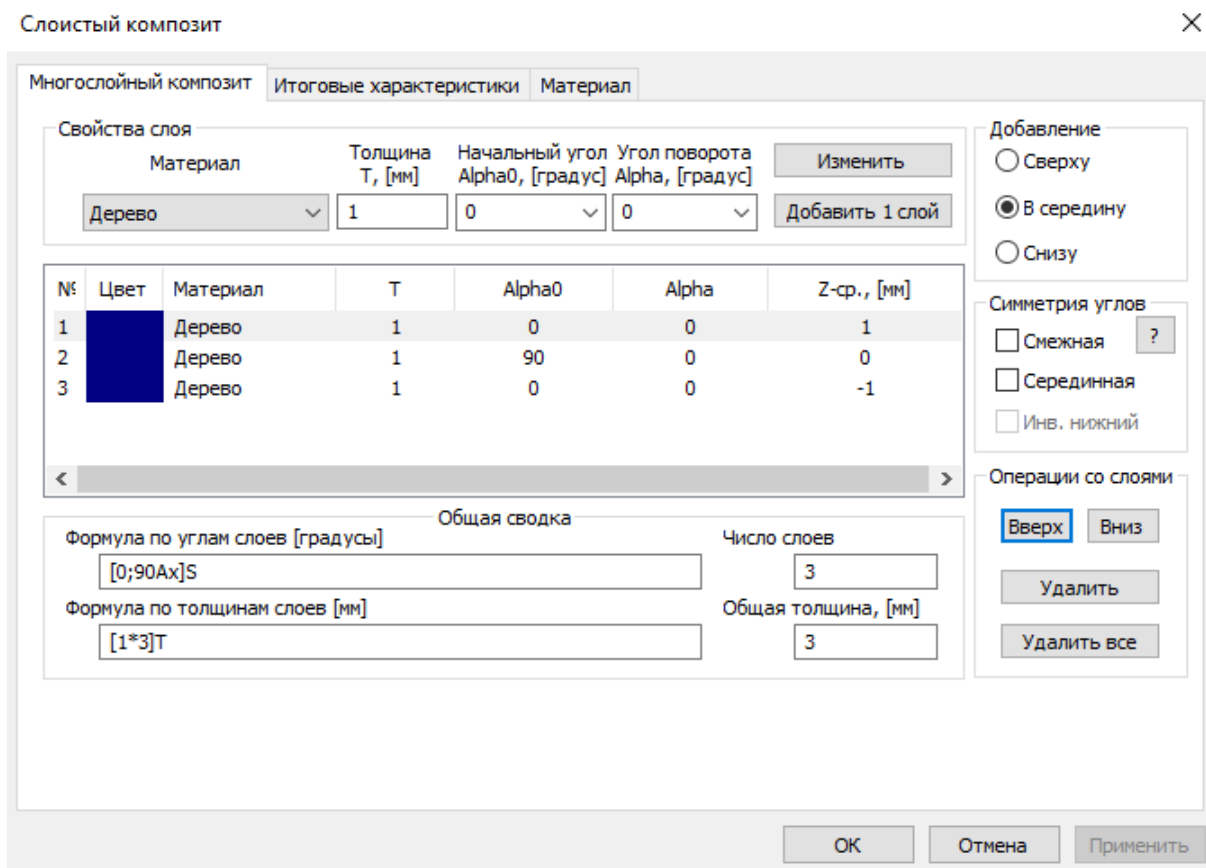


Рисунок 5.14 – Укладка слоев ламината

Добавить – позволяет добавлять слои в набор композита.

Изменить – позволяет изменить свойства слоя в наборе.

Помимо собственно функционала набора слоистой структуры ламината, в правой части диалога существуют различные опции набора.

#### Формула для углов и толщин композита

Вкладка Укладка слоёв диалога Настройки свойства материала «Слоистый композит» содержит в нижней части поля для вывода формулы по углам и толщинам слоёв. В случае использования нескольких материалов для задания слоёв композита может считаться актуальной формула для материалов. Сейчас формула по материалам отсутствует.

Единицы измерения для углов всегда будут в градусах, а толщин – миллиметрах.

При вычислении формулы неделимой единицей (термом) считается значение угла или толщина слоя ламината. Формула обрамляется квадратными скобками, за закрывающейся скобкой следует суффикс, или указатель симметрии. Суффиксом может иметь только три обозначения: S, A и T.

Суффикс «Т» означает констатацию того, что формула будет отображена без указания симметрии, даже если она присутствует. Суффикс «А» (антисимметрия)

присущ только формуле углов и означает, что относительно среднего слоя композита (или межслойной плоскости, если число слоёв чётно) будут значения углов с обратным знаком. Для формулы по толщинам отрицательных величин быть не может, а потому возможна только симметрия с суффиксом «S».

Пример формул по углам: «[10;-20;25;10;30]T», означает, что сверху вниз идут слои с перечисленными углами укладки, всего 5 слоёв. Формула «[10;-30]A» эквивалентна «[10;-30;30;-10]T». Если выявлена симметрия, то возможен вариант с нечётным числом слоёв композита. В этом случае симметрии срединный слой сопровождается обозначением «Ax», например, «[25;-40;0Ax]».

Если в формуле выявлены подряд идущие повторения, то они выделяются в круглые скобки с указанием числа повторений после закрывающейся скобки. Пример: «[25;(-30;70)2;17]S» эквивалентно «[25;-30;70;-30;70;17;17;70;-30;70;-30;25]T». Повторения так же могут быть вложенными, например: «[(20;(10;15)2)2]S» эквивалентно «[20;10;15;10;15;20;10;15;10;15;15;10;15;10;20;15;10;15;10;20]T». Если в повторении всего один терм, то скобки не используются, а ставится знак звёздочки между термом и числом повторений: «[0\*7]T» эквивалентно «[0\*3;0Ax]S», а так же, в данном случае, эквивалентно «[0\*3;0Ax]A», поскольку в случае нулевого угла укладки знак угла не имеет значение. Случая с нулевой толщиной не может быть, поскольку толщина ограничена снизу величиной порядка 0,1 мм.

Запись формулы без использования суффикса симметрии может быть даже короче: «[(20;10)5;20]T» эквивалентно «[20;(10;20)2;10Ax]S».

### **Плотность композита**

Если в композите слои не заданы, то и плотность будет отображаться значением 0. Это вызвано тем, что плотность вычисляется на основе плотностей тех материалов, из которых состоит композит.

Итоговая плотность вычисляется как сумма плотностей с множителями, пропорциональными относительным вкладам в итоговую толщину материалов.

Итоговые характеристики слоистого композита представлены на рисунке ниже.

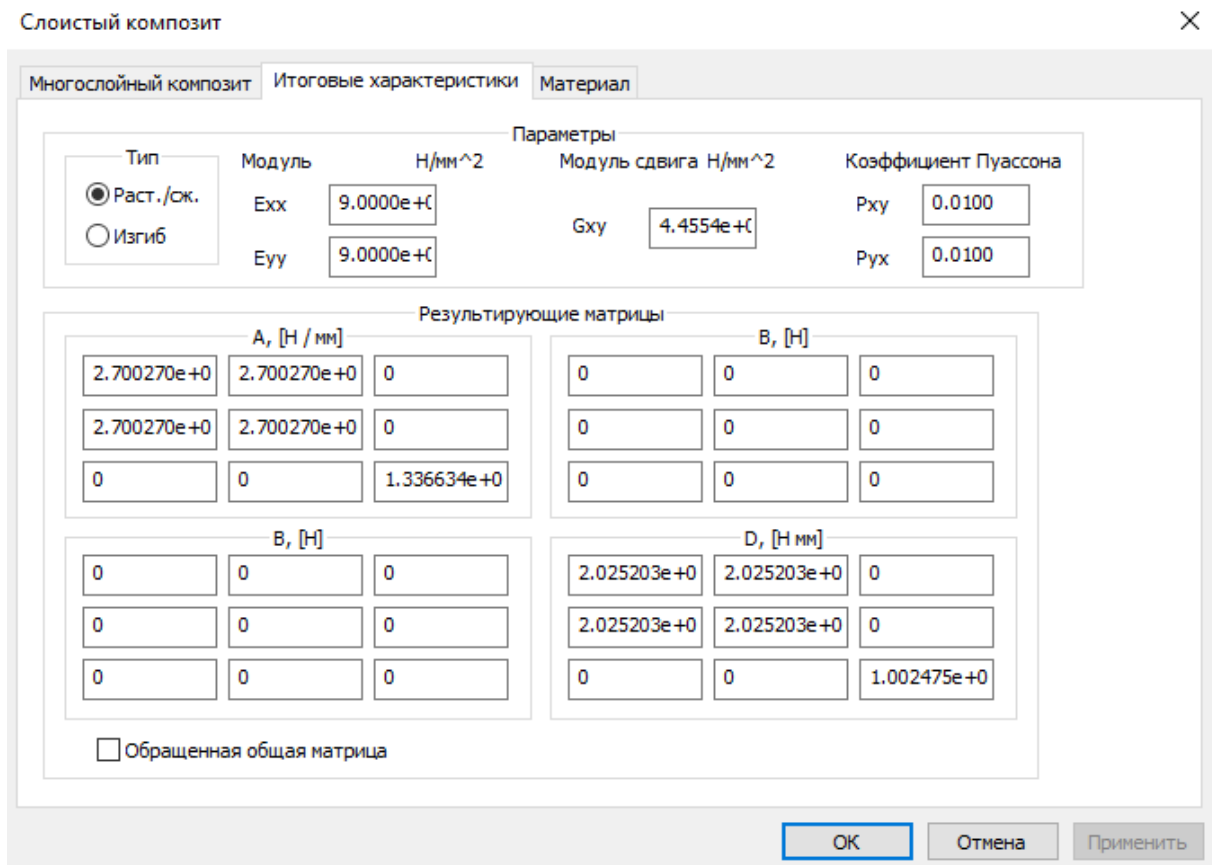


Рисунок 5.15 – Итоговые характеристики слоистого композита

### Группа свойств Демпфирование

Позволяет задать коэффициент затухания в материале.

### Группа свойств Усталость

Задания свойства материала «Усталость» позволяет задавать кривую усталости непосредственно графиком. Для этого в диалоге «Выбор свойств материала, среди доступных свойств (правая панель) выбирается свойство «Усталость» и нажимается кнопка «<<<», после чего открывается окно «Усталость».

В данном окне первая вкладка «Редактор функций» позволяет задавать кривую Вёлера в полулогарифмических координатах (логарифм по числу циклов). Для этого есть пути, первый из которых предполагает задание графика с помощью ЛКМ, второй – загрузка из файла. При ручном задании функции с помощью мышки рекомендуется пользоваться только элементами типа «Линия» и избегать элементов типа «Сплайн».

После закрытия окна кнопкой «ОК» производится анализ вида кривой, и если график имеет не монотонно убывающий характер, то выдаётся предупреждение. Для корректировки графика проще всего воспользоваться нажатием кнопки с изображением таблицы панели редактора функций для вызова окна «Функция». При корректном

задании графика свойство «Усталость» появляется среди текущих свойств материала (левая панель).

Крайняя правая точка графика кривой Вёлера, или нижняя точка в таблице задаёт сразу два параметра: это базовое число циклов  $N_G$  и предел выносливости  $\sigma_{-1}$ . Рисование горизонтального участка кривой имеет смысл только для задания большего базового числа циклов, относительно которого будет производиться расчёт коэффициентов запаса по выносливости.

Таким образом, если для материала кривая Вёлера задана непосредственно свойством «Усталость», то параметры  $N_G$  и  $\sigma_{-1}$  берутся из графика усталости. Для материалов, у которых не задано свойство «Усталость», параметры  $N_G$  и  $\sigma_{-1}$  берутся из диалогов параметров усталостного расчета.

### Группа свойств для Линейно-упругой механики разрушений

При решении задач ЛУМР необходимо иметь в наличии специальные свойства материала, которые отражают способности материала сопротивляться росту трещины. Некоторые такие свойства имеются в базе данных свойств материалов для ЛУМР. База данных свойств материалов для ЛУМР содержит значения параметров, необходимых для проведения статического и усталостного расчетов на трещиностойкость. В случае статического расчета необходимо использовать следующие параметры:

- критическое значение КИН 1-го типа;

В случае усталостного расчета необходимо использовать следующие параметры:

- твердость по Виккерсу;
- пороговое значение КИН;
- константа  $n$  Париса;
- константа  $C$  Париса.

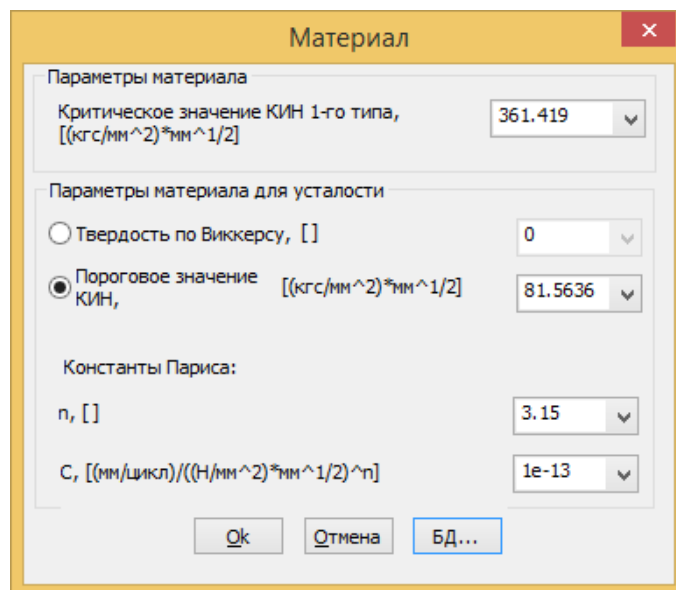


Рисунок 5.16 – Диалог Материал для задания свойств ЛУМР

1) Блок **Параметры материала**

Задаются значения параметров, необходимые при выполнении статического расчета.

2) Блок **Параметры материала для усталости**

Задаются значения параметров, необходимые при выполнении усталостного расчета. Для усталостного расчета также необходимо заполнить данные из блока "Параметры материала"

3) Кнопка **БД...**

При нажатии на кнопку открывается окно базы данных материалов (рисунок 5.17). База данных содержит свойства материалов для ЛУМР, необходимые при проведении статического и усталостного расчетов.

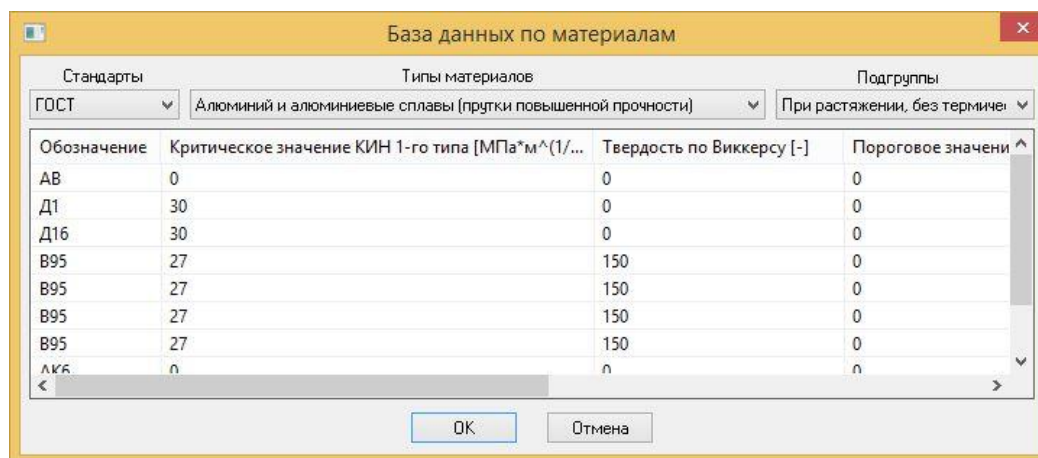


Рисунок 5.17 – Диалог Материал для задания свойств ЛУМР

## Глава 6. Гармонический анализ

С версии v17 пакета APM WinMachine начал функционировать модуль «Гармонический анализ», сокращённо ГА. Использование этого модуля даёт возможность пользователю вычислять так называемый отклик модели на гармоническое воздействие. До этой версии для решения подобных задач необходимо было производить расчёт вынужденных колебаний для выявления амплитуд перемещений (отклика) элементов моделируемой конструкции при установившихся колебаниях от гармонического (синусоидального) воздействия. При слабом демпфировании в элементах конструкции число периодов вынужденных колебаний до времени установления постоянного значения амплитуды может быть значительным, что может потребовать значительного увеличения времени расчёта. Этот факт и был решающим при создании ГА.

### Основные шаги для формирования модели

В гармоническом анализе возможно задание ускорения в узле, игнорируемое в других видах анализа, кроме вынужденных колебаний. Такой вид нагрузки в программе обозначается как кинематический, совместно с перемещением в узле. До этого перемещение в узле имело название «Смещение в опоре» и учитывалось в статике как смещение, а при вынужденных колебаниях как ускорение. Сейчас эти понятия разделены.

При ГА предполагается, что все силовые факторы, приложенные к модели, подчинены гармоническому закону (даже если задан, то и вес!), но могут иметь различную начальную фазу. Если необходимо промоделировать гармоническое воздействие в условиях неизменяемого гравитационного воздействия, то необходимо это воздействие обозначить в отдельном нагружении, и при расчёте назначить в списке «Предварительное нагружение», что будет доступно только в следующей версии.

Задание демпфирования может быть произведено двумя способами, или через свойства материала, или в настройках расчёта ГА.

### Задание кинематической нагрузки

Прежде чем задавать кинематическую нагрузку в заданных узлах конструкции, необходимо для этих узлов задать закрепление в соответствующих направлениях. Так, на рисунке 6.1 показано закрепление для узла по перемещению в направлениях X и Y (ЛСК узла не было назначено).



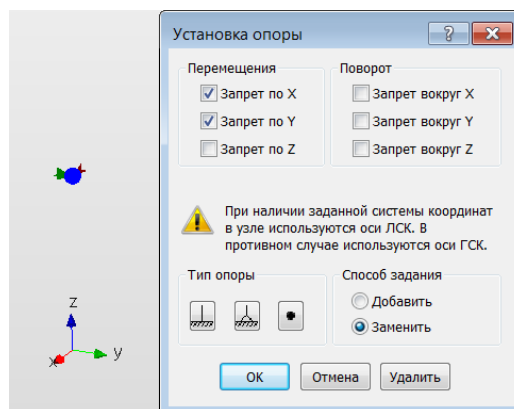


Рисунок 6.1 – Задание закрепления в узлах перед заданием кинематической нагрузки, выбранный узел обозначен большим синим шариком, красная и зелёная стрелки в узел показывают уже заданное закрепления в направлениях X и Y

После задания закрепления для задания кинематической нагрузки необходимо выбрать пункт основного меню «Нагрузки >> Кинематика в узле», после чего указателем мыши соответствующего вида выбрать в модели заданные узлы (при этом невозможно выбрать узел, в котором нет закрепления ни одного типа!). После нажатия на кнопку «Применить» в направлениях, в которых имеется закрепление по перемещениям или по повороту, будут заданы значения из соответствующих полей диалога перемещения или ускорения, если соответствующие поля ненулевые, см. рисунок 6.2.

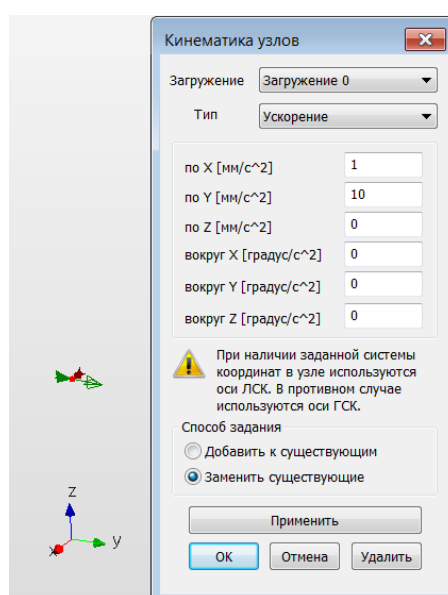


Рисунок 6.2 – Задание кинематической нагрузки, выбранный узел обозначен маленьким красным шариком, итоговое направление кинематической нагрузки показано зелёной стрелкой, выходящей из узла

Чтобы видеть итоговое направление кинематической нагрузки как на рисунке 6.2, соответствующее загрузке должно быть включено из диалога «Загрузки», или из панели «Текущие параметры» («лампочка» должна быть включена).

Для того чтобы контролировать назначенные величины кинематической нагрузки прямо на узлах модели, необходимо в панели «Дополнительные фильтры вида» включить переключатель «Кинематика в узле».



Рисунок 6.3 – а) Панель дополнительных фильтров вида; б) переключатель показа значений кинематической нагрузки в узлах модели

После включения отображения значений кинематических нагрузок в узле на текущем виде отобразятся назначенные величины, см. рисунок 6.4. При этом значения углов поворота и угловые ускорения отображаются только если они заданы. Очередность значений имеет шаблон (X; Y; Z).

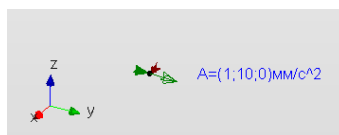
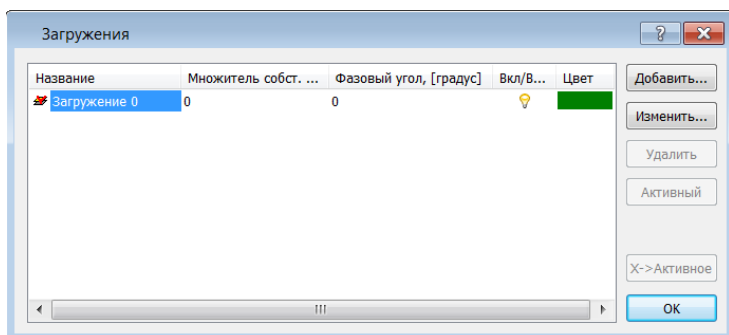


Рисунок 6.4 – Отображение значений кинематической нагрузки в узлах на текущем виде

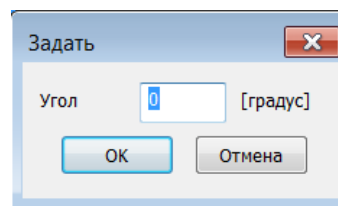
При задании одного типа кинематической нагрузки другой тип нагрузки будет удалён. Недопустимым считается случай, когда в загрузениях, участвующих в комбинации загрузений, определены для узла и перемещение, и ускорение в одном направлении.

### Задание фазового угла

Фазовый угол не может быть задан для конкретной нагрузки, но может быть задан для загрузения. Для задания величины фазы загрузения необходимо в соответствующем диалоге (основное меню «Нагрузки >> Загрузения»), см. рисунок 6.5, кликнуть мышью текущее значение желаемого загрузения. После этого будет вызван диалог «Задать» и необходимо произвести назначение соответствующей величины. Если в таблице не отображился соответствующий столбец, то указателем мышки сдвиньте вправо левую границу шапки столбца «Вкл/Выкл».



а)



б)

Рисунок 6.5 – Задание фазового угла загрузки,  
а) общий диалог с таблицей по загрузкам;  
б) диалог задания величины фазы загрузки

### Задание демпфирования

Демпфирование в модели может быть задано несколькими способами. Основной из них – задание в материале свойства «Демпфирование», см. рисунок 6.6. Даже если в материалах отсутствует свойство демпфирования, демпфирование может быть задано в настройках расчёта, см. параграф «Настройки расчёта гармонического анализа».

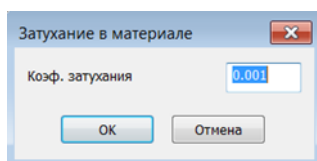
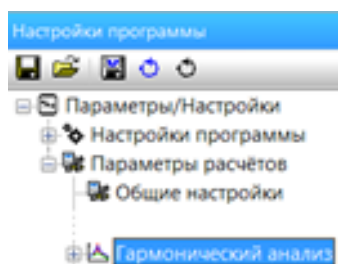


Рисунок 6.6 – Задание демпфирующих свойств изотропного материала в свойствах материала

### Настройки расчёта гармонического анализа

Для отображения панели параметров расчёта выберите из основного меню пункт «Расчёты >> Панель параметров расчёта», после чего выбрать в дереве настроек программы элемент «Гармонический анализ», см. рисунки 6.7 – 6.9.



а)

Свойство	Значение
$[M].\{x\}'' + [C].\{x\}' + [K].\{x\} = \{F(w)\}$	
Алгоритм решения СЛАУ для $[M].\{x\}'' + [C].\{x\}' + [K].\{x\} = \{F(w)\}$	Sparse
Точность решения	0.001
Максимальное кол-во итераций	100
Объём оперативной памяти, Мб	8000
Хранение разложения матрицы	AutoDecide
Размер временного файла	1500

б)

Рисунок 6.7 – а) Общий вид панели настроек программы;  
б) настройки расчётного ядра гармонического анализа

В настройках расчётного ядра для ГА по умолчанию назначен алгоритм решения СЛАУ как Sparse. При использовании других методов результат не может быть гарантирован.

При расчёте значительной модели необходимо соответственно изменять значение в пункте «Объём оперативной памяти», иначе возможен вариант нештатного завершения расчёта.

На рисунке 6.8 показаны основные настройки.

Свойство	Значение
$[M] \cdot \{x\}'' + [C] \cdot \{x\}' + [K] \cdot \{x\} = \{F(w)\}$	
<b>Параметры визуализации спектров</b>	
Алгоритм решения $[A] \cdot \{x(w)\} = \{F(w)\}$	Алгоритм FULL
Начальное значение частотного интервала, [Гц]	700
Конечное значение частотного интервала, [Гц]	8000
Общее кол-во частот на заданном интервале	2
Тип размещения расчётных частот	Линейный масштаб
Минимальное число разделений поддиапазонов	7
Процент между частотами для их разделения	0.1
Сохранять для частот	Сохранять для резонансных
Прогресс-диалог	Не закрывать
Тип задания демпфирования	Релеевское демпфирование
Умолчательное демпфирование	0
Alpha - демпфирование	0
Beta - демпфирование	0

Рисунок 6.8 – Основные настройки для проведения гармонического анализа

«Алгоритм решения задачи вида  $[M] \cdot \{x\}'' + [C] \cdot \{x\}' + [K] \cdot \{x\} = \{F(w)\}$  отображает единственный из доступных – полный, или “Алгоритм FULL”, при этом, где  $\omega$  – круговая частота.

«Начальное и конечное значение частотного интервала» задаётся в Герцах, диапазон от 1e-6 Гц до 20 кГц.

«Общее кол-во частот на заданном интервале» включает заданные начальное и конечное значения, число в диапазоне от 2 до 10000.

«Минимальное число разделений поддиапазонов». Общий расчётный диапазон делится собственными частотами на непересекающиеся поддиапазоны. Между собственными частотами граница поддиапазонов вычисляется как среднее геометрическое. Первый диапазон и заключительный образованы левой и правой границей расчётного диапазона совместно с соответствующими собственными частотами. Число в диапазоне от 2 до 20.

«Процент между частотами для их разделения» задаёт значение минимальной относительной разницы в % между частотными значениями границ поддиапазонов, ниже значений которой поддиапазон исключается из-за малости. От 0.001 до 20.

Пункт «Сохранять для частот» позволяет выбрать тип сохранения значения деформаций и напряжений (в текущей версии эти типы величин не вычисляются). В случае выбора 'Масштаб по собственным частотам' для типа размещения расчётных частот происходит расчёт собственных частот. В этом случае возможно сохранение основных результатов только для резонансных частот, попадающих в расчётный

диапазон. При другом типе размещения частот не производится расчёт собственных частот и выбор 'Сохранять резонансные' будет интерпретироваться как 'Не сохранять'. Для сохранения выберите 'Сохранять всё', но тогда размер итогового файла может быть значительным.

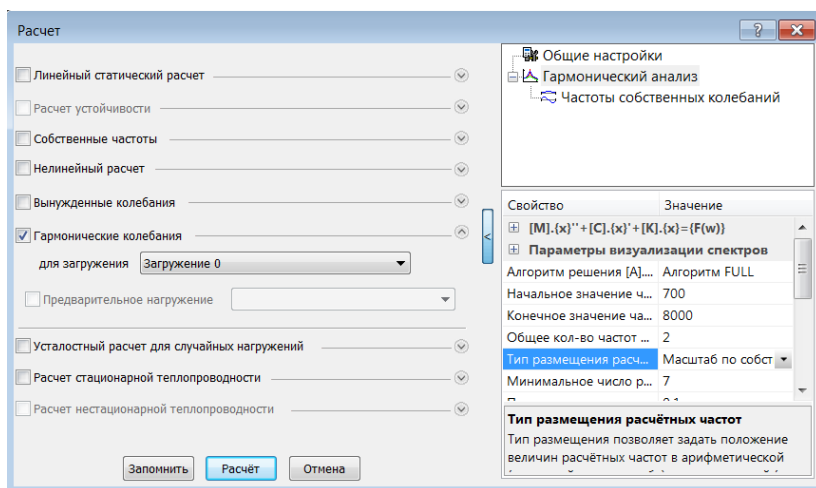
Выбор в списке “Тип размещения расчётных частот” позволяет задать значение расчётных частот в арифметической (“Линейный масштаб”), геометрической (“Логарифмический масштаб” и “Масштаб по собственным частотам”) прогрессии.

“Прогресс-диалог” Свойство автоматического закрытия диалога после расчёта (или его прерывания). В прогресс-диалоге отображаются некоторые детали расчёта, в том числе предполагаемое время до окончания расчёта. Если выбрана свойство «Не закрывать», то пока не будет закрыт прогресс-диалог, никакие другие действия, кроме как с текстом самого лога, не будут доступны.

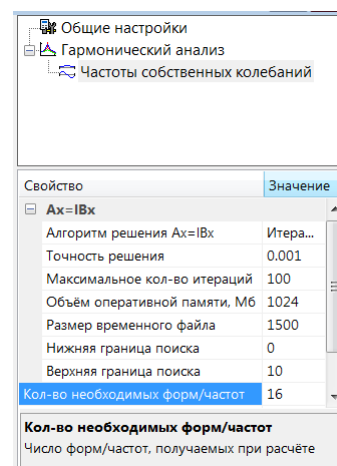
Выбор параметра из списка “Тип задания демпфирования” позволяет выбрать метод формирования матрицы демпфирования. Для случая “Демпфирование из свойств материала” необходимо назначить значение демпфирования по умолчанию для всех материалов, у которых отсутствует свойство демпфирования, при этом значение может быть и нулевым. Выбор типа “Релеевское демпфирование” позволяет формировать матрицу демпфирования заданием двух параметров. В параметре “Alpha – демпфирование” задаётся коэф. пропорциональности для матрицы масс  $[M]$ , в параметре “Beta - демпфирование” задаётся коэф. пропорциональности для матрицы жёсткости  $[K]$ . Для элементов типа «Упругая связь» это условие не работает. Вклад в матрицу демпфирования для этого типа элементов определяется только заданными значениями осевых коэффициентов затухания.

## Задание на расчёт

Вызов диалога «Расчёт» производится из главного меню «Расчёты >> Расчёт...», вид этого диалога представлен на рисунке 6.9.



а)



б)

Рисунок 6.9 – а) Диалог запуска на расчёт для ГА с отображением настроек расчёта  
 б) настройки расчёта собственных частот в ГА для случая размещения частот по собственным частотам

Расчёт может быть произведён только для одного нагружения, выбранного в соответствующем списке. Если тип размещения частот задан как «Масштаб по собственным частотам», см. рисунок 6.9 а), то сначала производится расчёт собственных частот по настройкам из ГА, которые указаны в дереве настроек диалога «Расчёт», см. рисунок 6.9.

Важно! Перед тем, как выставлять настройки для ГА и проводить расчёт, необходимо провести отдельный расчёт на собственные формы. Это необходимо для правильной первоначальной оценки частотного диапазона для расчёта. Как и при расчёте вынужденных колебаний через собственные формы, задание корректного значения количества необходимых форм/частот определяется посредством суммы модальных масс. При этом необходимо учитывать такой факт, что кинематическое воздействие в одном направлении может приводить к существенному отклику в направлении других осей.

В выпадающем списке «Предварительное нагружение», отвечающего за постоянную нагрузку, список будет пополнен только нагружениями, для которых был проведён линейный статический расчёт.

В процессе расчёта ГА сохраняются комплексные значения перемещений узлов для назначенного списка частот. Поэтому итоговые значения для скоростей и ускорений получаются домножением перемещений на комплексное значение круговой частоты  $\omega$  в соответствующей степени.

## Настройки визуализации результатов гармонического анализа

Результаты гармонического анализа доступны для просмотра в двух видах, это карты результатов и спектры.

Для отображения карт результатов стандартно вызывается диалог «Параметры вывода результатов», через основное меню «Результаты >> Карта результатов...» или уже для открытой карты через основное меню «Результаты >> Параметры вывода результатов», см рисунок 6.10.

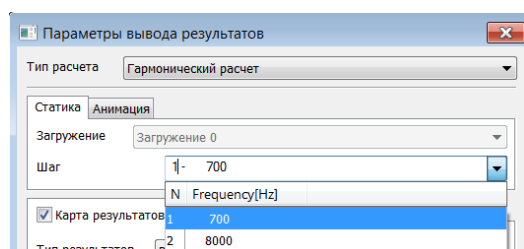


Рисунок 6.10 – Диалог настройки параметров карт результатов

В вызванном диалоге выбирается сначала в списке «Тип расчета» пункт «Гармонический расчет», затем во вкладке «Статика» выбирается уже посчитанное загружение, если оно не единственное (это возможно при множественном запуске на расчёт ГА для различных загружений). Если посчитанное загружение единственно, то отображается его название без возможности редактирования. В поле «Шаг» необходимо выбрать значение частоты для отображения результатов расчёта. Эти величины в дальнейшем будут отображаться в заголовке карты результатов.

Следующая настройка диалога «Параметры вывода результатов» - это список «Тип результатов», см. рисунок 6.11 а), в котом можно выбрать один из трёх типов результатов вибрации: перемещение, скорость или ускорение. Затем необходимо выбрать тип конечных элементов для отображения соответствующим переключателем. Если в модели отсутствуют конечные элементы типа «Стержень» и «Пластина», то будет доступен только переключатель для объёмных элементов, см. рисунок 6.11 б).

Важно! При расчёте ГА недопустимо наличие только упругих элементов типа «Упругая связь», нужны ещё конечные элементы типа «Стержень», «Пластина» или «Объёмный элемент». Допустимо использовать элемент «Масса в узле».

В выпадающем списке доступных компонентов вибро-значений первая буква имеет следующее соответствие: «U» - перемещение, «V» - скорость и «A» - ускорение. Дальнейшая группировка осуществлена по направлению, сначала компоненты по направлению X, затем Y, направлению Z, и, наконец, некоторые суммарные значения.

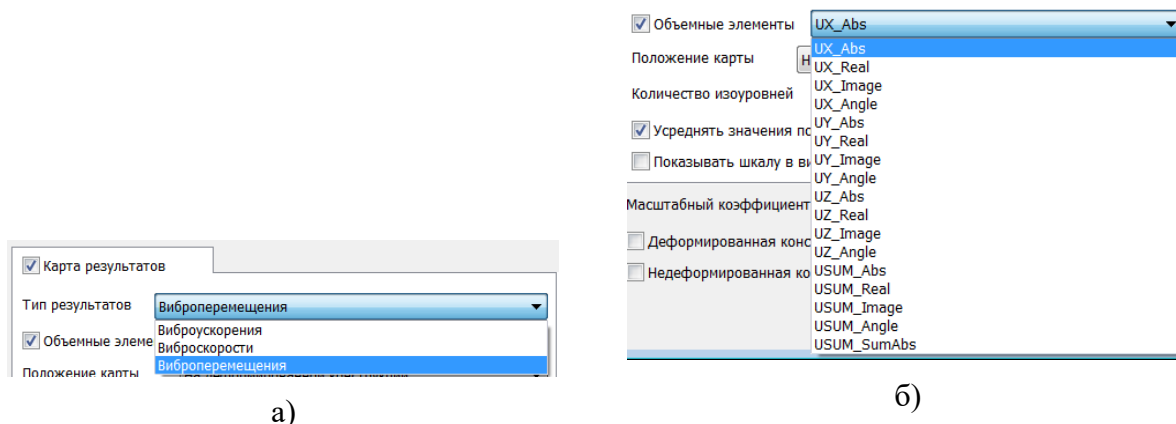


Рисунок 6.11 – Диалог настройки параметров и вида карт результатов:  
 а) с выбором типа результатов;  
 б) с выбором типа элементов (в данном случае – объёмных)

В каждой группе компонентов идут по очереди следующие виды значений для выбранной комплексной вибрационной величины:

- «Abs» – абсолютное значение;
- «Real» – действительная часть;
- «Image» – мнимая часть;
- «Angle» – угол на комплексной плоскости.

Для первых четырёх суммарных компонент (шаблон «?SUM», где ? отвечает за один из символов “U”, “V” или “A”) итоговое комплексное значение определяется простым сложением комплексных величин от всех трёх направлений.

После выбора необходимых компонент для выбора на карте результатов будет отображена соответствующая карта результатов, см. пример на рисунке 6.12.

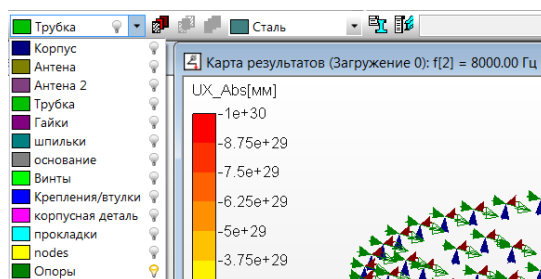


Рисунок 6.12 – Карта результатов с неинициализированной шкалой при выключенных слоях с конечными элементами, но отображаемыми узлами

Как видно из рисунка 6.12 в заголовке окна отображается в круглых скобках имя выбранного нагружения, номер (в квадратных скобках) и значение частоты, для которых отображается карта результатов: на приведённой карте результатов это вторая в списке частота, значением 8 кГц.



При включении слоёв, содержащих конечные элементы, тип которых был подтверждён в диалоге с рисунка 6.11 б), будет инициализирована шкала и отрисована карта.

В настоящей версии не предусмотрена возможность отрисовки результатов на деформированной конструкции.

Второй тип результатов, доступных для отображения – спектры.

Под спектром понимается график, на котором отображаются результаты ГА для выбранного узла по трём направлениям в зависимости от частоты. Если в каком-либо направлении задано закрепление, то по этому направлению будет отображено минимальное значение (-12 дБ или 0).

Для того чтобы иметь возможность выбора параметров и компонент для отображения результатов в виде спектров, используется дерево настроек ГА, см. рисунок 6.13.

Свойство	Значение
<input type="checkbox"/> Параметры визуализации спектров	
База виброперемещений, [мм]	8e-09
База виброскоростей, [мм/с]	5e-05
База виброускорений, [мм/с^2]	299.9999858
Использование дБ	<input checked="" type="checkbox"/>
Использование Гц	<input checked="" type="checkbox"/>
Использование логарифмирования оси частот	<input type="checkbox"/>
Выбор типа значений вибрации	Виброперемещение
Выбор типа расчёта для АЧХ	Один узел
Выбор типа значений для вывода АЧХ	Модуль
Вид спектра	АЧХ

Рисунок 6.13 – Настройки визуализации спектров ГА

Выводимыми расчётными вибрационными величинами по перемещению, скорости или ускорению могут быть: для вида спектра «АЧХ» - «Модуль», «Действит.часть» и «Мнимая часть», а так же вид спектра «ФЧХ». АЧХ – сокращение от амплитудно-частотная характеристика, ФЧХ – фазо-частотная характеристика.

Для того чтобы иметь возможность отображение спектров в двойном логарифмическом масштабе были введены специальные базовые значения для виброперемещений, скоростей и ускорений. Эти базовые значения используются для вычисления значений в децибелах.

$$Val_{дБ} = 20 \log_{10} \frac{Val}{Val_0}$$

Число в знаменателе в приведённой формуле -  $Val_0$  соответствует базовой величине, от которой производится отсчёт. Обычно эту базовую величину назначают так, чтобы децибельные значения были положительными. Приведённые на рисунке 6.13

базовые величины используются во многих приборах для измерения вибрационных показателей.

Таким образом, включение флага «Использование дБ» позволяет получать более сглаженные спектры, на которых хорошо отображаются как значительные по своей величине значения, так и незначительные. При выключении этого флага спектры будут отображаться в тех величинах, которые были установлены в диалоге «Установки», основное меню «Вид >> Единицы измерения...» для таких единиц, как «Длина» и «Время».

Флаг «Использование Гц» позволяет выводить значения частот или в обычных единицах частоты – в Герцах, или в единицах круговой частоты – в радианах/секунду.

Чтобы получить график в двойном логарифмическом масштабе, кроме включения флага «Использования дБ» необходимо включить флаг «Использование логарифмирования оси частот».

Чтобы вызвать график, на котором отображается спектр по выбранным компонентам, выберите в основном меню «Результаты >> Спектр по результатам гармонического расчёта», после чего необходимо выбрать узел (синим шариком выбора), для которого необходимо вывести график в любом из окон модели (Не на карте результатов!).

После таких манипуляций отобразится соответствующий график, например, для в двойном логарифмическом масштабе, с отображением значений модуля комплексных значений виброперемещений, см. рисунок 6.14. Очевидным плюсом графика в таком масштабе – это его линейность.

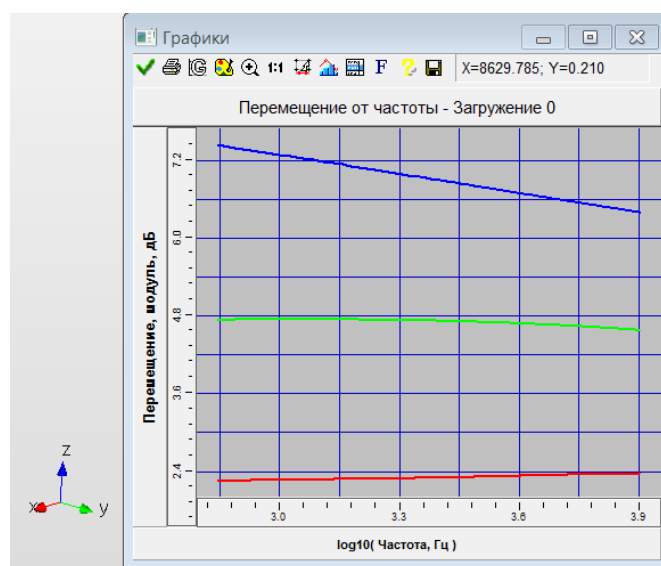


Рисунок 6.14 – ЛАЧХ модуля комплексного виброперемещения по соответствующим осям, цвет которых назначен по умолчанию.

Если цвета в графиках были изменены, то необходимо нажать на панели инструментов этого диалога восьмую кнопку, в результате появится возможность или посмотреть текущие цветовые настройки, или их переназначить, см. рисунок 6.15.

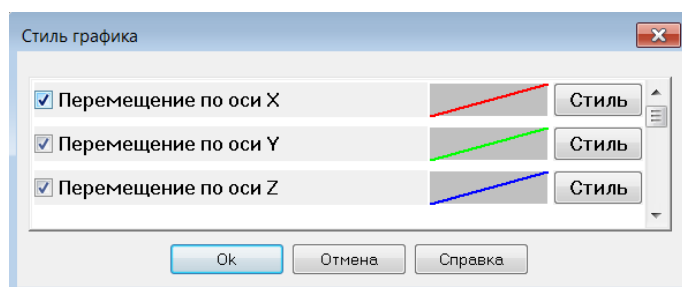


Рисунок 6.15 – Диалог настроек стилей отображения графиков спектров

Если необходимо отобразить относительный спектр, что актуально может быть для демпфера, когда выбираются оба узла элемента типа «Упругая связь». Тогда в панели настроек с рисунка 6.13 необходимо параметр «Выбор типа расчёта для АЧХ» переназначить из «Один узел» в «Пара узлов». И тогда при первом выборе указывается синим цветом первый узел, а второй выбранный узел указывается красным цветом, см. рисунок 6.16. Для сброса такого рода выделения используется правая кнопка мыши. Если такого рода выделение ещё не сброшено, то снова вызвать спектр можно нажатием на кнопку пробела с клавиатуры.

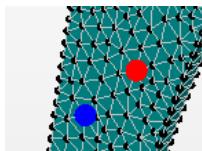


Рисунок 6.16 – Вид отображения выбранных узлов для построения относительного спектра, первый узел синим цветом, красным – второй узел

## Основная последовательность действий при проведении гармонического анализа

После построения геометрической модели, приложения силовых и кинематических воздействий, последующего набрасывания КЭ-сетки производится назначение фазы для участвующих в расчётах нагрузок и задаётся свойство демпфирования для материалов. Затем уточняется частотный диапазон для анализа на основе информации, полученной из расчёта на собственные частоты. Затем осуществляется первый запуск на расчёт с заданием нулевого демпфирования по умолчанию, выбора типа демпфирования по Релею, задания нулевого значения в параметрах для Alpha и Beta, см. рисунок 6.8.

Проводится первый просмотр результатов, по карте результатов. При этом можно даже использовать не вкладку «Статика» с рисунка 6.10, а «Анимация», используя весь

частотный диапазон для последующего отображения. Придётся подождать, пока все данные прогрузятся, после чего обратить внимание на шкалу результатов, которая перестроится исходя из максимальных достигнутых данных по выбранным компонентам. Затем при проигрывании определить частотный отсчёт, для которого будут отображены эти максимальные значения на карте результатов. Это должно быть значение одной из собственных частот. После чего отрисовкой спектра в той области, где проявлялся максимум на анимации, выявить более подробно величины интересующих вибро-значений от частоты.

## Глава 7. Расчет

Система позволяет выполнить следующие типы расчетов:

- Линейный статический расчет.
- Расчет устойчивости.
- Собственные частоты.
- Нелинейный расчет – расчет односторонних опор, геометрически нелинейный расчет, расчет контактного взаимодействия, физическая нелинейность и общий нелинейный расчет (учет геометрической и физической нелинейностей), расчет трещин – жизнь/смерть элементов.
- Усталостный расчет для случайных нагружений.
- Топологическая оптимизация.
- Расчет вынужденных колебаний.
- Расчет стационарной теплопроводности.
- Расчет нестационарной теплопроводности
- Расчет постоянных токов.
- Электростатический расчет.
- Магнитостатический расчет.
- Нестационарный электромагнитный расчет.
- Высокочастотный модальный анализ.

В этой главе дается краткое описание всех типов расчета. Их детальное теоретическое рассмотрение можно найти в книгах по методу конечных элементов.

### Линейный статический расчет

Линейный статический расчет основан на матричном методе перемещений, целью которого является определение неизвестных перемещений узлов конструкции. Основным уравнением для решения является уравнение равновесия  $K \cdot x = F$ , где  $K$  – матрица жесткости системы,  $F$  – вектор внешних силовых факторов,  $x$  – вектор неизвестных узловых перемещений. Размерность системы представляет собой количество степеней свободы конструкции. В общем случае в каждом узле 6 степеней свободы (3 линейных перемещения и 3 угла поворота). После решения данной системы, т.е. нахождения перемещений, находятся все остальные неизвестные параметры конструкции: деформации, усилия в элементах, напряжения и т.д.

В статическом расчете схема конструкции считается недеформированной, при этом продольные силы в стержнях и усилия в плоскости пластин не влияют на величины изгибающих моментов.

Результатом расчета конструкции являются:

- Перемещения узлов конструкции (линейные и угловые).
- Нагрузки на концах стержней, в узлах пластин и объёмных элементов.
- Напряжения, действующие в стержнях, пластинах и объёмных элементах.
- Распределение напряжений в произвольном сечении стержня.
- Эпюры силовых факторов для всей конструкции
- Коэффициент запаса по текучести
- Результаты усталостного расчета (коэфф. запаса и количество циклов).
- Расчетные параметры, характерные для отдельной балки, такие как: моменты изгиба, кручения; боковые и осевые силы; углы изгиба, закручивания; деформации и напряжения по длине балки. Все эти параметры, представленные в форме графиков, выводятся в системе координат стержня. В системе можно просмотреть величины как относительных деформации (перемещения относительно линии, соединяющей два деформированных конца стержня) так и величины полной деформации. В случае, когда конструкция состоит из единственной балки, графики перемещений и значения абсолютных и относительных перемещений совпадают.
- Реакции (силы и моменты), действующие в опорах конструкции.
- Масса всей конструкции.

## Расчет устойчивости

Расчет на устойчивость (по Эйлеру) относится к конструкциям, все элементы которых под действием заданной нагрузки находятся в безызгибном состоянии, т.е. работают на растяжение – сжатие. Для каждой конструкции при заданной схеме нагружения существует определенная величина нагрузки, при которой исходная форма равновесия становится неустойчивой. Становится возможным другое деформированное состояние, также являющееся состоянием равновесия. Выход системы из первоначального состояния равновесия мы называем потерей устойчивостью по Эйлеру. Нагрузка, при которой возможно существование новой устойчивой формы называется критической нагрузкой.

При расчете конструкций нагрузка приводится к узлам. Вектор узловых сил  $P$  представляется в виде  $P = p \cdot F$ , где  $p$  – скалярная величина, называемая параметром нагружения,  $F$  – вектор внешней нагрузки. Таким образом, рассматривается простое нагружение, при котором все нагрузки изменяются пропорционально одному параметру нагружения  $p$ .

Результатом расчета является коэффициент запаса устойчивости, показывающий, во сколько раз нужно увеличить внешнюю нагрузку (все силовые факторы одновременно), чтобы система потеряла устойчивость и форма потери устойчивости. Расчет на устойчивость выполняется вместе со статическим расчетом, поскольку для его проведения необходимо знать осевые усилия в стержнях и напряжения в плоскости пластин, которые рассчитываются в статическом расчете. Расчет устойчивости (по Эйлеру) так же, как и статический расчет ведется по недеформированной схеме конструкции.

Математически задача устойчивости формулируется как задача на собственные значения.

$$(K + \lambda \cdot L) \cdot \bar{\Delta} = 0$$

где  $K$  – матрица жесткости,  $L$  – геометрическая матрица,  $\lambda$  – критический параметр нагружения,  $\Delta$  – собственный вектор перемещений.

### Геометрически нелинейный расчет

На практике предположения о малости перемещений, используемые в линейном статическом анализе, часто приводят к неправильным результатам даже при малых деформациях, не превышающих предел упругости материала конструкции. При точном определении перемещений ряда конструкций может оказаться необходимым учет геометрической нелинейности. Например, мембранные напряжения, которыми обычно пренебрегают при изгибе пластин, могут явиться причиной значительного уменьшения перемещений даже при малых деформациях. С другой стороны, может оказаться, что нагрузка, при которой прогиб увеличивается, достигается быстрее, чем это предсказывается линейной теорией, и может возникнуть ситуация, в которой при продолжающемся деформировании несущая способность будет падать.

В линейном статическом расчете принимается линейное соотношение между деформациями и перемещениями внутри элемента:

$$\{\varepsilon\} = [B_0] \cdot \{q\}$$

где  $q$  – вектор узловых перемещений.

При учёте нелинейного поведения выражение для деформаций можно переписать в виде:

$$\{\varepsilon\} = ([B_0] + [B_{NL}(q)]) \cdot \{q\}$$

Нелинейный член возникает из полной записи тензора деформаций:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i} \cdot u_{k,j}}{2}$$

Отсюда видно, что решение нелинейной задачи не может быть получено из однократного решения матричного уравнения конечных элементов  $Kx = F$ , т.к. теперь матрица жёсткости ансамбля КЭ зависит от перемещений. Из условия равенства внешней и внутренней работ получается нелинейное матричное уравнение, которое может быть решено итерационным методом Ньютона-Рафсона. В уравнение входит матрица начальных напряжений, или геометрическая матрица, используемая в расчете на начальную устойчивость, и матрица больших перемещений.

В качестве критерия достижения решения используется максимальное значение относительной невязки по внутренним силовым факторам в элементах. Пользователь может управлять расчетом, задавая точность и максимальное количество итераций.

Для поиска решения в приращениях на каждом шаге итераций необходимо решать линейное уравнение вида:

$$[K_T(\{q_i\})] \cdot \Delta\{q\} = \Delta\{F\}$$

где  $\Delta\{q\}$  – искомый вектор приращения перемещений,

$\Delta\{F\}$  – вектор невязки по силам,

$\{q_i\}$  – вектор перемещений на текущем шаге

$[K_T]$  – тангенциальная матрица, зависящая от перемещений.

Тангенциальную матрицу можно представить в виде

$$[K_T] = [K_0] + [K_\sigma] + [K_L]$$

Здесь  $[K_0]$  – матрица жесткости малых деформаций,

$[K_\sigma]$  – геометрическая матрица (матрица начальных напряжений).

$[K_L]$  – матрица больших перемещений (дополнительная матрица, зависящая от перемещений и учитывающая вклад от нелинейных деформаций).

Учитывая трудоемкость нахождения матрицы больших перемещений  $[K_L]$ , для практической реализации удобнее использовать подход разделения полного перемещения системы на перемещения как жесткого целого и деформационные.

$$\{q^l\} = \{q_r^l\} + \{q_d^l\}$$

где  $\{q^l\}$  – вектор полных перемещений элемента,



$\{q_r^l\}$  – вектор перемещений элемента как жесткого целого,

$\{q_d^l\}$  – вектор деформационных (вызывающих деформации) перемещений элемента.

Известно, что поле перемещений элемента можно представить как последовательные поворот и изменение формы. Деформационные перемещения, связанные с изменением формы, можно получить из полных перемещений через матрицу поворота  $[R]$ :

$$\{q_d\} = [R](\{x\} + \{q\}) - \{x\}$$

$\{q_d\}$  – поступательная часть деформационных перемещений,

$[R]$  – матрица поворота из исходного состояния в текущее,

$\{x\}$  – вектор положения (координат) точки в исходном состоянии в глобальной системе координат,

$\{q\}$  – вектор полных перемещений в глобальной системе координат.

Матрицу поворота  $[R]$  можно получить непосредственно по полю перемещений, а для некоторых элементов, например, прямолинейных балочных, усредняя угловые перемещения в узлах. Для малых деформаций, используя введенную матрицу поворота  $[R]$ , тангенциальную матрицу жесткости элемента можно записать в следующем виде:

$$[K_r^l] = \int [T]^T [B]^T [D] [B] [T] dV$$

$[D]$  – матрица упругих констант материала,

$[B]$  – обычная матрица, связывающая малые деформации с узловыми перемещениями,

$[T]$  – матрица перехода в текущее деформированное положение.

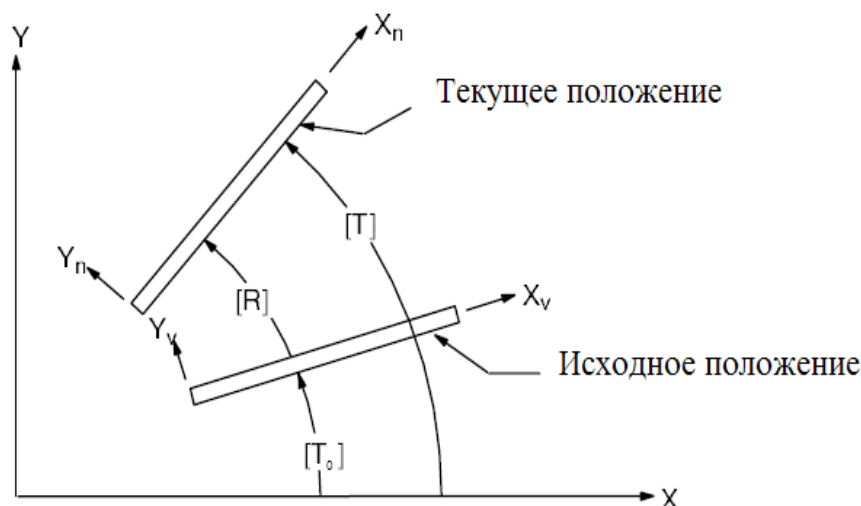


Рисунок 7.1 – График зависимости перемещений от параметра нагрузки

Матрица  $[T]$  перехода в текущее деформированное положение связана с исходным положением и относительным поворотом очевидным соотношением  $[T] = [T_0][R]$ .

Аналогичным образом можно записать вектор узловых усилий элемента:

$$[F^l] = \int [T]^T [B]^T [D] \{\varepsilon^l\} dV$$

где  $\{\varepsilon^l\} = [B]\{q_d\}$  и  $\{q_d\}$  – векторы упругих деформаций и деформационных узловых перемещений в деформированном (повернутом) положении.

### Физически нелинейный расчет

Предполагается наличие нелинейной связи между напряжениями и деформациями в материале. Связь задается в виде графика такой зависимости  $\{\sigma\} = [D(\varepsilon)] \cdot \{\varepsilon\}$ . Кроме того, можно выбрать некоторые частные случаи модели поведения материала (идеально пластичный, билинейный). Задание свойств физической нелинейности материала выполняется в диалоге Материалы в режиме редактирования свойств выбранного материала, команда Свойства | Материалы. В настоящей версии этот тип расчета реализован только для твердотельных элементов.

Расчет с учетом физической нелинейности проводится в рамках нелинейного расчета в предположении малых перемещений. Результатом физически нелинейного расчета являются все компоненты доступные после статического расчета, а также компоненты упругих и пластических деформаций.

## Расчет контактного взаимодействия

Расчет контактного взаимодействия проводится в рамках нелинейного расчета, в предположении малых перемещений и упругих деформаций. В процессе расчета создаются фиктивные элементы, связывающие контактирующие поверхности, и, в зависимости от взаимного перемещения узлов элементов, на каждой итерации уточняются усилия в контактной области и проводится статический расчет. Критерием сходимости является условие минимального взаимного проникновения объектов.

Результатом расчета контактного взаимодействия являются все компоненты доступные после статического расчета, а также карта распределения нормальных и тангенциальных сил, взаимного проникновения и состояния контактных элементов в контактной области.

## Общий нелинейный расчет

Общий нелинейный расчет является нелинейным расчетом, включающем в себя учет геометрической и физической нелинейности одновременно. При расчете сборок (наличии контактных зон) учитывается и контактное взаимодействие. Для его проведения используемым материалам необходимо задать свойство физической нелинейности (график зависимости напряжений от деформаций) точно также, как и для физически нелинейного расчета. Решение нелинейного матричного уравнение выполняется итерационным методом Ньютона-Рафсона.

## Трещины – XFEM

### **Краткие теоретические сведения**

Функциональный компонент "Трещины - XFEM" предназначен для встраивания трещины заданных размеров в КЭ-модель. Он позволяет инженеру-расчетчику провести анализ конструкций на статическую трещиностойкость на этапе эксплуатации.

### **Система координат, связанная с трещиной**

Предполагается, что трещина имеет нулевую высоту (раскрытие), и моделируется поверхностью разрыва.

В каждой точке фронта трещины можно ввести систему координат (рисунок 7.2):

- Ось  $z_1$  направлена перпендикулярно фронту и лежит в плоскости, касательной к трещине в данной точке фронта;
- Ось  $z_3$  направлена по касательной к фронту;
- Ось  $z_2$  перпендикулярна осям  $z_1$  и  $z_3$ .

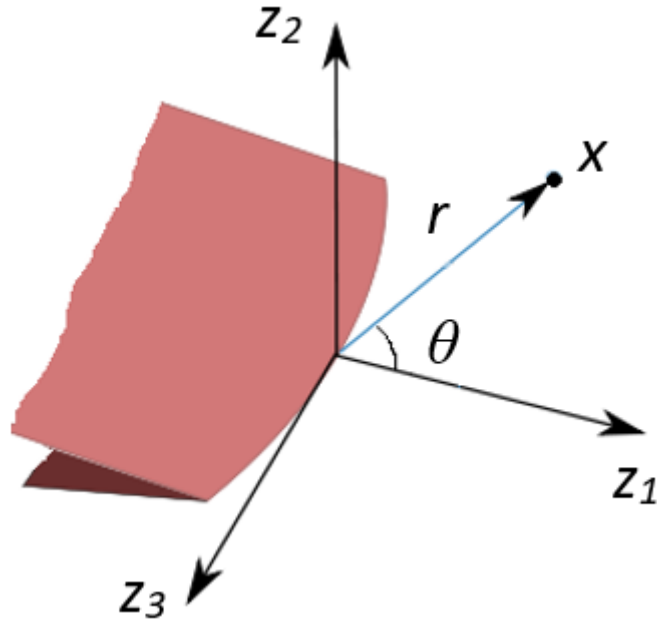


Рисунок 7.2 – Система координат в точке фронта трещины

Каждой точке  $x$ , лежащей в плоскости  $z_1 z_2$ , можно сопоставить расстояние до фронта  $r$  и угол  $\theta$ .

### Характер напряжений в окрестности фронта

В рамках ЛУМР в окрестности фронта трещины напряжения имеют особенность типа единица на корень из  $r$

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{f_{ij}(\theta)}{\sqrt{2\pi r}} + \dots$$

То есть по мере приближения к фронту трещины напряжения резко возрастают. Картина напряжений у фронта трещины показана на рисунке 7.3.



Рисунок 7.3 – Напряжения у фронта трещины

Количественной мерой этой особенности являются коэффициенты интенсивности напряжений (КИН)

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{22}(r, 0)$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{21}(r, 0)$$

$$K_{III} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{23}(r, 0)$$

Деформации, при которых только один КИН отличен от нуля, а остальные два – нулевые, изображены на рисунке 7.4.

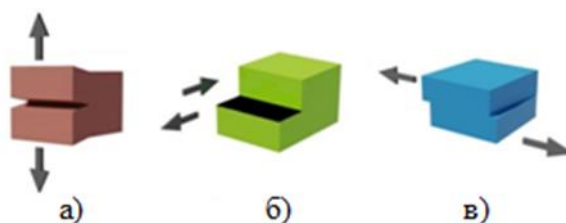


Рисунок 7.4 – Типы трещин. а) трещина отрыва, б) трещина поперечного сдвига, в) трещина продольного сдвига

### Описание XFEM

XFEM отличается от стандартного МКЭ наличием дополнительных базисных функций, которые позволяют аппроксимировать разрыв перемещений на поверхности трещин, а также перемещения в окрестности фронта. В публикациях по XFEM используются различные дополнительные базисные функции.

### *Вычисление координат, связанных с фронтом*

Пусть  $s$  обозначает длину участка фронта от начала до заданной точки на фронте. В дальнейшем нам потребуется построить отображение, ставящее в соответствие любой точке  $x$  из некоторой окрестности фронта тройку чисел  $(s, r, \theta)$ . Вычисление координат  $s, r, \theta$  производится следующим образом (графическое пояснение к пунктам по вычислению координат  $s, r, \theta$  дано на рисунке 7.5):

1. Определяется отрезок фронта, которому соответствует точка  $x$  (для этого в узлах фронта строим плоскости, относительно которых направления смежных отрезков фронта симметричны, и затем определяем, между какими из этих плоскостей находится  $x$ ).
2. Интерполируя плоскости в пределах данного отрезка фронта, находим точку  $x_f$ , находящуюся на фронте, соответствующую точке  $x$ , и затем по  $x_f$  вычисляем  $s$ .
3.  $r$  равняется расстоянию от  $x$  до  $x_f$ .
4. Строим окружность радиуса  $r$  с центром в  $x_f$ , лежащую в плоскости, найденной интерполяцией на шаге 2, и находим точку  $x_c$  пересечения этой окружности с трещиной.
5.  $\theta$  – это угол между векторами  $x - x_f$  и  $x - x_c$ .

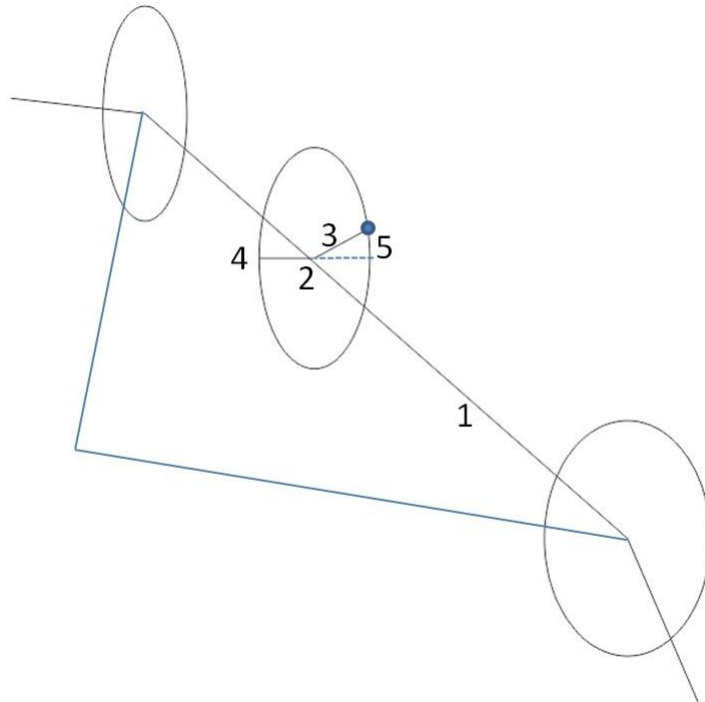


Рисунок 7.5 – Схематизация фронта трещины

### ***Аппроксимация поля перемещений***

Введём следующие обозначения:

$N$  – количество узлов модели,

$\{\varphi_i, i = 1, \dots, N\}$  – набор базисных функций обычного МКЭ, соответствующего модели без трещины,

$d_{max}$  – максимальное расстояние между узлами в одном элементе,

$$R_{SE}^{min} = 1.02 d_{max},$$

$$R_{SE}^{max} = 1.5 R_{SE}^{min},$$

$\gamma(r)$  – срезающая функция, такая, что  $\gamma(r) = 1$  при  $r < R_{SE}^{min}$ ,  $\gamma(r) = 0$  при  $r > R_{SE}^{max}$ , на отрезке  $[R_{SE}^{min}, R_{SE}^{max}]$   $\gamma$  плавно переходит от 1 к 0,

$I_S$  – множество номеров узлов, отстоящих от фронта на расстояние не более  $R_{SE}^{min}$ ,

$H$  – функция Хевисайда (равная 1 по одну сторону трещины и -1 – по другую),

$I_H$  – множество номеров узлов, принадлежащих элементам, которые пересекаются с трещиной, но при этом не принадлежащих  $I_S$ ,

$$T(r, \theta) = r^{1/2} \sin(\theta/2),$$

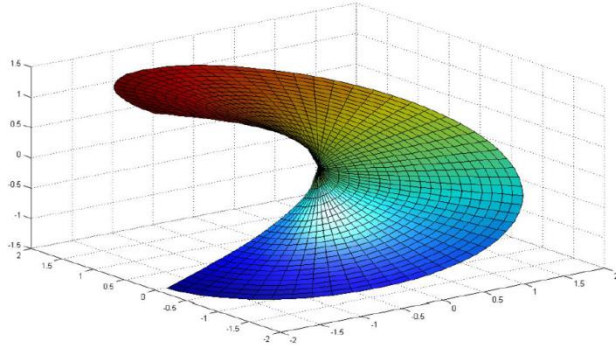


Рисунок 7.6 –  $T(r, \theta)$

$S$  – длина фронта трещины,

$\{s_i, i = 1, \dots, M\}$  – некоторые точки на отрезке  $[0, S]$ ,

$L_j(s)$  – кусочно-линейные функции, равные  $\delta_{ij}$  в точках  $\{s_i, i = 1, \dots, M\}$ , где

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i = j \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}.$$

Базис XFEM образуют функции:

$$\{\psi_i(x), i = 1, \dots, N_{XFEM}\} = \{\varphi_i(x), i = 1, \dots, N\} \cup \{H(x)\varphi_i(x), i \in I_H\} \cup \\ \cup \{L_j(s(x))\gamma(r(x))T(r(x), \theta(x)), j = 1, \dots, M\}$$

Нумерация функций  $\psi_i$  – в порядке вхождения в данную формулу.

Перемещения ищутся в виде:

$$u_d(x) = \sum_{i=1, \dots, N_{XFEM}} u_{di} \psi_i(x), \quad d = 1, 2, 3,$$

где  $u_{di}$  – неизвестные.

### **Построение СЛАУ**

Исходные уравнения (знак суммы по повторяющимся индексам не пишем):

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} = 0, \quad j = 1, 2, 3$$

Как и в обычном МКЭ, неизвестные определяются из условия ортогональности невязки базисным функциям. Домножаем на  $\psi_k$  и интегрируем по всей области

$$F_{jk} = \int_{\Omega} \frac{\partial \sigma_{ij}(u(x))}{\partial x_i} \psi_k d\Omega = 0, \quad j = 1, 2, 3, \quad k = 1, \dots, N_{XFEM}$$

Отсюда получаем СЛАУ для  $u_{di}$ .

Учёт закреплений производится следующим образом: допустим, зафиксирована степень свободы номер  $d$  в узле номер  $n$ . Тогда вместо уравнения  $F_{dn} = 0$  добавляем к СЛАУ уравнение  $u_{dn} = 0$ .

## **Сравнение с другими методами**

Так как перемещения и напряжения имеют особенность вблизи фронта, если просто встроить трещину в КЭ-сетку и провести расчет обычным МКЭ, то получатся неточные результаты. Необходимо сгущать сетку в окрестности фронта. Для этого можно воспользоваться функциональным компонентом "Встроить трещину в модель (4 узловые тетраэдры)", реализованным в APM Structure 3D.

### ***Основные преимущества XFEM***

1. Не требуется встраивание трещины в конечно-элементную сетку и не требуется перестроение сетки при моделировании роста трещины.
2. Высокая точность аппроксимации перемещений и напряжений.

### ***Недостатки***

Формирование СЛАУ идёт медленно из-за необходимости интегрирования в цилиндрических координатах без использования квадратур Гаусса функций с особенностью (при интегрировании в цилиндрических координатах особенность исчезает).

### **Требования к модели**

- В настоящее время метод XFEM реализован только для моделей, полностью состоящих из тетраэдров.
- Модель должна вся состоять из одного материала.
- В данной версии XFEM поддерживает только одно нагружение.
- Трещины моделируются поверхностями, состоящими из треугольных пластин.
- Узлы и пластины, соответствующие трещинам, должны находиться в слое "Трещины".
- Номера узлов трещины должны быть больше номеров узлов модели.
- Поддерживаются закрепления по трём направлениям.
- Запрет поворотов не поддерживается.
- Поддерживаются давления на объёмные элементы и узловые нагрузки.

### **Результаты расчета**

В результате расчета пользователь получает следующую информацию:

- карты перемещений и напряжений,
- значения КИН в центрах отрезков фронта трещины,
- информацию о том, будет ли расти трещина для каждого отрезка фронта,



- информацию о том, будет ли трещина расти хотя бы на одном отрезке фронта,
- величину раскрытия трещины.

## Трещины – жизнь/смерть элементов

### Краткие теоретические сведения

Данный функциональный компонент позволяет инженеру-расчетчику провести анализ конструкций на прочность и трещиностойкость на этапе проектирования, что приводит к существенному сокращению издержек производства, связанных с проведением натуральных испытаний.

Для анализа конструкций на прочность используются следующие теории прочности:

- теория максимальных касательных напряжений (III теория прочности);
- теория формоизменения (IV теория прочности);
- теория Мора (V теория прочности).

Напряжения в вершине трещины могут достигать критических значений (превышающих предел прочности в несколько раз), поэтому для анализа материала на трещиностойкость в вершине трещины используются инструменты линейной упругой механики разрушения (ЛУМР), а именно:

- критическое значение интенсивности выделения энергии с учетом трех типов трещин ( $G_{CSolve}$ );
- комбинированный параметр (теория Гриффитса плюс энергия формоизменения) с учетом трех типов трещин ( $U_{CSolve}$ ).

Типы трещин показаны на рисунке 7.7.

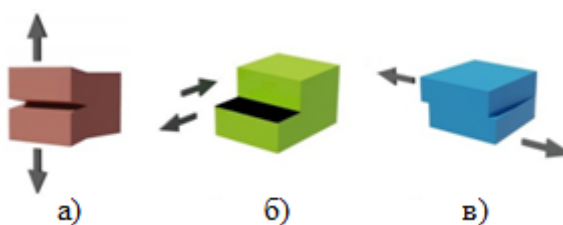


Рисунок 7.7 – Типы трещин.

а) трещина отрыва, б) трещина поперечного сдвига, в) трещина продольного сдвига

Перечисленные инструменты дают достоверные значения в том случае если:

- зона пластичности у вершины трещины не превышает 20% длины трещины (маломасштабная текучесть). Т.е. поддерживаются, например, такие материалы как чугун, дюраль, многие легированные стали, стекло,

керамика, сухое дерево, бетон. Если зона пластичности у вершины трещины больше 20% длины трещины (крупномасштабная текучесть), то инструменты ЛУМР использовать нельзя;

- относительное удлинение образца после разрыва  $\delta$  не превышает 20% (по ГОСТ 25.506-85);
- разрушающее напряжение в нетто-сечении образца не превышает 0.8 предела текучести материала, определенного на гладких образцах.

Анализ проводится для следующих типов КЭ:

Пластинчатые КЭ:

- 3-х угольная пластина;
- 4-х угольная пластина;

Объемные КЭ:

- 4-х узловой тетраэдр;
- 5-ти узловая пирамида;
- 6-ти узловая призма;
- 8-ми узловой гексаэдр.

А также их комбинации.

Поддерживаются следующие материалы:

- Изотропные;
- Ортотропные;
- Анизотропные;
- С армированными элементами.

Для достижения статуса "Смерть" КЭ деактивируется путем умножения части матрицы жесткости, отвечающей за перемещения в направлении раскрытия трещины, на резко сокращающийся фактор (ESTIF). Этот фактор имеет значение 2.0E-3. Напряжения в элементе становится равным нулю.

Для анализа на прочность используются три теории:

- теория формоизменения (хорошо согласуется с квазихрупкими материалами)

$$S_{solve(IV)} = \sqrt{\frac{1}{2}((S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_1 - S_3)^2)}$$

где  $S_1, S_2, S_3$  – главные напряжения;

- максимальных касательных напряжений (хорошо согласуется с квазихрупкими материалами)

$$\tau_{solve(III)} = \frac{S_1 - S_3}{2}$$

- теория Мора (хорошо согласуется с хрупкими материалами)

$$S_{solve(V)} = S_1 - \frac{\sigma_+}{\sigma_-} S_3$$

где:

$\sigma_+$  – предел прочности на растяжение,

$\sigma_-$  – предел прочности на сжатие;

Для зарождения трещины должно выполняться одно из условий:

$$S_{solve(IV)} > S_{critical},$$

$$\tau_{solve(III)} > \tau_{critical},$$

$$S_{solve(V)} > S_{critical},$$

где:

$S_{critical}$  – предел прочности на растяжение,

$\tau_{critical}$  – предел текучести по сдвигу.

После образования трещины (если выполняется одно из условий), автоматически вычисляется критическое значение КИН ( $K_{ICsolve}$ ,  $K_{IICsolve}$ ,  $K_{IIICsolve}$ ) для каждого типа трещины, показанных на рисунке 7.7. Для этого используются механические свойства материала (предел текучести  $\sigma_{yield}$ ) и рекомендации из ГОСТ 25.506-85.

Автоматическое вычисление условного критического значения КИН для трещины 1-го типа выполняется по формуле:

$$K_{ICsolve} \cong 0,65 \sigma_{yield} \sqrt{\pi \sqrt{area}}$$

Для трещины 2-го типа по формуле:

$$K_{IICsolve} \cong 0,65 \tau_{yield} \sqrt{\pi \sqrt{area}}$$

Для трещины 3-го типа по формуле

$$K_{IIICsolve} \cong 0,65 \tau_{yield} \sqrt{\pi \sqrt{area}}$$

где:

$\sigma_{yield}$  – предел текучести при растяжении,

$\tau_{yield}$  – предел текучести по сдвигу,

$area$  – поверхность трещины в плоскости  $\alpha$ , образованной единичными векторами  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$ . Плоскость  $\alpha$  показана на рисунке 7.8

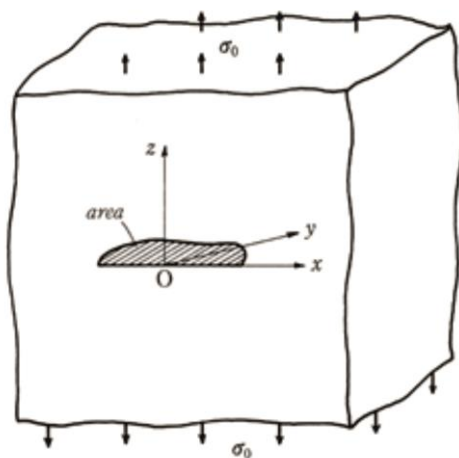


Рисунок 7.8 – Плоскость  $\alpha$  в произвольной трещине

Критические значения КИН для каждого типа трещины конвертируются в значения интенсивности выделения энергий (удельная работа разрушения) для случая ПДС ( $G_{ICsolve}$ ,  $G_{IICsolve}$ ,  $G_{IIICsolve}$ ). Поскольку, при ПДС разрушающие напряжения ниже, чем при ПНС.

Затем, вычисляется критическое значение интенсивности выделения энергии  $G_{Csolve}$  с учетом всех трех типов трещин по формуле:

$$G_{Csolve} = \frac{1 - \mu^2}{E} (K_{ICsolve}^2 + K_{IICsolve}^2) + \frac{1 - \mu}{E} K_{IIICsolve}^2$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона,

$E$  – модуль упругости.

В вершине трещины текущее значение энергии деформаций вычисляется путем использования теорий Гриффитса и энергии формоизменения (четвертая теория прочности):

$$U_{Csolve} = \pi \left( \frac{1 + \mu}{6E} ((S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2) V_{FE} \right) / area_{FE}$$

где:

$V_{FE}$  – объем КЭ;

$area_{FE}$  – площадь геометрической фигуры, полученной пересечением ребер КЭ с плоскостью  $\alpha$ .

Коэффициент  $\pi$  используется для учета неоднородности материала и полей напряжений у вершины трещины.

Геометрическая фигура, полученная пересечением плоскости  $\alpha$  с ребрами КЭ (на примере 4-х узлового тетраэдра) показана на рисунке 7.9 ( $area_{FE} = S_{ABC}$ , где  $S_{ABC}$  – площадь треугольника  $ABC$ ).

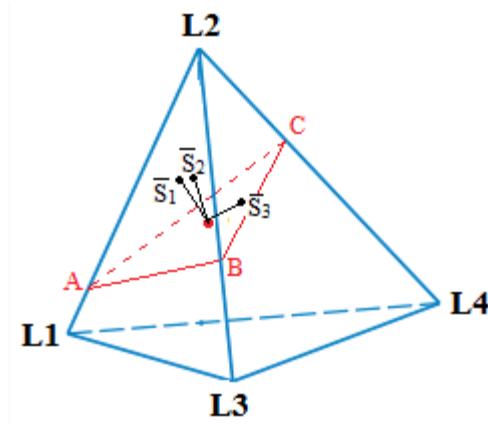


Рисунок 7.9 – Геометрическая фигура в форме треугольника  $ABC$ , полученная пересечением плоскости  $\alpha$  с ребрами КЭ

В данном случае плоскость  $\alpha$  образуется по двум векторам главных напряжений ( $\overline{S_2}$  и  $\overline{S_3}$ ) в рассматриваемом узле вершины трещины.

В общем случае, для зарождения или распространения трещины необходимо выполнение одного из условий. При этом КЭ ослабляется на величину  $ESTIF$ .

Полное разрушение детали с трещиной произойдет в том случае, если

$$\frac{U_{Csolve}}{G_{Csolve}} > 1$$

Когда условия зарождения или распространения трещины и условие полного разрушения детали не выполняются, то разрушения не происходит и рассматриваемый КЭ ослабляется на величину:

$$ESTIF = \frac{G_{Csolve}}{U_{Csolve}}$$

Анализ идет до тех пор, пока:

1) Максимальное количество итераций нелинейного расчета не достигнет предельного значения (рисунок 7.10).

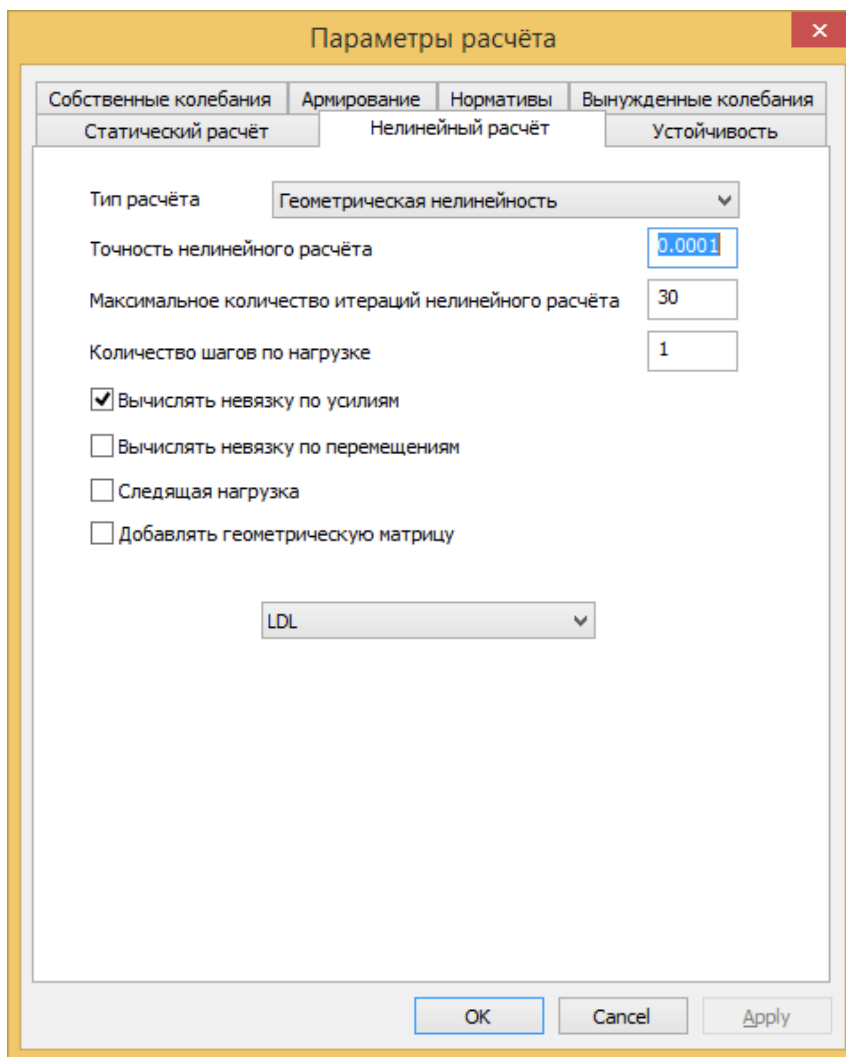


Рисунок 7.10 – Диалоговое окно задания количества итераций

2) Суммарные перемещения текущей итераций  $U_i$  не превышают 10-ти кратные суммарные перемещения предыдущей  $U_{i-1}$

$$U_i \leq 10 \cdot U_{i-1}$$

3) Выполняется условие зарождения или распространения трещины.

4) Выполняется условие при котором начинается неконтролируемый рост трещины, и конструкция разрушается полностью. Процесс анализа на трещиностойкость не прекращается, он продолжается до тех пор, пока не выполнится условие 2 или 1. Это сделано с целью показать путь распространения неконтролируемой трещины.

### Вызов в APM Structure 3D

Меню Расчеты | Расчет | Нелинейный расчет | Трещины – жизнь/смерть элементов

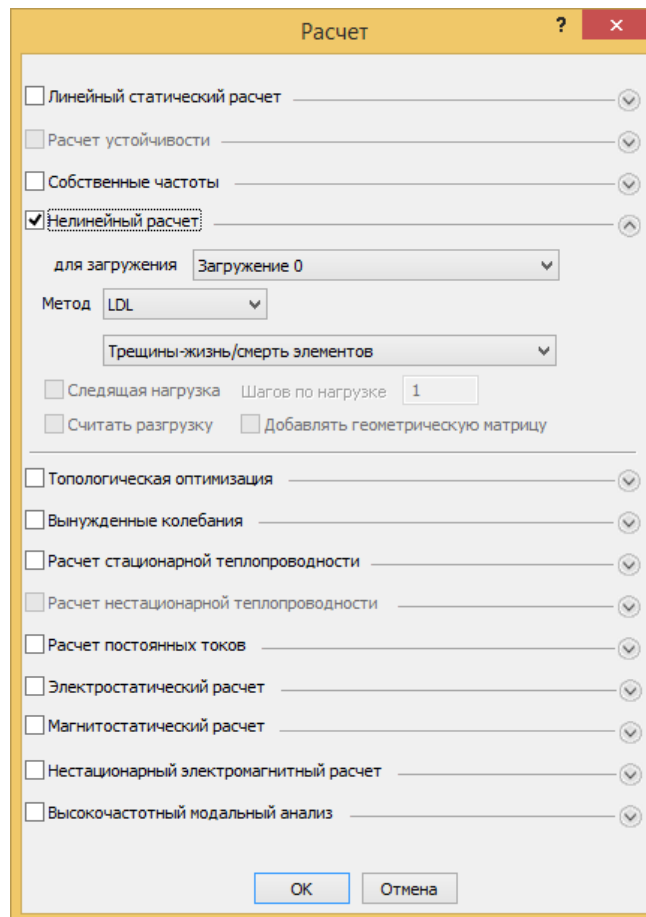


Рисунок 7.11 – Диалоговое окно "Расчет"

Результаты расчета доступны в меню Результаты | Карта результатов...

В открывшемся диалоговом окне "Параметры вывода результатов" (рисунок 7.12) в раскрывающемся списке "Тип расчета" следует выбрать "Распространение трещины". Во вкладке "Статика" можно выбрать номер шага (напротив "Шаг") для просмотра типа результатов (напротив "Тип результатов"). Вкладка "Анимация" (рисунок 7.13) позволяет посмотреть анимацию процесса зарождения и распространения трещины/трещин.

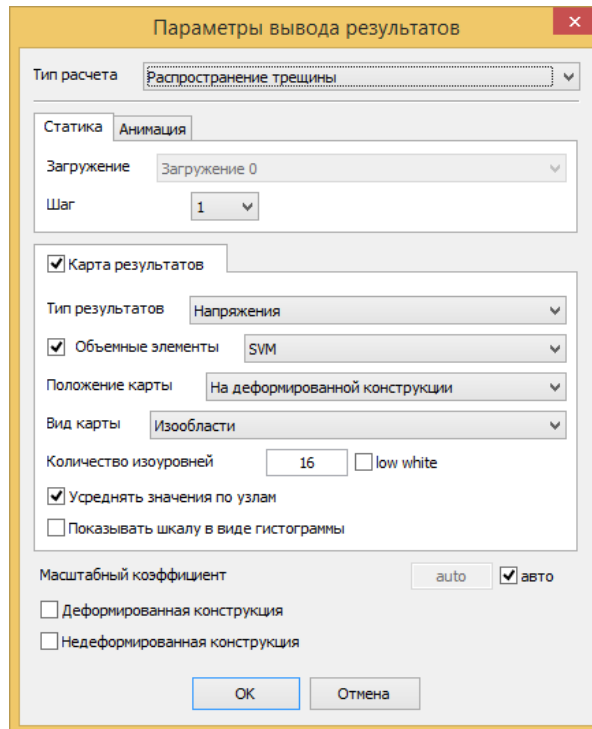


Рисунок 7.12 – Диалоговое окно "Параметры вывода результатов" вкладка "Статика"

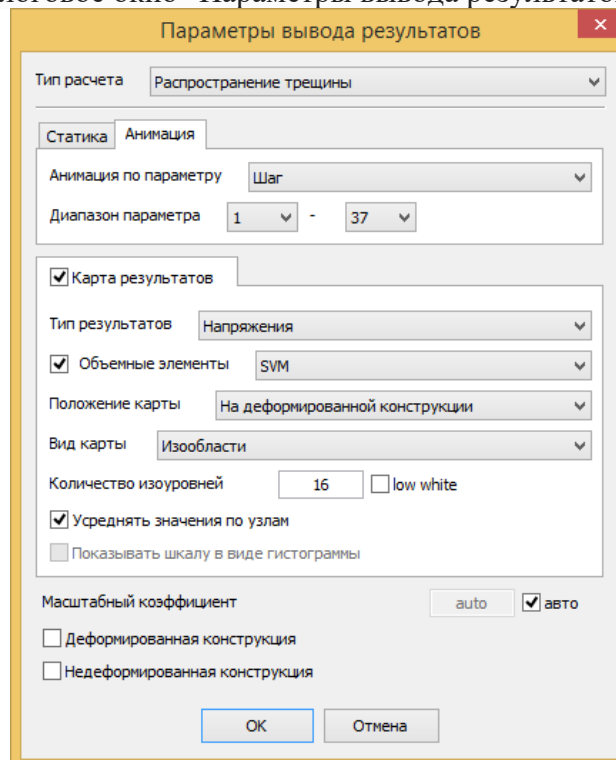


Рисунок 7.13 – Диалоговое окно "Параметры вывода результатов" вкладка "Анимация"

## Конструктивный элемент «Канат»

### Общие сведения

Канаты, являясь конструктивным элементом, применяются в зданиях и сооружениях различного назначения. Наибольшее распространение подобные элементы находят при проектировании мостовых конструкций, оттяжек, в качестве вертикальных



и горизонтальных крестовых связей промышленных, гражданских зданий и сооружений, а также для раскрепления башен, мачт и прочих аналогичных конструкций.

Конструктивный элемент «Канат» является особым типом несущего элемента, так как при выполнении расчетов, от действия внешних нагрузок в поперечных сечениях каната могут возникать только растягивающие усилия, что в некоторой степени усложняет порядок расчета зданий и сооружений, содержащих в составе несущего каркаса канаты. Функционал, описанный ниже, позволяет в значительной степени упростить последовательность расчета и оценки результатов в конструкциях, использующих в качестве несущего элемента канаты.

### **Назначение параметров расчета**

#### ***Моделирование***

Начальным этапом выполнения расчетов канатов является процесс их моделирования в программном комплексе. Процесс моделирования каната выполняется с помощью функционала, позволяющего моделировать стержневые конечные элементы – функция «Стержень» на панели «Рисовать». Стоит заметить, что выполнять разбиение стержня, впоследствии моделирующего канат, на промежуточные конечные элементы не следует.

После завершения процесса моделирования – создания в расчетной модели всех элементов, работающих как канаты, им необходимо назначить соответствующие свойства. Для этого необходимо выделить все элементы, которым необходимо назначить свойства каната, перейти «Свойства» → «Тип стержневых элементов», в выпадающем списке выбрать «Канат», а затем нажать кнопку «Приписать выделенным».

Таким образом, смоделированные стержневые элементы обладают свойствами канатов, которые будут учитываться при выполнении расчетов.

#### ***Нагрузки***

Корректный учёт работы канатов в составе расчетной модели требует выполнения определённых правил при формировании загрузок и их комбинаций.

Задание нагрузок является следующим этапом после непосредственного моделирования канатов. Для этого необходимо создать новое нагружение, в которое будет включена нагрузка на канаты.

После создания нагружения, на элементы «Канаты» задаётся нагрузка нажатием кнопки «Предварительная деформация» на панели «Нагрузки». В появившемся окне пользователю необходимо назначить нагрузку на канаты, которая может быть задана в виде относительной деформации, начальной длины каната, силы натяжения или

напряжения. Стоит отметить, что хотя бы одна из вышеперечисленных нагрузок должна быть известна пользователю для выполнения соответствующих расчетов.

Следующим этапом является процесс задания комбинации загружений, в которую, должны быть включены только загружения, в которых заданы нагрузки от собственного веса конструкций, а также загружение, в котором задана предварительная деформация каната.

После этого пользователю необходимо приступить к формированию расчетных комбинаций загружений, при этом в каждую из создаваемых комбинаций обязательно необходимо включить загружение, содержащее предварительную деформацию канатов.

### **Диалог «Расчет»**

После выполнения вышеописанных действий, связанных с моделированием канатов, формированием нагрузок, загружений, а также комбинаций загружений, необходимо назначить параметры расчета. Для этого следует нажать кнопку «Расчеты» → «Расчет» и выбрать в представленном списке «Нелинейный расчет». В выпадающем списке следует выбрать тип нелинейного расчета «Односторонние опоры и канаты», а затем установить флажок «Натяжение каната соответствует» и в выпадающем списке выбрать комбинацию загружений, содержащую только загружения от собственного веса конструкций и предварительной деформации канатов. В выпадающем списке «Расчет для загружения» необходимо установить флажки с комбинациями загружений или отдельными загружениями, для которых требуется учесть корректную работу канатов.

### ***Графическое представление результатов***

Графическое представление результатов доступно после выполнения соответствующих нелинейных расчетов зданий и сооружений с учётом работы канатов.

Отображение результатов расчета элементов выполняется в меню «Результаты» → «Карта результатов». В появившемся окне в выпадающем списке «Тип расчета» указываются требуемые результаты – «Нелинейный расчет односторонних опор и канатов», которые должны быть представлены в графическом виде, на основании выполненного расчета.

## Расчет на собственные частоты

Расчет на собственные частоты конструкции ведется с учетом распределенной матрицы масс. Расчет заключается в решение обобщенной задачи на собственные значения:

$$(-\omega^2 \cdot M + K) \cdot \bar{\Delta} = 0$$

где:  $\omega$  – круговая собственная частота,  $M$  – матрица масс,  $K$  – матрица жесткости конструкции,  $\Delta$  – вектор собственной формы.

## Расчет вынужденных колебаний.

### Краткие теоретические сведения

При расчете на вынужденные колебания считается, что конструкция подвержена действию силовых факторов, изменяющихся во времени по определенному закону. Основным уравнением, описывающим поведение системы, является уравнение равновесия:

$$M \cdot \ddot{\Delta} + C \cdot \dot{\Delta} + K \cdot \Delta = P(t)$$

где:  $M$  – матрица масс системы,  $C$  – матрица демпфирования,  $K$  – матрица жесткости,  $\Delta$  – вектор узловых перемещений конструкции,  $P(t)$  – вектор внешней нагрузки, зависящий от времени.

### Метод разложения по собственным формам

Для приближенного учета демпфирования матрица  $C$  представляется в виде линейной комбинации матриц  $K$  и  $M$ :

$$C = \beta_1 \cdot K + \beta_2 \cdot M$$

где: коэффициенты  $\beta_1$  и  $\beta_2$  подбираются таким образом, чтобы при различных собственных частотах декременты колебаний были постоянны. Этим обеспечивается частотно-независимое демпфирование, характерное для многих строительных материалов и конструкций.

Согласно записи уравнения равновесия все силовые факторы изменяются по одному закону. При решении этой задачи используется метод разложения решения в ряд по собственным формам колебания конструкции:

$$\Delta = \sum_{i=0}^n v_i q_i(t)$$

где  $v_i$  – вектор  $i$ -той собственной формы,  $q_i$  – обобщенное перемещение по  $i$ -той форме.

Используя такое представление, исходное матричное уравнение сводится к  $n$  независимым уравнениям типа:

$$\ddot{q}_i + \gamma \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = \frac{Q_i(t)}{M_k}$$

где  $\omega_i$  – частота колебаний по  $i$ -той форме,

$\gamma$  – коэффициент неупругого сопротивления, который в свою очередь можно представить в виде  $\gamma = \delta/\pi$ , где  $\delta$  – логарифмический декремент колебаний, численно равный логарифму отношения амплитуд для двух моментов времени, отличающихся на период  $\delta = \ln\left(\frac{A_i}{A_{i+1}}\right)$ .

$M_i = v_i^T M v_i$  – обобщенная масса для  $i$ -й формы колебаний,

$Q_i = v_i^T P$  – обобщенная нагрузка для  $i$ -й формы.

Задача решается исходя из нулевых начальных условий с помощью интеграла Дюамеля.

$$q_i = A_i e^{-n_i t} \sin(\omega_i t + \varphi_{0i}) + \frac{1}{M_i \omega_i} \int_0^t Q_i(\tau) e^{-n_i(t-\tau)} \sin(\omega_i(t-\tau)) d\tau$$

где  $A_i$  и  $\varphi_{0i}$  определяются из начальных условий,

$$n_i = \frac{\pi \gamma}{T_i} = \frac{\gamma \omega_i}{2} = \frac{\delta \omega_i}{2\pi}$$

Для большинства нагрузок вклад в решение различных форм колебаний уменьшается с ростом номера частоты  $i$ . В практических расчетах учитывают 3-5 первых форм колебаний. Закон изменения нагрузки от времени задается в виде графика с помощью команды Нагрузки | График Нагрузки.

Для расчета необходимо указать следующие параметры:

- График изменения нагрузок во времени.
- Логарифмический декремент колебаний.
- Количество учитываемых в расчете собственных форм.
- Интервал времени, на котором будет проводиться расчет.
- Количество расчетных моментов времени.

### Метод прямого интегрирования

При прямом интегрировании предполагается, что все матрицы линейны не во всем диапазоне, а только на коротких отрезках времени  $\Delta t$ . И уравнение равновесия рассматривается только в дискретных точках временного интервала.

Предполагается, что в момент времени  $t = 0$  все вектора  $\Delta$ ,  $\dot{\Delta}$ ,  $\ddot{\Delta}$  – известны, и чтобы найти решение в интервале времени  $T$  – этот интервал разбивается на  $n$  равных интервалов времени  $\Delta t$ :  $\Delta t = T/n$

При методе Хоболта находится решение уравнения  $M \cdot \ddot{\Delta} + C \cdot \dot{\Delta} + K \cdot \Delta = P(t)$  для момента времени  $t + \Delta t$ . Таким образом, чтобы использовать этот метод необходимо знать решение основного уравнения для двух моментов времени  $t$  и  $t + \Delta t$ . Этого решения мы обычно не знаем. Поэтому для нахождения этих начальных двух точек используется  $\theta$ -метод Вилсона.

В  $\theta$ -методе Вилсона предполагается линейное изменение ускорения в интервале времени от  $t$  до  $t + \Delta t$ . Этот метод не требует специальной начальной процедуры (как при методе Хоболта), поскольку величины перемещения, скорости и ускорения для момента времени  $t + \Delta t$  выражаются через те же величины, что и для момента времени  $t$ .

Данные методы обеспечивают безусловную устойчивость (сходимость) по сравнению с другими методами.

Преимущества метода прямого интегрирования:

- Не ограничивает класс решаемых задач;
- Могут рассчитываться различные нелинейные задачи, в том числе контактные, элементы с зазором и т.п.;
- Возможно использовать материалы с различными свойствами демпфирования;
- Может быть просто установлено устройство – демпфер в каком – либо конкретном узле и по различным направлениям;
- Не требует обязательного предварительного расчета собственных частот, хотя для грамотного выбора шага интегрирования
- Уменьшением шага интегрирования можно увеличивать точность расчета вынужденных колебаний этим методом

### Результаты расчета

Результатом расчета конструкции на вынужденные колебания являются:

- Перемещения узлов конструкции.
- Напряжения, действующие в стержнях, пластинах и объёмных элементах.
- Реакции в опорах.
- Собственные частоты и собственные формы колебаний.

## Расчет усталостной прочности

### Краткие теоретические сведения

После статического расчета можно провести расчет усталостной прочности. Параметры устанавливаются в диалоге, вызываемом из меню Расчет | Параметры усталостного расчета.

Для выполнения такого расчета находим диапазоны предельных значений нормальных и касательных компонентов напряжений в точках конструкции. Компонентами напряжений являются нормальные и касательные составляющие напряжений, которые обозначаются как:

$$\sigma_x \max, \sigma_x \min, \sigma_y \max, \sigma_y \min, \sigma_z \max, \sigma_z \min$$

$$\tau_{xy} \max, \tau_{xy} \min, \tau_{xz} \max, \tau_{xz} \min, \tau_{yz} \max, \tau_{yz} \min$$

Расчеты эквивалентных напряжений по методу Серенсона – Кинососвили:

$$\sigma_{ex}^* = \sigma_{amx} K + \psi_\sigma \sigma_{mx}$$

$$\tau_{ex}^* = \tau_{amx} K + \psi_\tau \tau_{mx}$$

Значение предела длительной прочности по нормальным напряжениям:

$$\sigma_{-1} = (0.55 - 0.0001\sigma_b)\sigma_b$$

По касательным напряжениям:

$$\tau_{-1} = (0.5 \div 0.6)\sigma_{-1}$$

Поправочный коэффициент геометрии, материала и обработки:

$$K = \left( \frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right) \frac{1}{K_V}$$

Коэффициент концентрации нагрузки:

$$K_\sigma = 1 + q(\alpha_{c\sigma} - 1)$$

где  $q$  – коэффициент чувствительности материала к местным напряжениям и  $\alpha_{c\sigma}$  – теоретический коэффициент концентрации напряжений. Эти параметры задаются в диалоге «Усталостный расчет».

$$K_{F\sigma} = 1 - 0.22 \lg R_z \left( \lg \left( \frac{\sigma_b}{20} - 1 \right) \right)$$

где  $R_z$  – шероховатость поверхности, задаётся в диалоге «Усталостный расчет».

$$K_{F\tau} = 0.575 K_{F\sigma} + 0.425$$

$K_{d\sigma}$  – масштабный коэффициент, задаётся в диалоге «Усталостный расчет».

$K_V$  – коэффициент учета упрочнения, задаётся в диалоге «Усталостный расчет».

Условие прочности:

$$\sigma_e = \frac{S}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{ex}^* - \sigma_{ey}^*)^2 + (\sigma_{ey}^* - \sigma_{ez}^*)^2 + (\sigma_{ez}^* - \sigma_{ex}^*)^2 + 2 \frac{\sigma_{-1}}{\tau_{-1}} (\tau_{exy}^{*2} + \tau_{eyz}^{*2} + \tau_{ezx}^{*2})} = \sigma_{-1}$$

Откуда коэффициент запаса по выносливости S:

$$S = \frac{\sqrt{2}\sigma_{-1}}{\sqrt{(\sigma_{ex}^* - \sigma_{ey}^*)^2 + (\sigma_{ey}^* - \sigma_{ez}^*)^2 + (\sigma_{ez}^* - \sigma_{ex}^*)^2 + 2 \frac{\sigma_{-1}}{\tau_{-1}} (\tau_{exy}^{*2} + \tau_{eyz}^{*2} + \tau_{ezx}^{*2})}}$$

Определение числа циклов по кривой Велера или по:

$$N = N_G \left( \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_e} \right)^m$$

Если  $\sigma_e \geq \sigma_{-1}$  в этом случае время работы  $t = t_c \cdot N$ .

Дополнительно вводится время одного цикла нагружения  $t_c$ . Если не задано свойство материала «Усталость» иначе  $\{N_G; \sigma_{-1}\}$  кривой Велера.

$m = 5 + \left( \frac{\sigma_b}{80} \right)$  – показатель степени кривой выносливости.

$N_G = 2 \cdot 10^6$  – базовое число циклов нагружения.

Результаты расчета усталостной прочности доступны после статического расчета при просмотре карты результатов.

### Задание усталостных параметров

Для задания усталостных свойств материала необходимо выбрать в главном меню пункт Расчеты | Параметры усталостного расчета. В открывшемся одноимённом диалоге доступны закладки для обращения к соответствующим полям усталостных свойств.

Закладка «Простейший расчет» содержит пояснительную схему для задания параметров в группе «Статический расчет соответствует». Все усталостные методы расчета основываются на предположении, что модель работает в упругой зоне. Если во время расчета напряжения в узле одного из конечных элементов превысит значение предела текучести, то будет выдано предупреждение.

Результаты простейшего метода расчета доступны после проведения статического расчета в пункте Усталость диалога Параметры вывода результатов.

Среди доступных рассчитанных величин после расчета статики для простейшего усталостного расчета – это Коэф. запаса по усталостной прочности и Число циклов. Коэффициент запаса определяется как отношением предела усталости  $\sigma_{-1}$ , к вычисленному (эквивалентному по повреждающему воздействию симметричному нагружению) напряжению в элементах конструкции.

Задание пределов усталостной прочности для нормальных (н) и касательных (к) напряжений задаётся не в диалоге Параметры усталостного расчета, а в диалоге настройки параметров материалов. Если заданные величины пределов усталости окажутся меньше 0,001 МПа, то вычисление осуществляется по статистическим формулам, применимым для углеродистых и низколегированных сталей:

$$\sigma_{-1} = (0.55 - 0.0001\sigma_b)\sigma_b$$

$$\tau_{-1} = 0.55 \cdot \sigma_{-1}$$

Для хрупких материалов (высокоуглеродистая сталь, чугун) статистическая формула иная:

$$\tau_{-1} = 0.8 \cdot \sigma_{-1}$$

потому в этом случае необходимо задать вычисленные значения вручную и задать их в соответствующих полях диалога настройки свойств материала.

Для материалов с кривой усталости, отражённой на рисунке 7.14, базовому числу циклов  $N_G$  соответствует физический предел выносливости  $\sigma_{-1}$ .

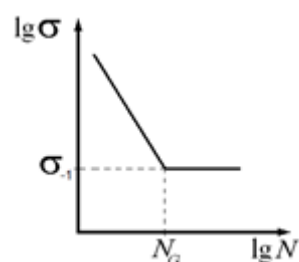


Рисунок 7.14 – Кривая Вёлера для углеродистой и среднелегированной стали.

Базовое число циклов  $N_G$  при задании предела выносливости для чёрных металлов принимается как  $2 \cdot 10^6$ . Для материалов, у которых не удаётся обнаружить границу горизонтального участка кривой усталости Вёлера, используется понятие «условного предела выносливости», для которого базовое число задаётся как  $10^8$  циклов нагружения.

Напряжениям, меньшим  $\sigma_{-1}$  соответствует зона неограниченной усталости, а большим – зона ограниченной усталости. Кривая Вёлера определяет число циклов, соответствующих 50% вероятности разрушения для соответствующего напряжения, определённом для симметричной нагрузки и при одноосном напряжённом состоянии. Одно из аналитических описаний кривой выносливости:

$$N = \begin{cases} N_G \cdot \frac{\sigma_{-1}^m}{\sigma^m} & , \sigma > \sigma_{-1} \\ \infty & , \sigma \leq \sigma_{-1} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma^m \cdot N = const & , 10^3 < N < N_G \\ \sigma = \sigma_{-1} = const & , N > N_G \end{cases}$$



где  $m$  – показатель степени, зависящий от материала, качества его механообработки и термообработки:

$$m = \frac{1}{K} \cdot \left( 5 + \frac{\sigma_b}{80} \right)$$

где  $K$  – коэффициент снижения предела выносливости,  $\sigma_b$  – предел прочности.

Если коэффициент запаса по усталости больше единицы, что соответствует области неограниченной выносливости, выводимое число циклов ограничено значением, заданным в поле Число циклов до перелома кривой усталости  $N_G$  на закладке Параметры разрушения. Это сделано для того, чтобы не отображать бесконечных величин на графиках.

Закладка Материалы диалога Параметры усталостного расчета содержит список по коэффициентам снижения предела выносливости всех материалов редактируемой модели.

Содержимое закладки Асимметрия нагружения позволяет осуществлять приведение несимметричного нагружения к симметричному, с показателем асимметрии  $R = -1$ .

На основе многочисленных экспериментов с образцами заданного материала при  $R = -1$  с использованием статистических методов выявляется диаграмма предельных амплитуд напряжений в координатах среднего и полуразмаха напряжений цикла для заданной долговечности.

Формулы вычисления среднего значения напряжений (нижний индекс «м») и амплитуды или полуразмаха (нижний индекс «ам»):

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_n + \sigma_k), \quad \tau_m = \frac{1}{2}(\tau_n + \tau_k), \quad \sigma_{ам} = \frac{1}{2}(\sigma_n - \sigma_k), \quad \tau_{ам} = \frac{1}{2}(\tau_n - \tau_k)$$

где  $\sigma_n$  и  $\tau_n$  – начальные значения напряжений,  $\sigma_k$  и  $\tau_k$  – конечные значения, достигнутые в полуцикле.

Для аппроксимации диаграммы предельных напряжений используются различные зависимости, одна из которых – соотношение Серенсена-Кинасошвили:

$$\sigma_{ам} = \sigma_{-1} - \psi_\sigma \sigma_m$$

$$\tau_{ам} = \tau_{-1} - \psi_\tau \tau_m$$

Коэффициенты чувствительности к асимметрии цикла напряжений  $\psi_\sigma$  и  $\psi_\tau$  аппроксимируют диаграмму предельных напряжений только в той части диаграммы, где средние значения напряжений  $\sigma_m$  далеки от предела прочности. Предполагается, что именно в зоне текучести нарушается линейная зависимость предельных напряжений. В

программе, как уже было описано выше, при расчете выдаётся предупреждение о факте превышения предела текучести вычисленным эквивалентным по Мизесу напряжением в элементе модели.

На закладке «Асимметрия нагружения» выставленные переключатели для коэффициентов чувствительности к асимметрии цикла «Вычислять из  $\sigma_b$ » позволяют произвести вычисления по следующим уравнениям:

$$\psi_\sigma = 0.02 + 0.0002 \cdot \sigma_b$$

$$\psi_\tau = 0.5 \cdot \psi_\sigma$$

Однако, эта формула применима только для сталей, а для лёгких деформируемых сплавов необходимо вручную задать значение, вычисленное по формуле:

$$\psi_\sigma = 0.48 + 0.00055 \cdot \sigma_b$$

Закладка Параметры разрушения содержит две группы задаваемых параметров. Группа Параметры кривой усталости Вёлера позволяет задать величины, определяющие вид кривой усталости, которая в логарифмических координатах состоит из двух отрезков.

Переключатель возле поля Показатель степени участка кривой усталости с названием Вычислять из  $\sigma_b$  позволяет задавать показатель степени по статистически выявленной формуле.

Если же показатель степени аппроксимируется по другой формуле, то необходимо вручную произвести эти вычисления и задать в соответствующем поле, становящимся доступным после выключения, указанного выше переключателя.

Кроме закладок в диалоге Параметры усталостного расчета присутствуют ещё несколько важных кнопок. Нажатие на кнопку ОК приводит к сохранению всех заданных в диалоге усталостных параметров и закрытию диалога. Нажатие кнопки Apply приводит к тому, что кроме сохранения данных (как и для кнопки ОК) будут очищены данные, полученные во всех методах усталостного расчета.

Внизу рассматриваемого диалога расположены кнопки запуска на расчет различных методов усталостного расчета. Кнопки 1 и 2 оказываются недоступными для нажатия до того момента, пока не будут выполнены все следующие условия:

- отсутствуют окна отображения карт результатов;
- присутствуют конечные элементы типа пластина и 8-и узловой объёмный элемент;
- осуществлён расчет статики.

Кнопка 3 будет недоступной, пока не выполнятся те же условия, кроме последнего, вместо которого должен быть осуществлён расчет вынужденных колебаний для суперэлементов (СЭ), описанных ниже.

Перед нажатием кнопок 1, 2 и 3 необходимо сохранить нажатием на кнопку Apply новые параметры для усталостных расчетов, если таковые были. После нажатия на одну из трёх кнопок диалог будет закрыт и произведён расчет по выбранному алгоритму.

Нажатие кнопки 1 осуществляет запуск на расчет по простейшему алгоритму, когда нагрузка состоит из чередующихся циклов с постоянным значением максимума и минимума, см. схему на закладке «Простейший расчет» этого диалога.

Нажатие на кнопку 2 приводит к запуску на расчет усталостного алгоритма для случайной нагрузки по результатам статического расчета.

Нажатие на кнопку 3 приводит к запуску на расчет усталостного алгоритма для случайной нагрузки по результатам расчета вынужденных колебаний для суперэлементов.

#### **Задание случайной нагрузки**

Случайная нагрузка задаётся для выделенного нагружения или сразу для всех нагружений. Механизм такой же, как и при задании графиков нагружения. Для вызова диалога Случайная усталостная нагрузка для нагружений необходимо выбрать в главном меню Нагрузки пункт Случайные нагружения.

Статус усталостной нагрузки может быть следующим:

- Не задана, когда нагрузка отсутствует;
- Включена, когда нагрузка задана и включена для расчета;
- Выключена, когда нагрузка задана, но выключена для расчета.

Только при статусе Включена блочная нагрузка нагружения будет использована в случайном усталостном расчете. Если нагрузка отсутствует, то для её задания необходимо нажать на кнопку Задать для вызова диалога Усталостное многостадийное случайное нагружение; если же нагрузка уже была задана, то та же кнопка будет иметь название Изменить.

Если выбрано задание случайной нагрузки Для всех нагружений, то именно эта нагрузка и будет использована в расчете при выборе любого нагружения в диалоге расчета, но только при условии, что задан график нагрузки в пункте Для всех нагружений в диалоге Графики нагрузок для нагружений. Если же необходимо произвести расчет со случайной нагрузкой, заданной для конкретного нагружения, то необходимо удалить

график нагрузки в диалоге Графики нагрузок для загружений в пункте Для всех загружений.

Диалог Усталостное многостадийное случайное нагружение позволяет комбинировать несколько стадий нагружения, каждая из которых обладает своими статистическими параметрами.

Группа Общие параметры для расчета, позволяют осуществить задание общих для всех стадий параметров. Переключатель Включить для расчета позволяет задать из диалога статус нагрузки для дальнейшего расчета.

Параметр Расчетное время работы нагружения отвечает за потребное время проведения многостадийного нагружения (например, расчета вибрации). Весь расчет случайной усталости базируется на предположении об эргодичности синтезируемого случайного воздействия. Это свойство позволяет перейти от расчета случайной функции на всём интересующем интервале времени ко много меньшей по времени реализации, но обладающей такими же статистическими характеристиками. Необходимость такая вызвана в основном желанием снижения времени расчета. Поэтому отношение потребного времени расчета ко времени заданного нагружения определяет число повторов, которое будет в дальнейшем учтено при вычислении запаса по долговечности.

При определении напряжений определяющим параметром нагрузки является его максимальная величина, поэтому для корректного описания заданной частоты возмущающего воздействия рекомендуется задавать частоту оцифровки как превышающую эту величину частоты на порядок. Если же задающим является спектр возмущающего воздействия, то в поле Общая частота оцифровки необходимо задать увеличенное на порядок значение максимальной значимой частоты, которая будет задана для одной из стадий нагружения. Этот параметр задаётся перед заданием самой первой стадии и недоступен в случае, если хоть одна стадия уже задана.

Параметр Число точек межстадийного сглаживания позволяет задавать временной интервал, на котором будет производиться сглаживание стыков стоящих друг за другом участвующих в расчете стадий нагружения. Если стадия одна, то этот величина этого параметра игнорируется.

Сглаживание стыков проводится в два этапа.

1. Сглаживание концов (или только одного конца, если стадия начальная или конечная) каждой стадии до нулевого значения линейной функцией.

2. Межблочное сглаживание, когда уже сглаженные концы нагружения участвуют в линейном переходе с уровня математического ожидания (МО) предыдущей стадии к уровню МО следующей стадии.

Сглаживание между стадиями с разным уровнем МО имеет смысл только при задании значения силового фактора или перемещения, при задании значений ускорений или скоростей в узлах КЭ значение МО должно быть нулевым.

Список стадий случайного нагружения позволяет наглядно осуществлять сравнение вычисленных статистических характеристик между собой по описанным ниже параметрам.

1. Номер стадии.
2. Тип стадии, которая может быть прочитана из файла, задана по корреляционной функции и задана через спектральную плотность мощности.
3. Имя стадии – это задаваемое пользователем поле, позволяющее идентифицировать стадии в списке между собой.
4. Статус стадии говорит о том, что он может быть «включен» и «выключен» для расчета. Если статус задан как «выключен», то он не принимает участие в расчете.
5. Флаг стадии говорит о том, есть ли у стадии итоговый график, который уже сглажен на концах.
6. Число точек указывает на размер итогового графика стадии.
7. Длительности в секундах вычисляется отношением числа точек стадии к частоте оцифровки.
8. Число повторов сообщает о количестве повторов графика стадии нагружения при проведении расчета.
9. Нормировка, «Вкл» или «Выкл».
10. КА и КВ – введенные коэффициенты нормировки.
11. Вычисленные статистические параметры, если был произведен синтез графика стадии нагружения, если же синтез не был проведен, то соответствующие колонки таблицы будут пустыми.

Для текущей стадии доступны кнопки управления по работе с заданными стадиями, среди которых такие операции, как редактирование, удаление и изменения порядка следования стадий. Для задания новой стадии случайного нагружения

необходимо нажать на одну из кнопок, название которой начинается как «Добавить стадию...». Реализовано три возможности задания:

- стадия, заданная по корреляционной функции;
- стадия, заданная спектральной плотностью мощности;
- стадия, загружаемая из файла, созданного сторонним приложением в текстовом формате.

Рассмотрим диалог задания свойств новой стадии, заданной по спектральной плотности мощности ускорений

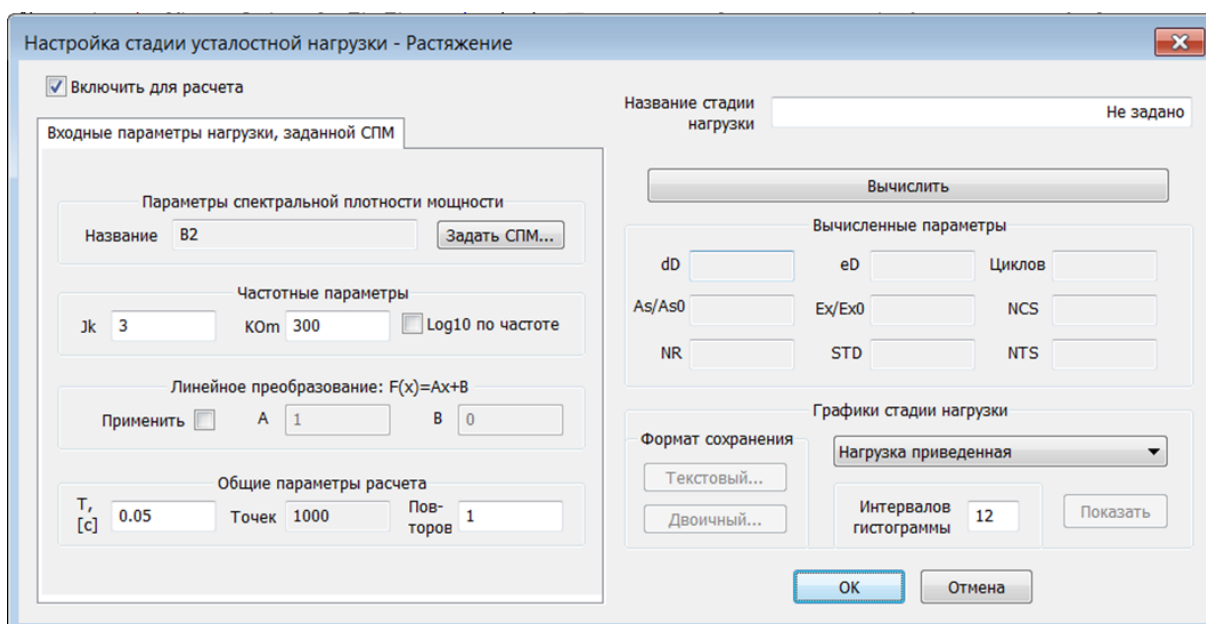


Рисунок 7.15 – Диалог настройки стадии нагружения, заданной по спектральной плоскости

Поле «Название стадии нагружения» необходимо для лучшей ориентации в списке стадий.

Группа «Вычисленные параметры» будет содержать пустые поля, пока не будет произведён их расчет нажатием на кнопку «Вычислить». Входными данными для расчета являются четыре нижеописанные группы параметров.

Первая группа «Параметры спектральной плотности мощности» содержит кнопку для вызова диалога, который позволяет выбрать среди предустановленных в программе те спектры, которые необходимо реализовать для текущей стадии загрузки в группе «Шаблон СПМ». В группе «Текущее значение точки» доступно изменение положения текущей точки графика спектральной плотности мощности ускорения. В полях группы «Точка» доступно удаление текущей точки или добавление новой перед или после текущей точки. В группе «Вычисленные параметры» собраны итоговые величины,

характеризующие редактируемый СПМ. Нажатие на кнопки группы «Таблица СПМ» позволяет осуществить сохранение или загрузку предварительно сохранённого спектра.

Вторая группа «Частотные параметры» диалога содержит три параметра. Поле «Jk» влияет на случайность синтезируемого распределения. Диапазон возможных целых значений  $0 \dots 4e+9$ , причём нулевое значение означает, что каждый пересчёт даст новое распределение. Все ненулевые величины позволяют воспроизводить каждый раз определённое случайное распределение.

Поле «KOm» определяет число частот, участвующих в синтезе случайного возмущения. Если это значение равно единице, то в итоге будет задано не случайное, а фиксированное синусоидальное воздействие со среднеквадратичным значением (СКЗ), равным значению, получаемому в поле «СКЗ» диалога.

Переключатель «Log10 по частоте» позволяет выставлять логарифмическое распределение участвующих в синтезе случайного распределения частот. Если переключатель выключен, то распределение по частотам, от минимальной до максимальной (см. поля «f\_min» и «f\_max» группы «Вычисленные параметры») будет линейной. Если же переключатель выключен, то распределение будет логарифмическим, когда в области низких частот по сравнению с высокими частотами будет большее разряжение между частотами, участвующими в синтезе случайного воздействия.

Третья группа «Линейное преобразование:  $F(x) = Ax+B$ » позволяет проводить сдвиг среднего значения (математического ожидания) распределения и масштабирование, что приводит к изменению итогового значения СКЗ. Параметры данной группы не влияют на сам синтез распределения, с участием этих параметров распределение только преобразуется, поэтому производить перерасчет нет необходимости. Если переключатель «Применить» выключен, то будут использоваться стандартные величины преобразования  $A = 1$ ,  $B = 0$ , вне зависимости от тех значений, которые указаны в соответствующих полях.

Четвёртая группа «Общие параметры расчета» для текущей стадии случайного нагружения содержит поле «T, с» - это время для синтеза графика стадии. Это время рекомендуется задавать не менее чем на порядок больше обратной величины от значения минимальной частоты «f\_min» в СПМ. Тогда синтезированный график будет удовлетворять заданной спектральной плотности мощности и вычисленные статистические параметры будут состоятельными. Поле «Точек» не предназначено для редактирования, оно информативно, и содержит число точек, которое пришлось на

заданное время графика с учётом параметра «Общая частота оцифровки для всех стадий, Гц».

Поле «Повторов» группы «Общие параметры расчета» позволяет использовать свойство эргодичности стадии синтезируемого случайного распределения. Если время графика более чем на порядок больше обратной величины от минимальной частоты «f\_min», то с помощью этого параметра можно менять соотношения между вкладами от каждой из стадий в общую случайную нагрузку.

Группа «Вычисленные параметры», как уже упоминалось, содержит итоговые статистические величины синтезированного случайного распределения стадии нагружения. Для синтеза графика и вычисления параметров необходимо нажать на кнопку «Вычислить». Если же расчет произведён не будет, а диалог будет закрыт по кнопке «ОК», то в списке стадий не будут отображены соответствующие поля, а при расчете статистики или вынужденных колебаний синтез случайного нагружения будет произведён принудительно.

Значения полей «dD» и «eD» определяют абсолютную и относительную погрешность в вычисленной дисперсии синтезированной стадии, где за базу взято значение дисперсии, равной квадрату вычисленного значения «СКЗ» диалога настройки СПМ. Относительная погрешность нормирована до единицы. Если относительная погрешность более 10%, рекомендуется увеличить число участвующих в синтезе стадии случайного воздействия частот в поле «КОм».

Поле «STD» соответствует вычисленному по синтезированному случайному воздействию среднеквадратическому значению по следующим формулам из значений математического ожидания (среднего) выборки и дисперсии:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_i^N x_i$$
$$D = \frac{1}{N-1} \sum_i^N (x_i - \bar{x})^2$$
$$STD = \sqrt[2]{D}$$

Где  $x_i$  – значения случайной нагрузки в  $i$ -й момент времени,  $N$  – общее число точек (отсчётов) распределения.

Поля «As/As0» и «Ex/Ex0» служат для оценки меры отклонения синтезированной стадии нагружения от нормального распределения. Значения, меньшие трёх по абсолютному значению, сообщают о том, что отклонения от нормального



синтезированного распределения не являются существенными. Если полученные значения оказались по модулю больше трёх, то для снижения этих величин рекомендуется увеличить время для графика (число точек N). Формулы для расчета асимметрии и эксцесса случайного распределения, а также средние квадратические ошибки коэффициентов асимметрии и эксцесса:

$$As = \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{(\sqrt{D})^3} \cdot \sum_i^N (x_i - \bar{x})^3,$$

$$As0 = \sqrt{\frac{6 \cdot (N - 1)}{(N + 1) \cdot (N + 3)'}}$$

$$Ex = -3 + \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{D^2} \cdot \sum_i^N (x_i - \bar{x})^4,$$

$$Ex0 = \sqrt{\frac{24 \cdot N \cdot (N - 2) \cdot (N - 3)}{(N - 1)^2 \cdot (N + 3) \cdot (N + 5)'}}$$

Поле «NR» справочного характера, определяет коэффициент нерегулярности, равный отношению числа переходов распределения через ноль к числу экстремумов. Чем ближе это значение к единице, тем распределение более похоже на синусоидальное и является узкополосным. Малые величины соответствуют сложному частотному составу случайного процесса и соответствуют широкополосному процессу.

Поле «Циклов» вычисляется на основе метода «падающего дождя». Полученное в результате расчета числа полуциклов делится пополам для отображения в поле «Циклов».

Поле «NCS» отображает итоговое число циклов с учётом повторений из поля «Повторов».

Поле «NTS» отображает суммарное время распределения (но не графика!) с учётом повторений из поля «Повторов».

Рассмотрим заключительную группу «Графики стадии нагружения». Поле «Интервалов гистограммы» используется только при отображении графиков распределений, рекомендуемое значение числа интервалов гистограммы Nh – не менее 6. Выпадающий список позволяет выбрать тип отображаемого в отдельном окне графика.

Выбор типа графика «Нагружение приведённое» позволяет вывести синтезируемый график в отдельном окне, с учётом нормировки.

Тип «Распределение приведённого нагружения» позволяет вывести график распределения, который должен быть похож на Гауссов колокол.

«Нагружение эквивалентное» позволяет отобразить некую эквивалентную нагрузку, когда задаваемые величины соответствуют напряжениям и каждая точка вычисляется как эквивалентная по повреждающей способности симметричной нагрузке. Большого физического смысла в этом графике нет, но на его основе строятся распределения  $N(S)$  и  $S(NSum)$ . Распределение  $N(S)$  – это число циклов в зависимости от нагрузки, а  $S(NSum)$  – зависимость от числа циклов соответствующей нагрузки. Именно на основе графика  $S(NSum)$  находится эквивалентное значение числа циклов, которое по повреждающей способности эквивалентно симметричной синусоидальной с той же величиной полуразмаха, что и максимальное в распределении  $S(NSum)$ .

Группа «Формат сохранения» той же группы «Графики стадии нагружения» содержит кнопки «Текстовый» и «Двоичный», что позволяет производить сохранение в разных форматах синтезированной стадии. Текстовый формат сохранения может быть использован для того, чтобы в стороннем приложении осуществить расчет дополнительных желаемых величин, или для корректировки отсчётов стадии. Дальнейшая загрузка откорректированного текстового файла возможно только в случае создания в диалоге «Усталостное многостадийное случайное нагружение» стадии, загружаемой из файла. Но, перед отображением диалога необходимо выбрать файл из соответствующей папки хранения. Форматы поддерживаемых файлов при экспорте/импорте:

- PRN, где разделитель пробел и/или знак табуляции;
- CSV, где разделитель между числами запятая. Внимание!!! Недопустимым для данного формата файла является число, у которого запятая соответствует десятичной точке!!!

Вид диалога для случая загружаемой из файла стадии нагружения будет практически тем же, только будет отсутствовать группа «Параметры спектральной плотности мощности» и «Частотные параметры». Кнопка «Вычислить» и поле «Т, с» в группе «Общие параметры расчета» будут недоступны; поле «dD» и «eD» будут пустыми в группе «Вычисленные параметры»; группа «Формат сохранения» будет называться «Формат загрузки», с соответствующим функционалом.

Вернёмся к рассмотрению диалога «Усталостное многостадийное случайное нагружение». Группа «Итоговые параметры многостадийного нагружения» содержит три поля, которые в себе аккумулируют соответствующие значения для включённых

стадий. Однако, первые два (число точек и время) отвечают за сам график, без учёта числа повторений. А в поле «Суммарное время заданного нагружения, с» суммируются времена от каждой стадии, учитывая число «Повторов», то есть суммируются вычисленные параметры «NTS».

Группа «График нагружения» такой же, разве что тип графика только один – «Суммарное нагружение», когда в порядке следования стадий в списке графики стыкуются с учётом сглаживания.

Группа «Экспорт» содержит две кнопки: «В текстовый файл...» и «В график для загрузки». В текстовый файл будет осуществлён экспорт всех стадий нагружения в порядке их следования. Нажатие на кнопку «В график для загрузки» приведёт к экспорту полученной итоговой многостадийной нагрузки в график нагрузки для ассоциированного нагружения. Название этого нагружения указывается в названии диалога. Если же экспорт не был произведён, то для загрузки график нагрузки останется прежним или вообще останется не заданным.

### Методика расчета

По вычисленным значениям амплитуд напряжений и их средних величин вычисляются напряжения, приведённые к симметричному нагружению, соответствующего  $R = -1$ .

После вычисления приведённых значений напряжений в конечных элементах производится расчет напряжений, эквивалентных одноосному растяжению, по формуле:

$$\sigma_{\Sigma 1} = \sqrt{\frac{(\sigma_x^R - \sigma_y^R)^2 + (\sigma_y^R - \sigma_z^R)^2 + (\sigma_z^R - \sigma_x^R)^2}{2} + \left(\frac{\sigma_{-1}}{\tau_{-1}}\right)^2 \cdot ((\tau_{xy}^R)^2 + (\tau_{yz}^R)^2 + (\tau_{zx}^R)^2)}$$

где  $x, y, z$  – индексы напряжений в соответствующих направлениях/плоскостях,

$\sigma_{-1}$  – предел выносливости по нормальным напряжениям,

$\tau_{-1}$  – предел выносливости по касательным напряжениям.

В итоге получается распределение напряжений  $\sigma_{\Sigma 1}$  по числу полуциклов, определённых на этапе схематизации.

По распределению числа полуциклов от напряжений строится суммарное по числу полуциклов распределение.

Для приведения этого распределения к эквивалентному синусоидальному нагружению за расчетное напряжение выбирается  $\sigma_{\Sigma 1}^{max}$  – наибольшее среди достигнутых. Затем вычисляется эквивалентное число циклов  $n_{\Sigma sin}$ , которое при расчетном напряжении обладает такой же повреждающей способностью, что и

синтезированное стохастическое. Для этого необходимо воспользоваться скорректированной линейной гипотезой суммирования усталостных повреждений (КЛГСУП) при нерегулярном нагружении.

Согласно этой гипотезе усталостное повреждение, вносимое напряжением  $\sigma_i^0$ , составляет некоторую долю, равную  $n_i/N_{0i}$ , от полного повреждения, соответствующего появлению усталостных трещин и разрушению. Значение  $n_i$  соответствует числу циклов, наработанному при данном уровне напряжений. Величина  $N_{0i}$  равна числу циклов, которое соответствует 50% вероятности разрушения детали при том же уровне напряжений  $\sigma_i^0$ .

Разрушение по этой теории наступает тогда, когда выполняется условие:

$$\sum_{\substack{i=1 \\ K \cdot \sigma_i \geq \sigma_{-1}}}^k \frac{n_i}{N_{0i}} = \alpha_3$$

где  $k$  – это или заданное число интервалов гистограммы напряжений  $N_h$ , или число рассматриваемых циклов нагружения,  $\alpha_3$  – экспериментально определённая поправка в скорректированной линейной гипотезе.

Необходимо обратить внимание на условие под знаком суммы: повреждающее воздействие будут вносить только те полуциклы, для которых выполняется условие:

$$K \cdot \sigma_i \geq \sigma_{-1}$$

Для начала рассмотрим методику расчета коэф. запаса по числу циклов для случая, когда свойство «Усталость» для используемого материала отсутствует.

Исходя из уравнения кривой выносливости в многоцикловой зоне ( $10^3 < N_i < N_G$ ), выводится значение числа циклов, соответствующих 50% вероятности разрушения:

$$N_{0i} = \frac{\sigma_{-1}^m \cdot N_G}{\sigma_i^m}$$

Полученная величина числа циклов подставляется в уравнение кривой усталости и с учётом КЛГСУП:

$$\sum_{\substack{i=1 \\ K \cdot \sigma_i \geq \sigma_{-1}}}^k \sigma_i^m \cdot n_i = \sigma_{-1}^m \cdot N_G \cdot \alpha_3 = (\sigma_{31}^{\max})^m \cdot n_{3 \sin} \cdot \alpha_3,$$

откуда осуществляется вывод эквивалентного числа циклов:

$$n_{\varepsilon \sin} = \frac{1}{\alpha_{\varepsilon}} \sum_{\substack{i=1 \\ K \cdot \sigma_i \geq \sigma_{-1}}}^k n_i \cdot \left( \frac{\sigma_i}{\sigma_{\varepsilon 1}^{\max}} \right)^m$$

Для того чтобы получить коэффициент запаса по числу циклов (запас по долговечности), сначала вычисляется число циклов, соответствующее 50% вероятности разрушения для расчетного напряжении  $\sigma_{\varepsilon 1}^{\max}$ :

$$N_{0\varepsilon 1 \max} = \frac{\sigma_{-1}^m \cdot N_G}{\sigma_{\varepsilon 1}^{\max}}$$

Значение  $N_{0\varepsilon 1 \max}$  является базовой величиной. Максимальное значение этой величины ограничено числом  $N_G$ , обычно назначаемое как 2еб. Такие значения соответствуют случаю, когда  $\sigma_{\varepsilon 1}^{\max} < \sigma_{-1}/K$ , что соответствует случаю неограниченной выносливости. При больших значениях  $\sigma_{\varepsilon 1}^{\max}$  базовое число циклов полиномиально уменьшается, исходя из уравнения кривой выносливости (1) в многоцикловой зоне ( $10^3 < N_i < N_G$ ).

Тогда коэффициент запаса по числу циклов определяется по формуле:

$$n_N = \frac{N_{0\varepsilon 1 \max}}{n_{\varepsilon \sin}}$$

Выводимые значения коэффициента запаса по числу циклов так же ограничены сверху величиной  $N_G$ . Такое значение коэффициента запаса может иметь место в двух случаях:

- $n_{\varepsilon \sin} \leq 1$
- $\sigma_{\varepsilon 1}^{\max} \leq \sigma_{-1}/K$

Рассмотрим методику расчета коэф. запаса по числу циклов для случая, когда задано свойство «Усталость» для используемого материала.

При задании кривой Вёлера используя полулогарифмическое интерполирование для заданных напряжений и вычисляемых значений числа циклов, соответствующих 50% вероятности разрушения. Интерполирование осуществляется для напряжений, лежащих в диапазоне между максимальными и минимальными по графику. Если рассматриваемое напряжения выше максимального значения, то число полуциклов до разрушения равно 1, от нуля до максимума. Если рассматриваемое напряжение ниже минимального, то число выдерживаемых циклов считается равным базовому  $N_G$ .

Расчет коэффициента запаса по долговечности (по числу циклов) осуществляется через расчет повреждения, рассчитанного по КЛГСУП:

$$D = \frac{1}{\alpha_3} \sum_{\substack{i=1 \\ K \cdot \sigma_i \geq \sigma_{-1}}}^k \frac{n_i}{N_{0i}},$$

где  $N_{0i}$  – это число циклов, которое соответствует 50% вероятности разрушения при  $\sigma_i^0$ , вычисленные интерполированием по заданной кривой Вёлера.

Обратная величина от значения повреждения соответствует коэффициенту запаса по долговечности (по числу циклов).

### **Расчет случайной усталости по статике**

Усталостный расчет по результатам статики оправдано использовать в случае, если собственные частоты лежат на оси частот правее частот вынуждающих сил.

Для проведения усталостного расчета необходимо осуществить следующий порядок действий:

- создать расчетную модель;
- задать случайную усталостную нагрузку для выбранных загружений или комбинаций загружений;
- задать необходимые усталостные параметры;
- задать группы элементов (ГЭ), для которых необходимо провести расчет;
- провести статический расчет;
- осуществить запуск усталостного расчета для случайной нагрузки по результатам статики.

Результаты данного расчета будут доступны в списке «Выбор результатов» диалога «Параметры вывода результатов».

Выбор «Число циклов по Вёлера» приведёт к отрисовке вычисленных значений, соответствующей наибольшей эквивалентной нагрузке, достигнутой при применении случайной нагрузки. Это число циклов соответствует 50% вероятности разрушения.

Если после проведения статического расчета модель редактировалась, то перед проведением усталостного расчета по статике будет выдано предупреждение.

Поскольку итоговые величины усталостного расчета вычисляются по результатам статики, то расчет ведётся последовательно для всех загружений, для которых задана усталостная нагрузка. Поэтому, если во время расчета напряжения в узле одного из конечных элементов превысит значение предела текучести, то будет выдано предупреждение, которое соответствует текущему рассчитываемому загружению.

## Расчет случайной усталости через вынужденные колебания

Для проведения расчета необходимо осуществить следующий порядок действий:

- создать расчетную модель, содержащую элементы типа стержень и/или пластина и/или 8-и узловой объёмный конечный элемент;
- создать ГЭ из выбранных элементов типа стержень и/или пластина и/или 8-и узловой объёмный конечный элемент;
- задать случайную усталостную нагрузку и экспортировать её в график нагружения для соответствующего загружения или комбинации загружений;
- задать необходимые усталостные параметры;
- осуществить запуск усталостного расчета для случайной нагрузки через расчет вынужденных колебаний для соответствующего загружения или комбинации загружений.

Усталостный расчет через вычисление вынужденных колебаний используется в случае пересечения на частотной оси спектра возмущающего воздействия и собственных частот модели.

Обычно ожидается, что чем больше конечных элементов в расчетной модели, тем больше потребное время для вычисления каждого временного отсчёта.

Вызовите диалог «Расчет» из главного меню «Расчеты >> Расчет...». Затем включите переключатель в пункте «Расчет только для групп элем.». Переключатель будет недоступен пока не создан хоть один ГЭ. Заполните поля «Логарифмический декремент колебаний» и «Количество учитываемых собственных форм». Поле «Интервал: 0- » заполняется в случае расчета для ГЭ автоматически, исходя из заданного графика нагрузки. Поле «Моментов времени» содержит число точек заданного графика нагрузки. Задавать больше автоматически указанного числа для кривой, созданной соединением точек линиями, не рекомендуется.

После того как расчет вынужденных колебаний был произведён, вызовите диалог «Результаты вынужденных усталостных колебаний», выбрав пункт главного меню «Результаты >> Долговечность при случайном усталостном нагружении...».

Столбцы отражают информацию по номерам ГЭ, КЭ, узлов и поверхностей (только для пластинчатых КЭ). Следующие колонки каждого узла КЭ из ГЭ соответствуют найденному числу полуциклов «методом дождя», напряжению эквивалентному  $\sigma_{31}$ , эквивалентному числу циклов  $n_{3 \sin}$  в колонке с названием «N Eq».

Колонка «N 50%» соответствует числу циклов для вычисленного значения эквивалентного напряжения  $\sigma_{э1}$  по кривой Вёлера. Значения в колонке «50% долговечность» отражают преобразованное к часам значение колонки «N 50%» исходя из эквивалентного числа циклов в единицу времени. Это значение вычисляется как отношение эквивалентного числа циклов к суммарному времени загрузки, учитывающее число «Повторов» в каждой стадии.

Колонка «Запас по долговечности» - итоговый запас по долговечности, вычисляется как отношение значений в колонке «50% долговечность» к значению «Расчетное время работы нагружения», выраженному в часах.

Как видно из таблицы итоговых результатов, значения в колонке «N Eq» могут вообще отсутствовать, а значения в колонке «N 50%» соответствуют значению  $N_C$ . В этих случаях эквивалентные приведённые напряжения не подчиняются условию разрушения, что означает выполнение условия неограниченной выносливости, при котором вычисление запаса теряет свой смысл.

Ещё один из показателей достигнутого уровня эквивалентных напряжений – это знак минус в значениях из колонки «Напряжение эквивалентное». Это было сделано для того, чтобы обозначить те значения эквивалентных по Мизесу напряжений в узле конечных элементов, которые больше предела текучести. Как уже было упомянуто выше по тексту, в таком случае выводится после расчета. Если было превышение предела текучести, то общий расчет напряжённо-деформированного состояния не может считаться корректным, поскольку деформации перестали носить упругий характер, а деформации стали уже пластическими.

Для отображения истории нагружения и эквивалентных значений напряжений от времени выбранного узла нажмите кнопку «График напряжений».

Название графика содержит указание на то, что эквивалентное напряжение отображено со знаком. Знак эквивалентного напряжения соответствует знаку наибольшего по модулю главного напряжения. Знак минус соответствует превалированию сжимающих напряжений, плюс – растягивающих.

При моделировании усталостного поведения пластинчатых конечных элементов в колонке «N поверхности» указывается значение «1» для верхней поверхности пластин и «2» - для нижней. Положение верха пластины определяется положением нормали локальной системы координат. Если сравнить график напряжений для узлов, отличающихся только положением поверхности, то нормированные значения нагрузки могут отличаться между собой только знаком.



## Тепловой расчет

### Термические свойства материала

Для проведения теплового расчета всем элемента конструкции необходимо задать материалы определенного типа – «Термический материал».

Таблица – Термические свойства материала

Свойство	Единицы измерения	Способ задания	Доступные независимые переменные – аргументы
Коэффициент температурного расширения	$\frac{1}{\text{К}}$	Постоянное значение, график, таблица, функция	температура
Теплоемкость	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}}$		
Теплопроводность	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}$		

Выбор данных свойств доступен:

- из диалогового окна Свойства/ Материалы;
- в дереве Объекты выбрать пункт Материалы, выбрать необходимый материал и нажать в контекстном меню кнопку Изменить или вызвав контекстное меню в пункте Материалы выбрать кнопку Добавить.

В диалоговом окне Материал можно как создать новый материал (кнопка Добавить...), так и отредактировать существующий (кнопка Изменить...), любой из ранее созданных материалов можно выбрать из списка в диалоговом окне Материал, в котором представлены имена всех существующих в проекте материалов. После нажатия кнопки Добавить... или кнопки Изменить... откроется диалоговое окно Выбор свойств материала, в котором находятся Текущие и Доступные свойства материала. Перенеся набор свойств Термический материал в Текущие свойства появится диалог Параметры материала. В появившемся диалоговом окне Параметры материала задаются свойства изотропного термического материала (рисунок 7.16).

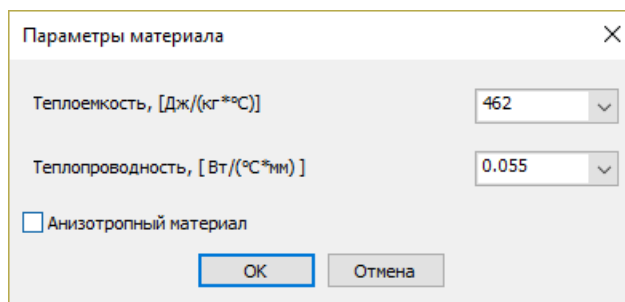


Рисунок 7.16 – Диалог задания свойств изотропного термического материала

Свойства материала могут быть заданы в виде постоянного значения, графика, таблицы или функции переменных в зависимости от типа постановки задачи.

На диалоге имеется CheckBox Анизотропный материал при нажатии на который в диалоге появятся два новых свойства (рисунок 7.17). Теплопроводность в направлении Y и Теплопроводность в направлении Z, свойство Теплопроводность смениться на Теплопроводность в направлении X.

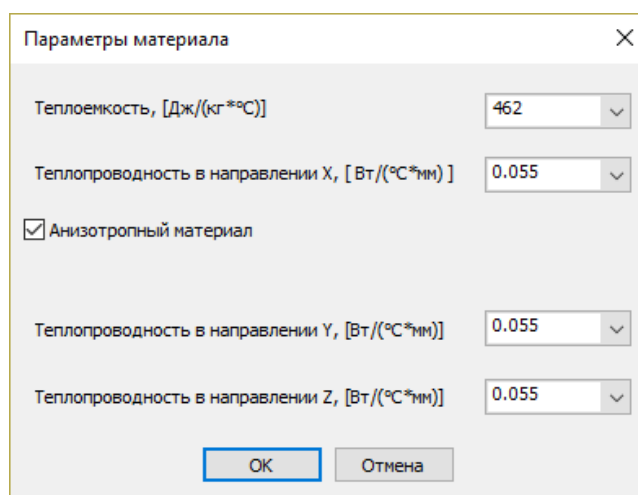


Рисунок 7.17 – Диалог задания свойств анизотропного термического материала

Термические свойства материала становятся доступным для задания или редактирования с использованием дерева панели Объекты и панели Свойства.

Свойства		Свойства	
Свойство	Значение	Свойство	Значение
Теплоемкость	462	Теплоемкость	462
Тип	Изотропный материал	Тип	Ортотропный материал
Теплопроводность	0.055	Теплопроводность по напр. X	0.055
		Теплопроводность по напр. Y	0.055
		Теплопроводность по напр. Z	0.055

а) б)  
Рисунок 7.18 – Задания термических свойств:  
а – изотропного, б – анизотропного материала

## Граничные и начальные условия

Для моделирования задач теплового расчета пользователю доступны следующие виды начальных и граничных условий:

– Температура в начальный момент времени включает режим задания НУ в виде температуры на весь конечный элемент. Данный тип НУ возможно задать на все типы конечных элементов. Учитывается только в нестационарном расчете.

– Температура включает режим задания ГУ в виде температуры на весь конечный элемент. Данный тип ГУ возможно задать на все типы конечных элементов.

– Тепловой поток включает режим задания ГУ в виде теплового потока (мощности) на весь конечный элемент. Данный тип ГУ возможно задать на все типы конечных элементов.

– Объемный источник тепла включает режим задания ГУ в виде теплового потока (мощности) распределенного по всему объему конечного элемента. Данный тип ГУ возможно задать только на стержневые, оболочечные и объемные элементы.

– Тепловая точечная масса включает режим задания ГУ в виде добавочной теплоемкости в узле. Данный тип ГУ возможно задать только на узлы. Учитывается только в нестационарном расчете.

– Скорость потока включает режим задания ГУ в виде скорости потока среды на весь конечный элемент. Данный тип ГУ возможно задать только на объемные элементы.

При задании скорости потока необходимо, чтобы выполнялось условие – число Пекле для элемента должно быть меньше 1:

$$Pe = \frac{\rho v L c_p}{\lambda} < 1$$

где  $\rho$  – плотность;  $v$  – модуль скорости потока;  $L$  – линейный размер элемента в направлении потока;  $c_p$  – удельная изобарная теплоемкость;  $\lambda$  – эквивалентный коэффициент теплопроводности в направлении потока жидкости, в противном случае результаты расчета могут быть физически неадекватными.

– Температура в начальный момент времени на поверхности включает режим задания НУ в виде температуры на поверхность конечного элемента. Данный тип НУ возможно задать только на стержневые, оболочечные и объемные элементы.

– Температура на поверхности включает режим задания ГУ в виде температуры на поверхность конечного элемента. Данный тип ГУ возможно задать только на стержневые, оболочечные и объемные элементы.

– Тепловой поток на поверхности включает режим задания ГУ в виде теплового потока распределенного на поверхности конечного элемента. Данный тип ГУ возможно задать только на стержневые, оболочечные и объемные элементы.

– Конвекция включает режим задания ГУ в виде конвективного теплообмена на поверхности конечного элемента. Данный тип ГУ возможно задать только на стержневые, оболочечные и объемные элементы.

Конвективный теплообмен на поверхности (в каждой точке поверхности) конечного элемента описывается уравнением:

$$q_{conv} = \alpha(T - T_0)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи в точке на поверхности элемента;  $T$  – температура в точке на поверхности элемента;  $T_0$  – температура окружающей среды окрестности точки на поверхности элемента,  $q_{conv}$  – тепловой поток в точке на поверхности элемента при конвективном теплообмене;

– Излучение включает режим задания ГУ в виде теплообмена излучением на поверхности конечного элемента. Данный тип ГУ возможно задать только на стержневые, оболочечные и объемные элементы.

Теплообмен излучением на поверхности (в каждой точке поверхности) конечного элемента описывается уравнением:

$$q_{rad} = \sigma\varepsilon(T^4 - T_0^4)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана;  $\varepsilon$  – степень черноты в точке на поверхности тела;  $T$  – температура в точке на поверхности элемента;  $T_0$  – температура окружающей среды окрестности точки на поверхности элемента,  $q_{rad}$  – тепловой поток в точке на поверхности элемента при теплообмене излучением.

Сведения о данных объектах приведены в таблице ниже.

Таблица –Тепловые нагрузки

Наименование	Тип	Единицы измерения	Объекты приложения	Способы задания	Доступные независимые переменные
Температура в начальный момент времени**	Скалярный	К	Узлы Стержни Пластины Объемные элементы	Постоянное значение, График, Таблица, Функция	Координата X Координата Y Координата Z
Температура	Скалярный	К			
Тепловой поток	Скалярный	Вт			
Объемный источник тепла	Скалярный	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$	Стержни Пластины Объемные элементы		Координата X Координата Y Координата Z Температура Время*
Тепловая точечная масса**	Скалярный	$\frac{\text{Дж}}{\text{К}}$	Узлы		
Скорость потока	Векторный	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	Объемные элементы		
Температура в начальный момент времени на поверхности	Скалярный	К	Стержни Пластины Объемные элементы		
Температура на поверхности	Скалярный	К			Координата X Координата Y Координата Z Время*
Тепловой поток на поверхности	Скалярный	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$			Координата X Координата Y Координата Z Температура Время*
Конвективный теплообмен на поверхности	Скалярный	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$			
Теплообмен излучением на поверхности	Скалярный	К			

\* – для стационарного расчета значение параметра равняется нулю.

\*\* – для стационарного расчета данные ГУ/НУ не учитываются.

Задание тепловых нагрузок осуществляется в дереве программы (панель инструментов Объекты/Нагрузки/Тепловые нагрузки).

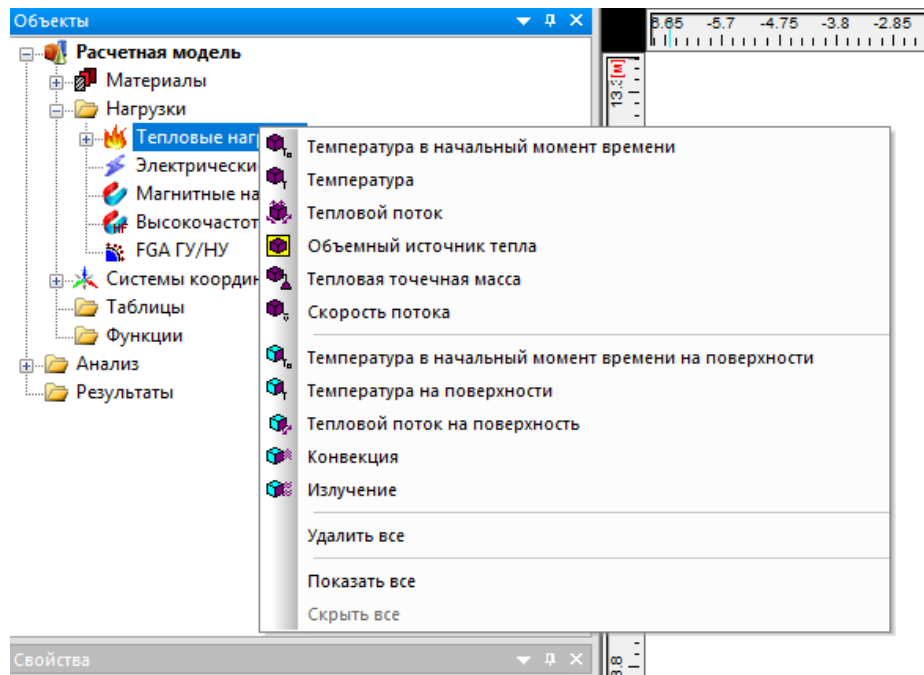


Рисунок 7.19 – Тепловые нагрузки в дереве Объекты

Этапы задания различных тепловых нагрузок рассмотрим на примере температуры:

1. В дереве Объекты/Нагрузки необходимо выбрать пункт Тепловые нагрузки и с помощью ПКМ вызвать контекстное меню с нагрузками и выбрать пункт Температура. После этого в дереве появится нагрузка Температура.

2. В панели Свойства появятся данные, которые необходимо задать:

- Загружение, в котором будет приложена данная нагрузка;
- Значение, данной нагрузки. В данной строке можно выбрать способ задания нагрузки (постоянное значение, график, таблица или функция);
- Тип элементов, на которые будет приложена данная нагрузка.

3. На панели Свойства нажать кнопку Установить и выбрать необходимые элементы, после чего нажать кнопку Применить. В строке Количество отобразится количество элементов, на которые примениться данная нагрузка.

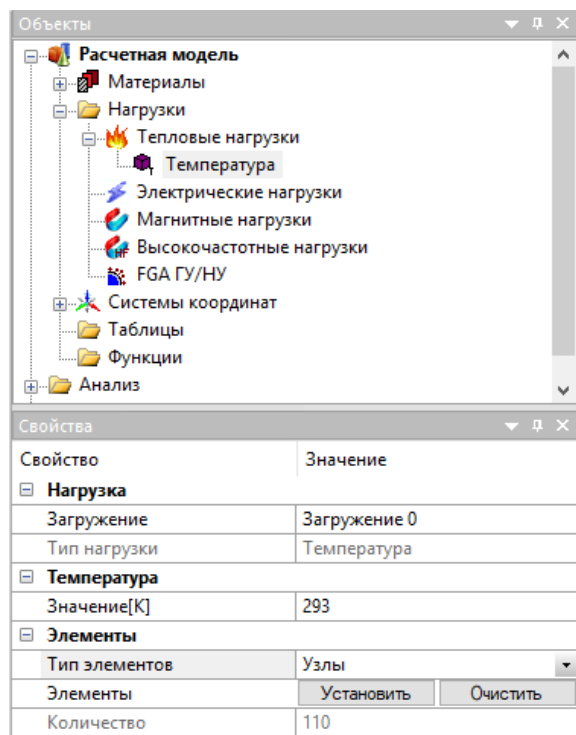


Рисунок 7.20 – Настройки нагрузки Температура на панели Свойства

При задании различных тепловых нагрузок на поверхности конечных элементов первые три пункта идентичны. Далее нужно установить поверхности, на которые будет приложена нагрузка.

4. В строке Номер поверхности на панели Свойства необходимо выбрать номер поверхности или в строке Задание поверхностей по узлам нажать кнопку Установить.

5. После нажатия кнопки Установить на рабочем поле программы будут показаны только КЭ с узлами, что были выбраны в пункте 3. После этого необходимо выбрать узлы, которые будут определять необходимые поверхности для данных КЭ:

- для объемных КЭ необходимо выбрать минимум все узлы, которые однозначно определяют поверхность элемента;
- для пластинчатых КЭ необходимо выбрать минимум два узла, которые однозначно определяют поверхность элемента;
- для стержневых КЭ необходимо выбрать минимум один узел, который однозначно определить поверхность элемента.

Номера поверхностей для различных типов КЭ представлены на рисунке 7.22.

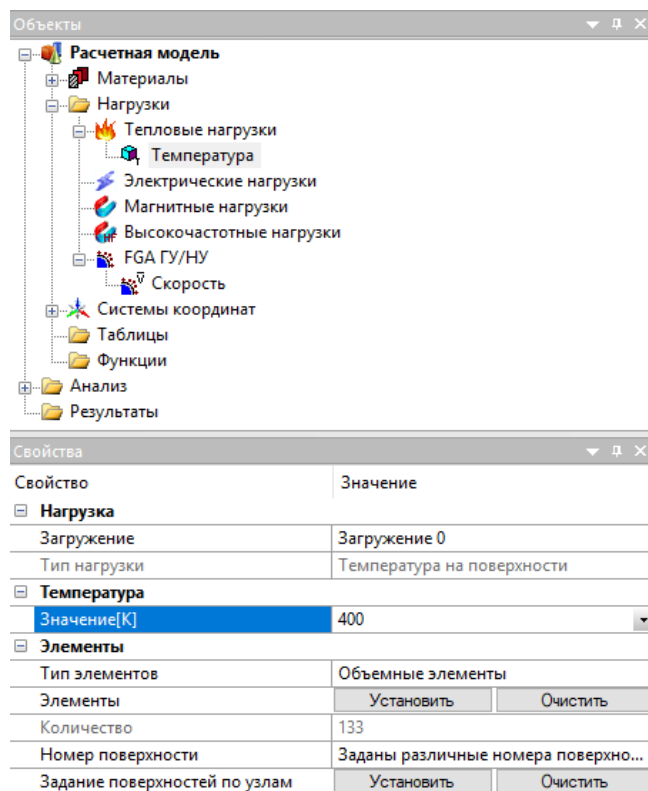


Рисунок 7.21 – Настройки нагрузки Температура на поверхности на панели Свойства



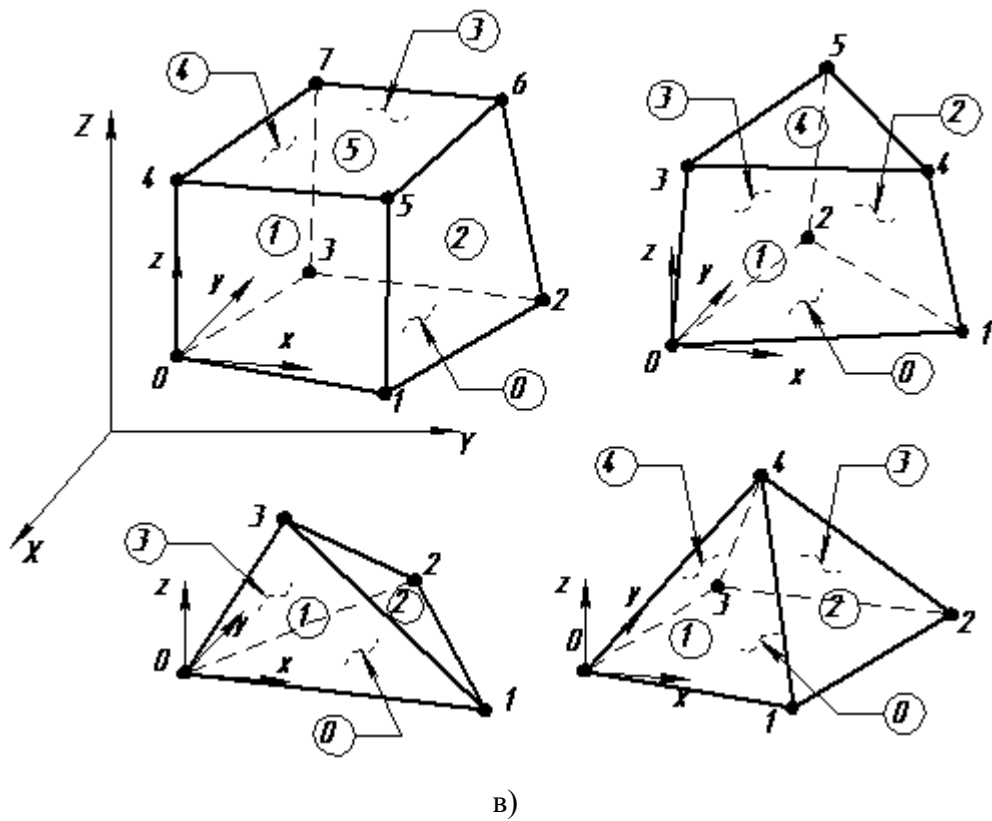
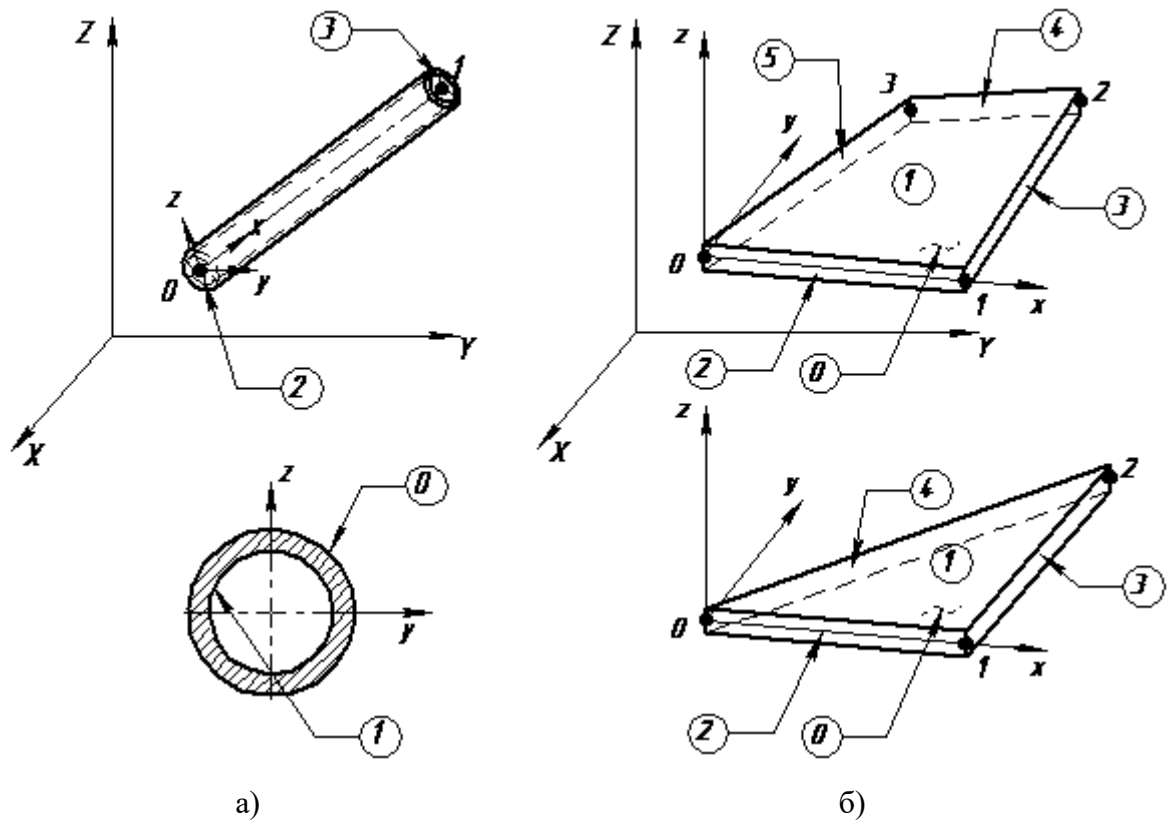


Рисунок 7.22 – Номера поверхностей для КЭ:  
 а – стержневые, б – пластинчатые, в – объемные

## Типы и параметры тепловых расчетов

Для проведения теплового расчета необходимо сделать выбрать в горизонтальном меню Расчет пункт расчет Расчет... (рисунок 7.23), затем в открывшемся диалоге «Расчет» нужно выбрать Расчет стационарной теплопроводности (рисунок 7.24 а) или Расчет нестационарной теплопроводности (рисунок 7.24 б) и выбрать Загружение для которого будет производиться расчет.

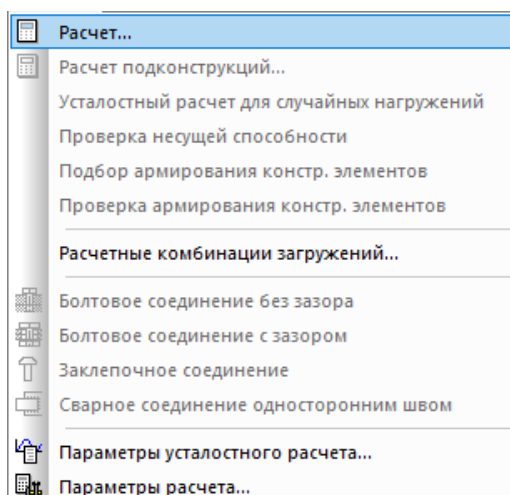
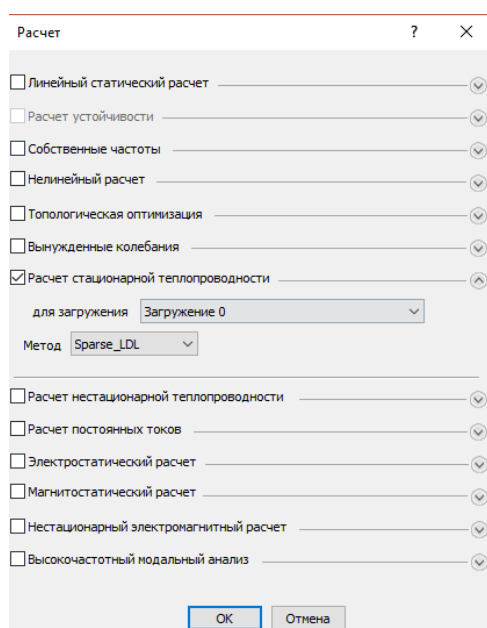
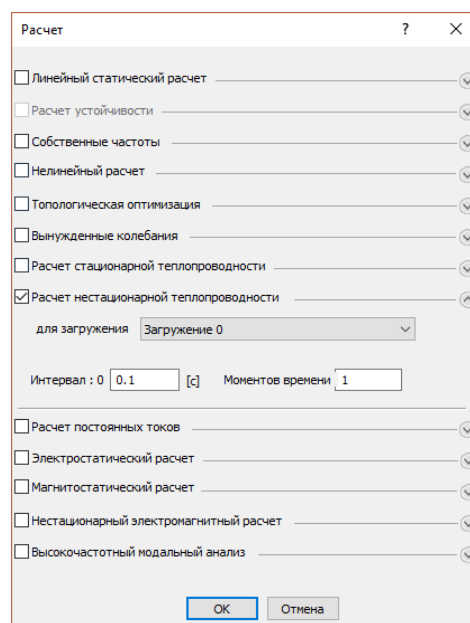


Рисунок 7.23 – Выбор пункта меню Расчет...



а)



б)

Рисунок 7.24 – Выбор теплового расчета: а – стационарного, б – нестационарного

При выборе Расчета нестационарной теплопроводности необходимо указать следующие настройки расчета:

– Интервал – промежуток, для которого будет проводиться тепловой расчет;

– Моментов время – количество шагов, на которое будет поделен интервал и для которых будут доступны результаты теплового расчета.

### Результаты теплового расчета

Для просмотра карт результатов пользователь должен выбрать в горизонтальном меню Результаты пункт Результаты теплового анализа... или пункт Карта результатов (рисунок 7.25), после чего появится диалог Параметры вывода результатов (рисунок 7.26 или 7.27, в зависимости от типа расчета).

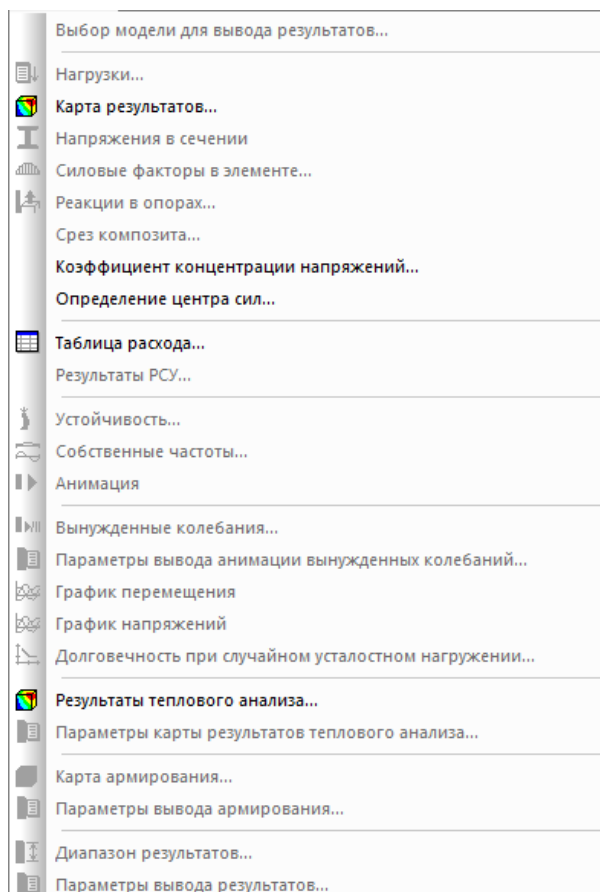


Рисунок 7.25 – Меню Результаты после теплового анализа

В диалоге Параметры вывода результатов необходимо выбрать тип расчета. В зависимости от проведенного теплового расчета это Стационарная теплопроводность или Нестационарная теплопроводность.

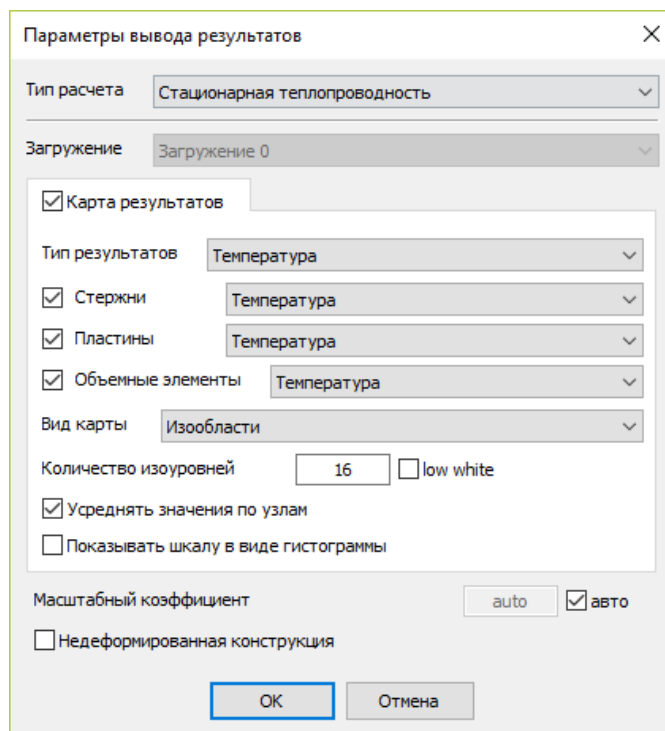


Рисунок 7.26 – Диалог Параметры вывода результатов для типа расчета Стационарная теплопроводность

Если предварительно было посчитано несколько различных загрузок, то необходимо выбрать загрузку, для которого будут выводиться карты результатов. Если же посчитано только одно загрузка, то выбор будет недоступен.

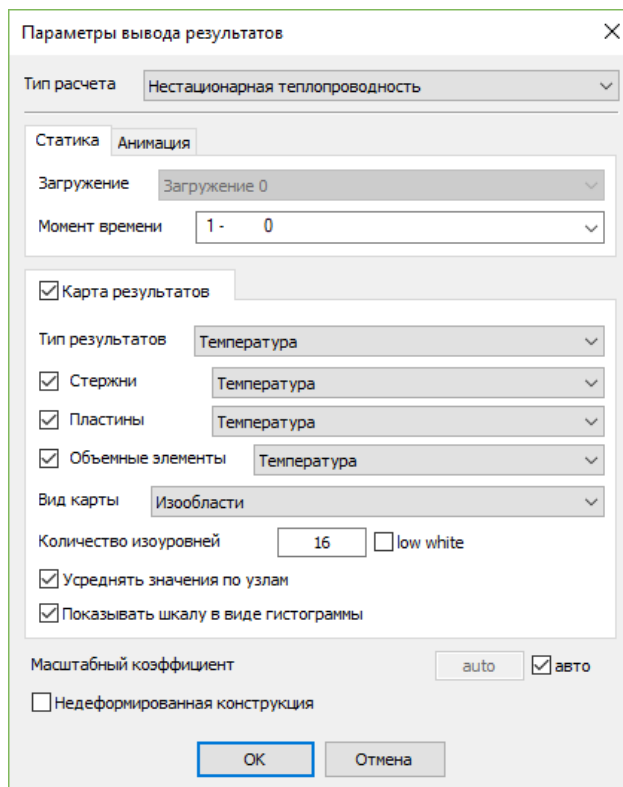


Рисунок 7.27 – Диалог Параметры вывода результатов для типа расчета Нестационарная теплопроводность

Таблица – Результаты теплового расчета

Тип результата	Подтип результата	Стержни	Пластины	Объемные элементы
Температура	Температура	+	+	+
Тепловой поток	TFLUX_SUM	+	+	+
	TFLUX_X	+	+	+
	TFLUX_Y	+	+	+
	TFLUX_Z	+	+	+
	TFLUX_X_LOC	–	+	+
	TFLUX_Y_LOC	–	+	+
	TFLUX_Z_LOC	–	–	+
Векторный тепловой поток	TFLUX_SUM	+	+	+
	TFLUX_X	+	+	+
	TFLUX_Y	+	+	+
	TFLUX_Z	+	+	+
	TFLUX_X_LOC	–	+	+
	TFLUX_Y_LOC	–	+	+
	TFLUX_Z_LOC	–	–	+
Градиент температуры	TGRAD_SUM	+	+	+
	TGRAD_X	+	+	+
	TGRAD_Y	+	+	+
	TGRAD_Z	+	+	+
	TGRAD_X_LOC	–	+	+
	TGRAD_Y_LOC	–	+	+
	TGRAD_Z_LOC	–	–	+
Векторный градиент температуры	TGRAD_SUM	+	+	+
	TGRAD_X	+	+	+
	TGRAD_Y	+	+	+
	TGRAD_Z	+	+	+
	TGRAD_X_LOC	–	+	+
	TGRAD_Y_LOC	–	+	+
	TGRAD_Z_LOC	–	–	+
Скорость изменения температуры*	TEMP_VEL	+	+	+

\* – для стационарного расчета тип результата недоступен.

В диалоге Параметры вывода результатов можно настроить следующие параметры:

- Вид карты (изообласти, максимальные значения в элементе);
- Количество изоуровней;
- Усреднение значений по узлам;
- Показывать шкалу в виде гистограммы;
- Недеформированная конструкция (КЭ сетку).

Для нестационарной теплопроводности в диалоге Параметры вывода результатов доступны карты результатов в различные моменты времени.

Для нестационарной теплопроводности в диалоге Параметры вывода результатов доступны не только карты результатов, но их анимация в отдельной вкладке. После выбора необходимых параметров и нажатия кнопки Ок в диалоге Параметры вывода результатов, появится окно стандартное анимации результатов со стандартным диалогом настройки параметров анимации (рисунок 7.28).

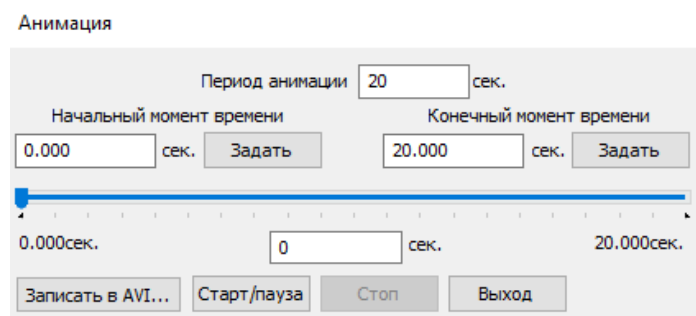


Рисунок 7.28 – Диалог Анимация

Для стационарной теплопроводности доступны следующие карты результатов:

- Температура;
- Тепловой поток;
- Векторный тепловой поток;
- Градиент температуры;
- Векторный градиент температуры.

Для нестационарной теплопроводности добавляется еще карта результатов – Скорость изменения температуры.

При выборе пунктов Векторный тепловой поток и Векторный градиент температуры ниспадающего списка Тип результатов вид диалога изменяется (рисунок 7.29). В диалоге появляется:

- шкала Масштаб векторов;
- CheckBox Одинаковый размер;

– радиокнопка Тип векторов.

При этом из диалога исчезают радиокнопки Изообласти и Максимальное значение в элементе, а также CheckBox Усреднять значения по узлам.

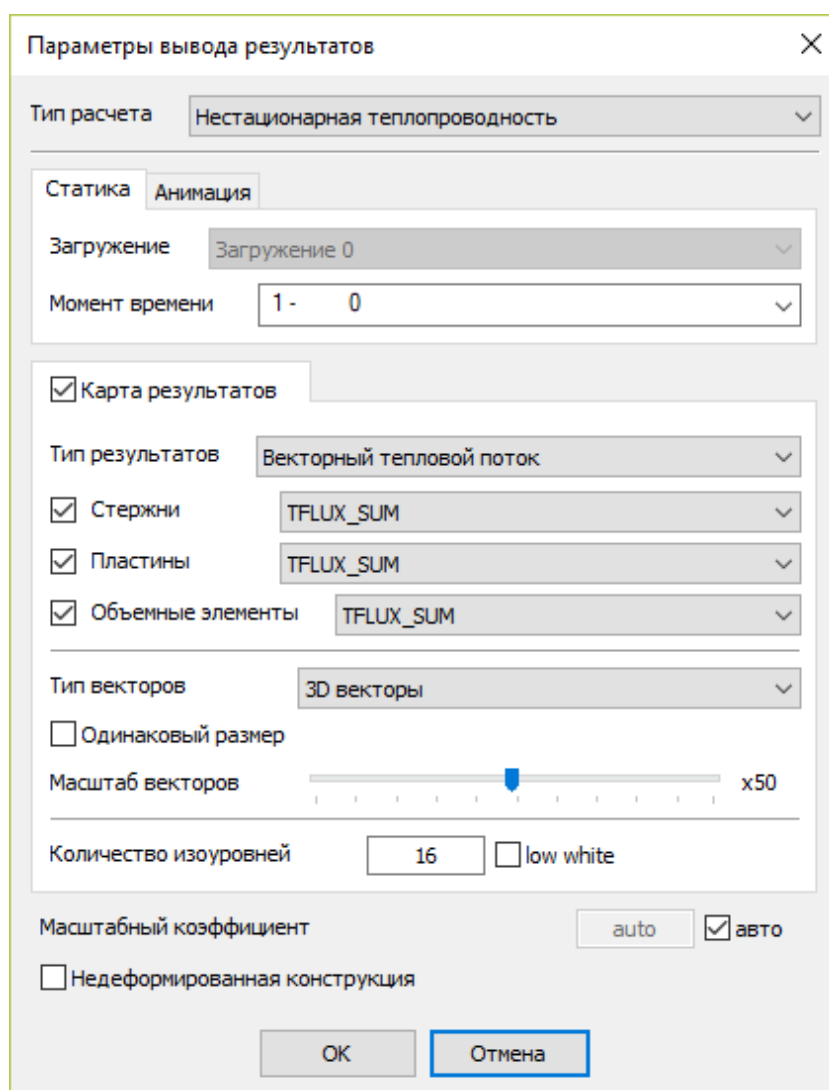


Рисунок 7.29 – Диалог Параметры вывода результатов при выборе векторных результатов

Радиокнопка Тип векторов позволяет выбрать вид отображаемых векторов (Линия, 2D векторы, 3D векторы). Шкала Масштабирование вектора позволяет в относительных единицах [1; 100] выставить размер отрисовываемых векторов. CheckBox Одинаковый размер позволяет сделать, чтобы все вектора отрисовывались одним размером в соответствии с выбранным масштабом.

Для изменения параметров карты результатов при ее просмотре доступен пункт Параметры карты результатов теплового анализа... горизонтального меню Результаты (рисунок 7.30), после выбора которого, появится диалог Параметры вывода результатов, где можно изменить параметры карты результатов.

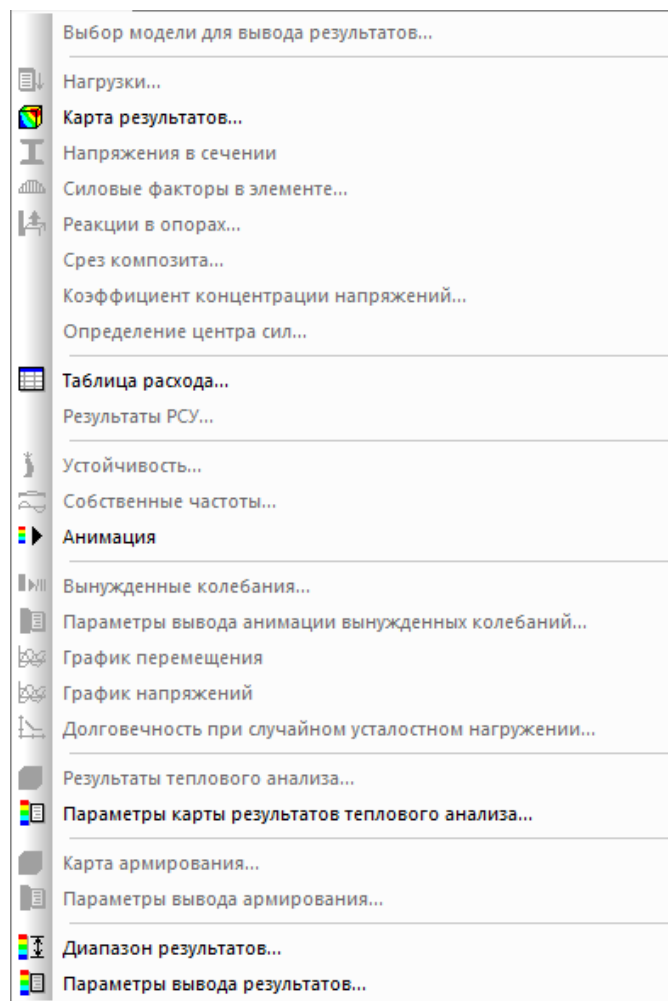


Рисунок 7.30 – Выбор пункта меню Параметры карты результатов теплового анализа...

При просмотре карты результатов доступен также пункт Анимация результатов теплового анализа... горизонтального меню Результаты, после выбора которого, появиться окно стандартное анимации результатов со стандартным диалогом настройки параметров анимации. При этом будут анимироваться результаты открытой карты результатов.

В остальном просмотр результатов теплового анализа ничем не отличается от просмотра результатов других типов расчета.

### **Теоретические основы по задачам нестационарной теплопроводности**

#### **Уравнение нестационарной теплопроводности**

Рассмотрим задачу о распространении тепла в произвольной трехмерной области  $\Omega$ . Введем систему координат  $Oxyz$  и выделим элементарный малый объем  $dV = dx dy dz$  (рисунок 7.31).



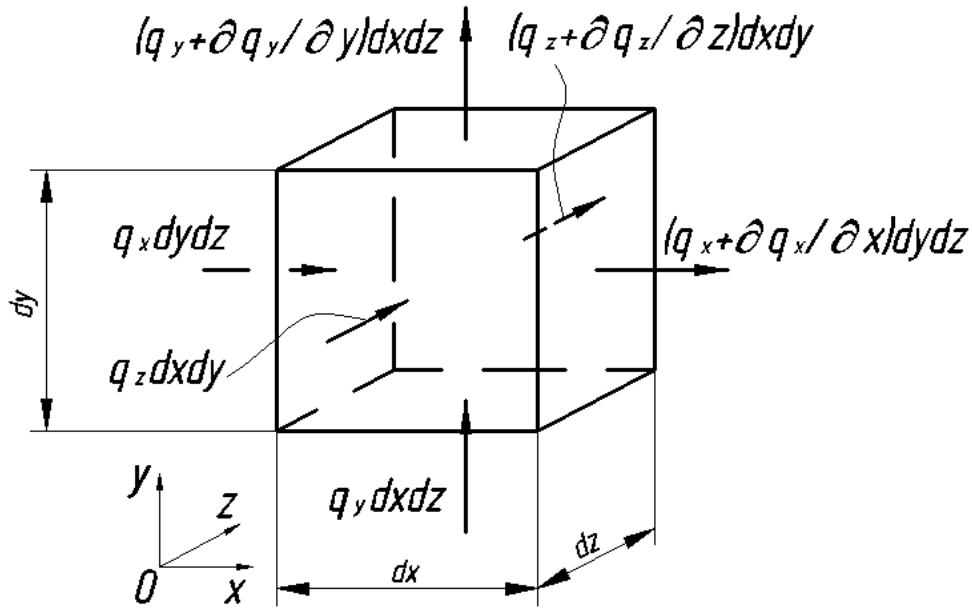


Рисунок 7.31 – Элементарный объем

Обозначим потоки тепла за единицу времени ( $t$ ) –  $q_x$ ,  $q_y$  и  $q_z$  в направлениях  $x$ ,  $y$  и  $z$  соответственно. Из условия теплового равновесия выделенного элемента видно, что сумма по всем направлениям входящих и исходящих потоков должна равняться сумме тепла генерируемого в объеме за единицу времени  $Q dx dy dz$  и тепла, освобождаемого в единицу времени из-за изменения температуры  $T$ , а именно –  $\rho c DT/Dt$ , где  $\rho$  – плотность материала и  $c$  – удельная изобарная теплоемкость материала:

$$\begin{aligned} \left( q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx - q_x \right) dy dz + \left( q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - q_y \right) dx dz + \left( q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz - q_z \right) dx dy = \\ = Q dx dy dz - \rho c \frac{DT}{Dt} dx dy dz \end{aligned}$$

Проведя некоторые преобразования, получим:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - Q + \rho c \frac{DT}{Dt} = 0$$

Для анизотропной тепловой среды имеет место следующий закон:

$$\begin{cases} q_x = -\lambda_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} - \lambda_{xy} \frac{\partial T}{\partial y} - \lambda_{xz} \frac{\partial T}{\partial z} \\ q_y = -\lambda_{yx} \frac{\partial T}{\partial x} - \lambda_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} - \lambda_{yz} \frac{\partial T}{\partial z} \\ q_z = -\lambda_{zx} \frac{\partial T}{\partial x} - \lambda_{zy} \frac{\partial T}{\partial y} - \lambda_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \end{cases}$$

где  $\lambda_{ij}$  – коэффициенты теплопроводности анизотропной среды.

Для ортотропной тепловой среды имеет уравнения выше принимают вид:

$$\begin{cases} q_x = -\lambda_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \\ q_y = -\lambda_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \\ q_z = -\lambda_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \end{cases}$$

В случае изотропной среды выражение принимает вид закона Фурье – Кирхгофа:

$$\begin{cases} q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \\ q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \\ q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \end{cases} \text{ или } \bar{q} = -\lambda \text{ grad } T$$

где  $\bar{q} = (q_x \ q_y \ q_z)$  – вектор потока тепла за единицу времени и  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности изотропной среды.

Учитывая уравнения выше, получим уравнение теплопроводности для неоднородной анизотропной среды:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda_{xy} \frac{\partial T}{\partial y} + \lambda_{xz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{yx} \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} + \lambda_{yz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{zx} \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda_{zy} \frac{\partial T}{\partial y} + \lambda_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q - \rho c \frac{DT}{Dt} = 0 \end{aligned}$$

В случае ортотропной среды уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q - \rho c \frac{DT}{Dt} = 0$$

В случае изотропности среды уравнение существенно упрощается и имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q - \rho c \frac{DT}{Dt} = 0$$

Для однородной среды уравнение принимает вид:

$$\lambda \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + Q - \rho c \frac{DT}{Dt} = 0$$

Заметим, что величину  $DT/Dt$  принято называть субстанциональной производной, которое определяется выражением:

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z}$$

где  $v_x$ ,  $v_y$ , и  $v_z$  – проекции вектора скорости потока среды на оси глобальной системы координат.

Краевые и начальные условия, характеризующие распределение поля температур в начальный момент времени и интенсивность теплообмена между поверхностью детали и окружающей средой, заданную по закону Ньютона-Рихмана, имеют вид:

$$\begin{aligned} T|_{t_0} &= f_0(x, y, z) \\ T|_{S_1} &= f_1(x_{S_1}, y_{S_1}, z_{S_1}, t) \\ \frac{\partial T}{\partial n}\Big|_{S_2} &= f_2(x_{S_2}, y_{S_2}, z_{S_2}, t) \end{aligned}$$

где  $f_0, f_1, f_2$  – известные функции,  $S_1$  – часть граничной поверхности, на которой задано распределение температуры,  $S_2$  – часть граничной поверхности, на которой задано распределение потоков тепла;  $n$  – единичный вектор внешней нормали к поверхности.

Заметим, что выражение первое выражение является начальным условием, второе выражение принято называть краевым условием первого рода. В случае если в правой части третьего выражения стоит функция пространственных координат и времени в явном виде, то это краевое условие второго рода, если в правую часть входит только температура на поверхности  $S_2$ , получаем краевое условие третьего рода (конвективный теплообмен, излучение), комбинация последних двух случаев представляет собой краевое условие смешанного типа.

### Применение МКЭ для решения задач

Используя частичную (температуру будем рассматривать как произведение двух функций, одна из которых зависит только от времени, вторая только от пространственных координат) конечно-элементную аппроксимацию на основе метода Галеркина в слабой формулировке, получим разрешающую систему обыкновенных дифференциальных уравнений для конечного элемента в матричном виде:

$$[C] \frac{\partial \{T\}}{\partial t} + [K] \{T\} = \{F\}$$

где  $[C]$  – матрица теплоемкости (термическое демпфирование);  $[K]$  – полная матрица теплопроводности;  $\{F\}$  – полный вектор тепловых нагрузок:

$$\begin{aligned} [C] &= \int_V \rho c \{N\} \{N\}^T dV \\ [K] &= [K]_{Td} + [K]_{Ta} + [K]_{Tc} + [K]_{Tr} \end{aligned}$$

где  $[K]_{Td}$  – матрица диффузионной теплопроводности;  $[K]_{Ta}$  – матрица адвективной теплопроводности;  $[K]_{Tc}$  – матрица конвективной теплопроводности;  $[K]_{Tr}$  – матрица теплоотдачи излучением:

$$[K]_{Td} = \int_V [B]^T [\Lambda] [B] dV, \quad [K]_{Ta} = \int_V \rho c [N] \{v\}^T [B] dV,$$

$$[K]_{Tc} = \int_{S_c} \alpha \{\bar{N}\} \{\bar{N}\}^T dS_c, \quad [K]_{Tr} = \int_{S_r} q_r \{\bar{N}\} \{\bar{N}\}^T dS_r$$

$$\{F\} = \{F\}_f + \{F\}_c + \{F\}_h + \{F\}_r$$

где  $\{F\}_f$  – вектор тепловых потоков;  $\{F\}_c$  – вектор конвективного теплообмена;  $\{F\}_h$  – вектор объемных источников тепла;  $\{F\}_r$  – вектор лучистого теплообмена:

$$\{F\}_f = \int_{S_f} q_f \{\bar{N}\} dS_f, \quad \{F\}_c = \int_{S_c} \alpha T_{env} \{\bar{N}\} dS_c,$$

$$\{F\}_h = \int_V Q \{N\} dV, \quad \{F\}_r = \int_{S_r} q_r T_{env} \{N\} dS_r$$

$$q_r = \sigma \varepsilon (T'^2 + T_{env}'^2) (T' + T_{env}')$$

Символ «'» в выражении выше указывает на то, что значения температур берутся на предыдущем шаге по времени или, для нелинейного решения, с предыдущей итерации.

$\{N\} = (N_1 \ \dots \ N_n)^T$  – вектор узловых базисных функций (базисные функции с верхним подчеркиванием « $\bar{N}$ » – это базисные функции элемента, рассчитанные на соответствующей поверхности  $S_c$ ,  $S_r$  или  $S_f$ ).

$[B] = (\{B\}_1 \ \dots \ \{B\}_n)$  – матрица производных базисных функций:

$$\{B\}_i = \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} \quad \frac{\partial N_i}{\partial y} \quad \frac{\partial N_i}{\partial z} \right)^T, \quad i = 1 \dots n$$

$[\Lambda]$  – матрица теплопроводности, для ортотропной среды:

$$[\Lambda] = \begin{pmatrix} \lambda_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{zz} \end{pmatrix}$$

$\{v\} = (v_x \ v_y \ v_z)$  – вектор скорости потока среды.

$S_c$  – поверхность конвективного теплообмена (краевое условие третьего рода);  $S_r$  – поверхность лучистого теплообмена (излучение);  $S_f$  – поверхность, на которой

заданы тепловые потоки в явном виде (краевое условие второго рода);  $V$  – объем конечного элемента;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $\varepsilon$  – степень черноты серого тела;  $T_{env}$  – температура окружающей среды;  $Q$  – объемная плотность источников тепла;  $q_f$  – плотность тепловых потоков на поверхности  $S_f$ .

Заметим, что краевые условия первого рода задаются непосредственной подстановкой значения узловой температуры в ансамблированные уравнения полной системы.

### Дискретизация задачи во временной области

Для интегрирования по времени выбрана универсальная  $\theta$ -схема Вилсона, согласно которой решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений на каждом последующем шаге по времени может быть найдено решения следующего матричного уравнения:

$$\left(\frac{1}{\theta\Delta t}[C] + [K]\right)\{T\}_{i+1} = \{F\}_{i+1} + [C]\left(\frac{1}{\theta\Delta t}\{T\}_i + \frac{1-\theta}{\theta}\frac{\partial\{T\}_i}{\partial t}\right)$$

где индексы « $i$ » и « $i + 1$ » соответствуют текущему и последующему шагу по времени;  $\theta$  – параметр схемы интегрирования лежит в интервале  $[0; 1]$ ;  $\Delta t$  – шаг интегрирования по времени.

Величина  $\frac{\partial\{T\}_i}{\partial t}$ , входящая в уравнение выше определяется из следующего матричного уравнения:

$$[C]\frac{\partial\{T\}_i}{\partial t} = \{F\}_i - [K]\{T\}_i$$

Далее приведем описания схем интегрирования для некоторых значений параметра  $\theta$ :

- 1) Схема Эйлера с обратным шагом ( $\theta = 1$ ): это неявная схема, которая, безусловно устойчива, а точность ее зависит от шага по времени.
- 2) Схема Эйлера с прямым шагом ( $\theta = 0$ ): это явная схема условно устойчивая схема (ее использование не рекомендуется).
- 3) Схема Кранка–Николсона ( $\theta = 0,5$ ): это «полуявная» схема, обладает склонность к осцилляциям решения при большом шаге интегрирования по времени, поэтому ее часто называют «косвенно» устойчивой схемой.

## Односторонний FSI в APM Structure3D

Данный анализ позволяет учитывать результаты полей давлений и/или температур, полученных с помощью APM FGA для жидких и газовых агрегатных состояний, в расчетах НДС твердых тел в автоматическом или полуавтоматическом режимах.

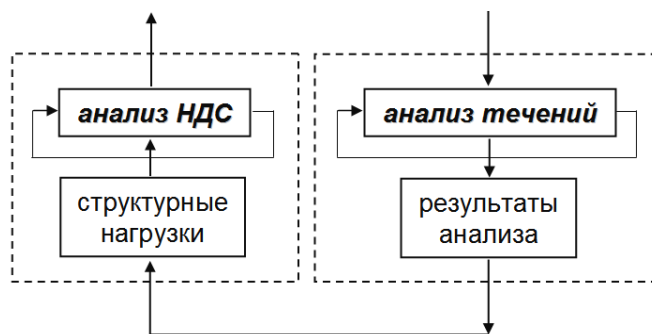


Рисунок 7.32 – Односторонняя связь между решателями

Схема нахождения общего решения сопряженной задачи в данном случае выглядит следующим образом.

1. Решается задача течений жидкостей и газов пока не будет достигнута требуемая точность этого решения.
2. Результаты анализа течений, а именно поле давлений на границе раздела агрегатных состояний веществ, представляется в виде структурных нагрузок (сил или давлений).
3. Решается задача определения напряженно-деформированного состояния твердого тела пока не будет достигнута требуемая точность этого решения.

Задачи типа одностороннего FSI могут быть решены в APM FGA двумя путями:

1. Запуск на расчет НДС твердого тела с непосредственным указанием для учета в качестве нагрузок необходимых существующих результатов FGA.
2. Запуск на расчет НДС твердого тела с предварительным формированием необходимых структурных нагрузок в указанных загрузениях на основе существующих результатов FGA с помощью конвертера.

При запуске расчета напряженно-деформированных состояний твердых тел с помощью команды главного меню Расчеты / Расчет... и, в появившемся диалоге установки опций Учитывать поле давлений из FGA и/или Учитывать поле температур из FGA, будет автоматически сформирован узловой вектор правых частей для уравнений статики напрямую из результатов анализа течений Навье-Стокса. При этом необходимо указать этот доступный набор результатов посредством выбора Загрузка, Момент времени, Итерация.

При проведении данного анализа рекомендуется следующее:

- не добавлять структурные нагрузки в то же загрузение, для которого уже были получены результаты течений Навье-Стокса, чтобы при анализе результатов НДС для этого загрузения была возможность оценить влияние только полей давлений и/или температур на твердое тело;
- другие структурные нагрузки, действующие на твердое тело, следует задавать в отдельных загрузениях, а их сочетание возможно учесть с помощью комбинаций загрузений.

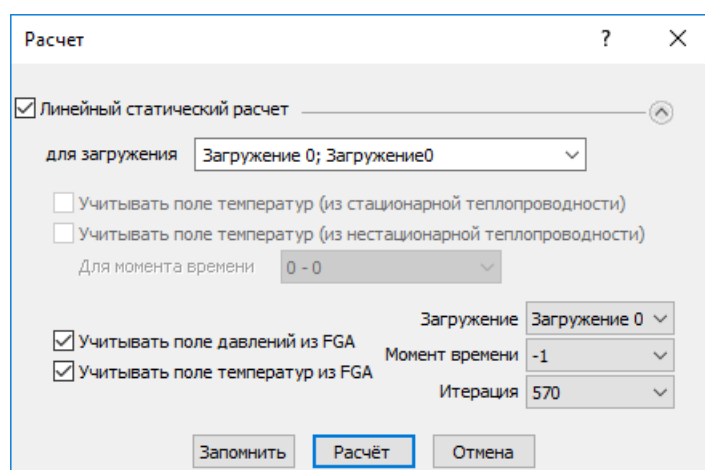


Рисунок 7.33 – Диалог Расчет. Учет результатов анализа течений Навье-Стокса

Также для анализа напряженно-деформированного состояния твердого тела существует возможность непосредственно сконвертировать саму структурную нагрузку из результатов анализа течений, вызвав диалоговое окно с помощью команды главного меню Нагрузки / Результаты FGA в структурные нагрузки.

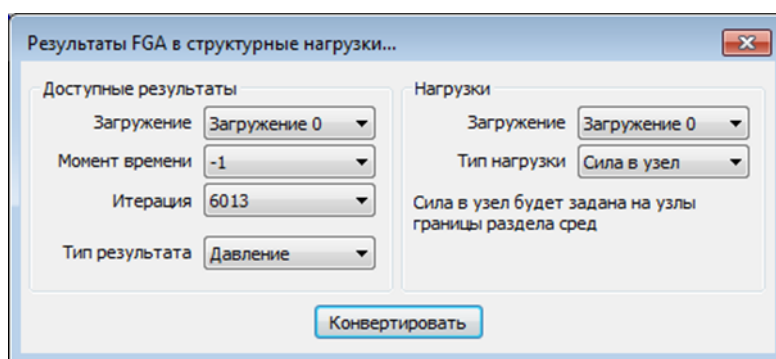


Рисунок 7.34 – Диалог конвертера результатов FGA в структурные нагрузки. Учет результатов анализа течений Навье-Стокса

В данном диалоговом окне аналогичным образом в качестве доступных результатов анализа течений можно выбрать Тип результата Давление или Температура. При этом в качестве опций при создании структурных нагрузок можно указать Загрузка, в котором эта нагрузка будет создана. Для типа результата Давление тип

нагрузки может быть сконvertирован как вектор сил в узлы на границе раздела агрегатных состояний или же как давление на поверхность объемного элемента или пластину. Для типа результата Температура тип нагрузки будет сконvertирован в виде температуры в узлах на границе раздела агрегатных состояний или же в виде температуры в узлах или солид элементах твердого тела, если решалась задача сопряженного теплообмена.

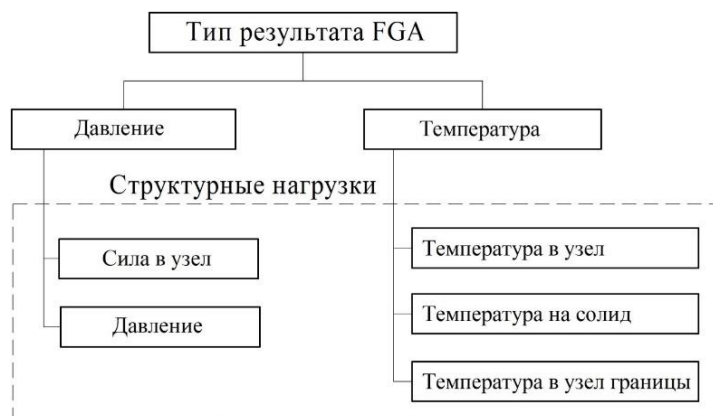


Рисунок 7.35 – Варианты конвертации результатов течений в структурные нагрузки

## Двусторонний FSI в APM Structure3D и FlowVision

### Допустимые типы элементов в APM Structure3D

При моделировании твердых тел в APM Structure3D можно использовать только объемные элементы различного порядка. При наличии в модели других типов элементов, таких как стержни, пластины и т.п. совместный расчет не возможен.

### Допустимые типы материала

В зависимости от постановки задачи сопряженного анализа течений жидких и газовых сред и твердых тел возможно использование изотопных, анизотропных и термических свойств материала.

### Типы анализа. Граничные условия и нагрузки

#### Расчет прочности

В зависимости от постановки задачи в APM Structure3D доступен выбор линейно-статического или геометрического нелинейного расчета.

При решении задачи прочности, в APM Structure3D накладываются ограничения на линейные перемещения (опоры).

При обмене между программами нагрузки в APM Structure3D передаются из FlowVision в виде узловых сил, а APM Structure3D передает перемещение узлов КЭ сетки под действием данной нагрузки.



### ***Тепловой расчет***

В зависимости от постановки задачи в APM Structure3D доступен тепловой расчет в стационарной или нестационарной постановке.

При обмене между программами в APM Structure3D передается тепловой поток из FlowVision на узлы, а APM Structure3D передает температуру в узлах.

### **Экспорт модели твердого тела**

Экспорт КЭ сетки для дальнейшей работы с Flow Vision осуществляется с помощью пункта меню Файл\Экспорт... Далее в появившемся диалоге необходимо указать:

- место на дисковом пространстве, где будет храниться файл;
- указать его название файла;
- указать тип файла – Flow Vision/Abaqus mesh files (\*.inp).

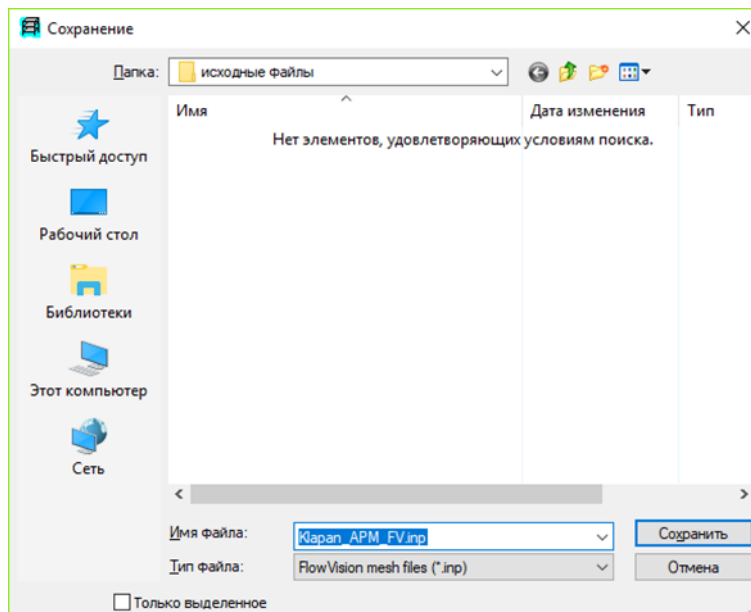


Рисунок 7.36 – Диалог Сохранение при экспорте

## Настройка сервера расчета

Для запуска сервера расчета в пункте меню Инструменты / Сервер расчета необходимо выбрать команду Сервер обмена TPC/IP..

В появившемся диалоге необходимо указать тип расчета, который будет проводиться:

- прочностной расчет. Данный расчет доступен в линейной постановке (линейная зависимость деформаций и напряжений) или с учетом больших перемещений (геометрический нелинейный расчет);
- тепловой расчет. Данный расчет доступен в стационарной и нестационарной постановке.

Для обмена между программами необходимо задать Порт, по которому будет происходить обмен между программами. При этом номер порта в APM Structure3D должен совпадать с портом, который будет задан во FlowVision.

Для запуска обмена между программами необходимо нажать кнопку Запустить. Кнопка Остановить отключает обмен между программами.

В окне Лог отображается информация по обмену между программами.

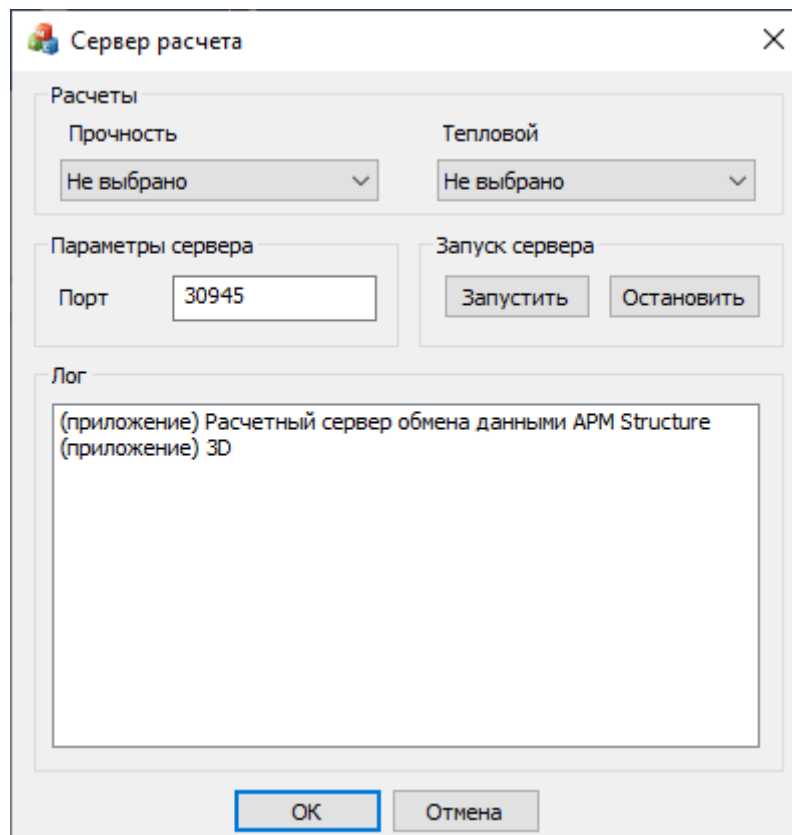


Рисунок 7.37 – Диалог Сервер расчета после запуска сервера

## Анализ электромагнитных полей

Средства анализа электромагнитных полей могут использоваться для исследования различных проявлений электромагнетизма, как, например, самоиндукция, плотность магнитного потока, распределение силовых линий магнитного поля, потери электрической мощности и другие родственные явления. Эти средства эффективны при анализе таких устройств, как соленоиды (катушки индуктивности), магнитные пускатели, электродвигатели, источники постоянных магнитных полей, трансформаторы, электромагниты, и т.п. Программа располагает возможностями для решения проблем микроволновой техники (расчет волноводов, резонаторов и антенн).

Доступны три типа электромагнитного анализа:

- трехмерные стационарные электромагнитные поля;
- трехмерные низкочастотные переменные электромагнитные поля;
- трехмерные высокочастотные электромагнитные поля.

Используемая конечно-элементная формулировка рассматриваемого вида анализа основана на уравнениях Максвелла для электромагнитных полей. Введением скалярного или векторного потенциала в эти уравнения и установлением определяющих соотношений пользователь может получить уравнения, которые удобны для конечно-элементного анализа.

Подробное описание анализа электромагнитных полей находится в руководстве пользователя к программному комплексу «АРМ ЕМА».

## Анализ течения жидкостей и газов

Средства анализа течений жидкостей и газов могут использоваться для моделирования процессов различных течений.

Доступны три типа анализа:

- анализ потенциальных течений; используется для расчета полей скоростей и давлений идеальных течений;
- анализ фильтрации течений; используется для расчета полей давлений и скоростей течений через ортотропную пористую среду; реализован в стационарной и нестационарной постановках;
- анализ течений Навье-Стокса; используется для расчета полей давлений и скоростей течений в ламинарной и турбулентной постановках.

Используемая конечно-элементная формулировка для каждого из типов анализа основана на базовых законах сохранения. Поддерживаемые типы конечных элементов – solid элементы первого порядка:

- 4-х узловой тетраэдр,
- 5-и узловая пирамида,
- 6-и узловая призма,
- 8-и узловой гексаэдр.

Результатами каждого из типов анализа являются:

- поля давлений (контурные карты),
- поля скоростей (контурные и векторные карты).

Подробное описание анализа течения жидкостей и газов находится в руководстве пользователя к программному комплексу «APM FGA».

## Глава 8. Общий структурный анализ

### Текущие возможности и ограничения

#### Допустимые типы элементов

Структурный анализ может быть проведен только для объемных элементов (при наличии в модели других типов элементов, таких как стержни и пластины и т.п., они не будут учитываться в расчете) следующих типов:

- четырехузловой;
- шестиузловой;
- восьмиузловой.

При наличии в модели других типов объемных элементов (пятиузловых, десятиузловых и т.п.) расчет не будет проведен.

При наличии в модели контактных зон с типом контакта «Жесткий» или «Скользкий» они будут учтены в расчете.

#### Допустимые типы свойств материала

В структурном анализе учитываются лишь элементы со следующими свойствами материала:

- изотропный материал;
- идеальный упругопластичный;
- изотропное билинейное упрочнение;
- изотропное мультилинейное упрочнение;
- изотропное нелинейное упрочнение.

При наличии в модели допустимых типов элементов с другими материалами, не имеющих указанных эти элементы не будут учитываться в расчете.

#### Граничные условия и нагрузки

В структурном анализе учитываются граничные условия, накладываемые на линейные перемещения (опоры).

В структурном анализе учитываются следующие виды нагрузок:

- узловые силы;
- перемещения опор.

## Проведение анализа

### Создание анализа

Структурный анализ может быть создан посредством выбора пункта «Структурный анализ» контекстного меню узла «Анализ» на панели «Объекты» (рисунок 8.1а). В результате на панели «Объекты» появится узел «Структурный анализ» (рисунок 8.1б).

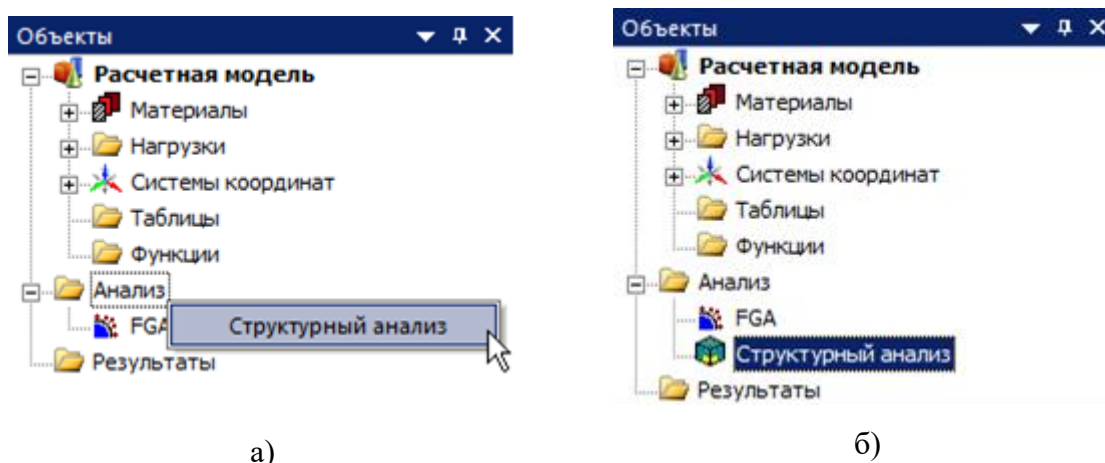


Рисунок 8.1 – Создание структурного анализа

При наличии на панели «Объекты» узла «Структурный анализ» пункт «Структурный анализ» контекстного меню узла «Анализ» не активен (рисунок 8.2).

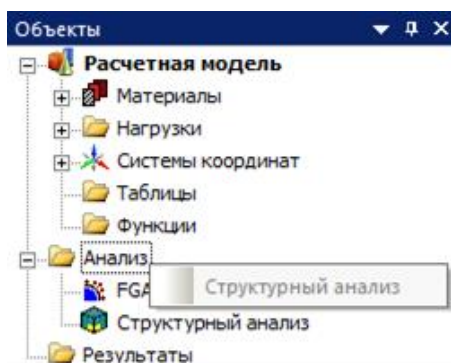
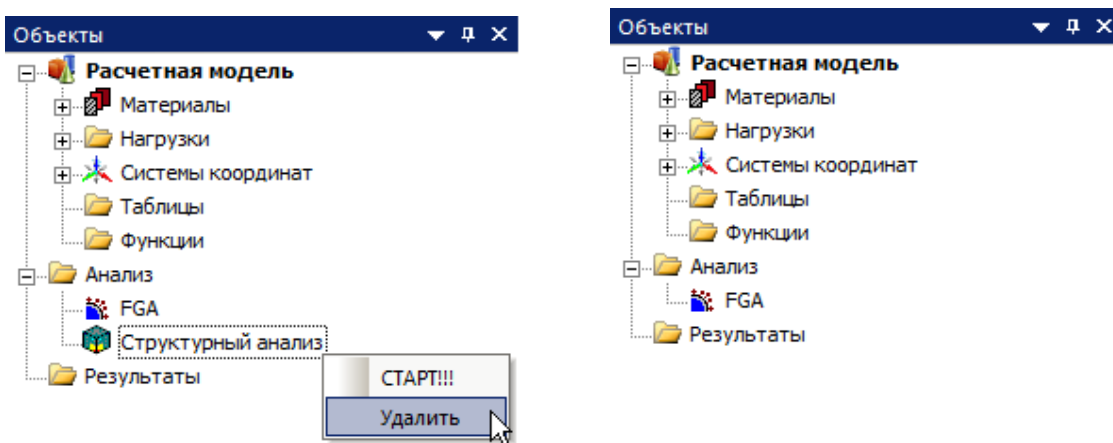


Рисунок 8.2 – Контекстное меню узла «Анализ»

### Удаление анализа

Структурный анализ может быть удален посредством выбора пункта «Удалить» контекстного меню узла «Структурный анализ» (рисунок 8.3а). В результате из панели «Объекты» исчезнет узел «Структурный анализ» (рисунок 8.3б).

При наличии в документе результатов для типа расчета «Структурный анализ» при удалении узла они будут удалены.

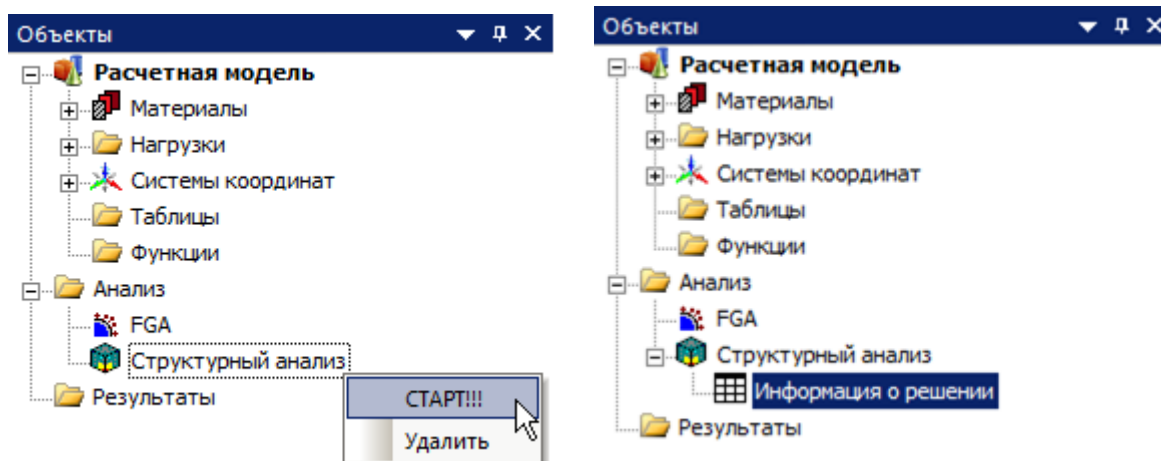


а) б)

Рисунок 8.3 – Удаление структурного анализа

### Проведение расчета

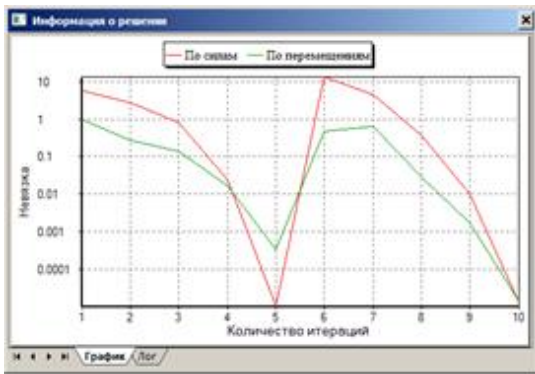
Структурный анализ может быть проведен посредством выбора пункта «СТАРТ!!!» контекстного меню узла «Структурный анализ» на панели «Объекты» (рисунок 8.4а). В результате запустится процесс расчета, а на панели «Объекты» появиться узел «Информация о решении» который станет активным (рисунок 8.4б).



а) б)

Рисунок 8.4 – Проведение структурного анализа

После запуска расчета появится диалоговое окно «Информация о решении», в котором отображается информация о решении на каждой итерации нелинейного расчета в графическом (рисунок 8.5а) и текстовом виде (рисунок 8.5б).



а)

count	time	substep	epsF	epsU
1	5.00e-01	1	5.50e+00	1.00e+00
2	5.00e-01	1	2.75e+00	2.65e-01
3	5.00e-01	1	8.00e-01	1.16e-01
4	5.00e-01	1	2.43e-02	1.72e-02
5	5.00e-01	1	1.06e-05	1.50e-04
6	1.00e+00	2	1.28e+01	4.83e-01
7	1.00e+00	2	4.16e+00	6.25e-01
8	1.00e+00	2	1.71e-01	2.91e-02
9	1.00e+00	2	1.05e-02	1.79e-03
10	1.00e+00	2	1.16e-05	1.47e-05

б)

Рисунок 8.5 – Диалоговое окно «Информация о решении»

После закрытия диалогового окна «Информация о решении» его можно открыть посредством кнопки «Показать» на панели свойства, при выделенном узле дерева «Информация о решении» на панели «Объекты» (рисунок 8.6).

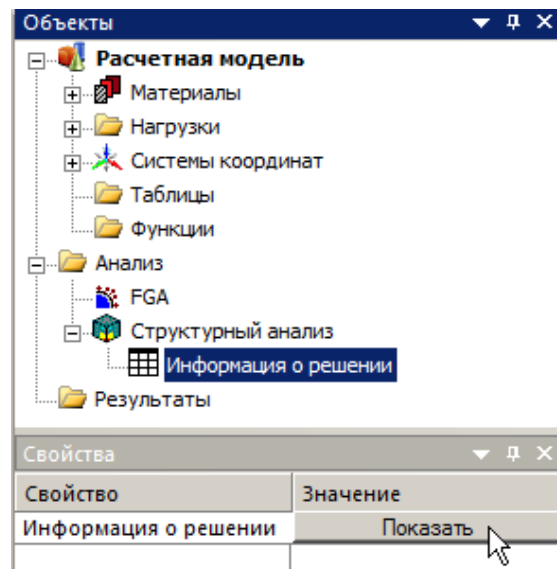


Рисунок 8.6 – Открытие диалогового окна «Информация о решении»

После проведения расчета появляется сообщение об успешном проведении расчета (рисунок 8.7). В процессе расчета может возникнуть исключительная ситуация сообщение, о котором появляется на экране (рисунок 8.8) и расчет прерывается.

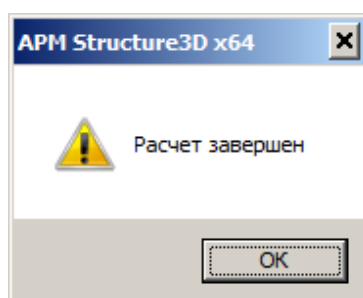


Рисунок 8.7 – Сообщение об успешном проведении расчета

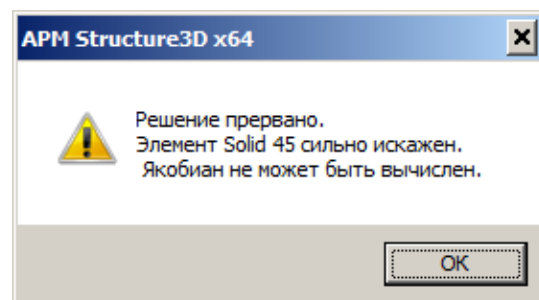


Рисунок 8.8 – Сообщение о прерывании расчета



## Настройки анализа

После выделения на панели «Объекты» узла дерева «Структурный анализ» на панели «Свойства» отобразится таблица со списком настроек анализа (рисунок 8.9)

Свойство	Значение
<b>Параметры расчета</b>	
Число шагов	50
Большие перемещения	Да
Загружение	Загружение 0
Количество итераций	40
Тип решателя	Direct Intel LDL
Значение сходимости по пере...	0.001
Значение сходимости по силам	0.001
<b>Сохранение результатов</b>	
Частота сохранения результатов	Последний шаг
Число шагов для записи резул...	1

Рисунок 8.9 – Настройки анализа

Таблица состоит из двух групп настроек: «Настройки расчета» и «Сохранение результатов». В группе «Настройки расчета» размещены опции, которые управляют постановкой решаемой задачи и техниками решения. В группе «Сохранение результатов» размещены опции, которые управляют способами сохранения результатов.

За постановку решаемой задачи в группе «Настройки расчета» отвечают две опции:

- «Большие перемещения» – эта опция имеет выпадающий список значениями «Да» и «Нет». Значение «Да» говорит о том, что будет решаться задача в формулировке больших перемещений и деформаций (что приводит к нелинейному расчету), в противоположном случае задача будет сформулирована в смысле малых перемещений и деформаций.
- «Загружение» – эта опция имеет выпадающий список значениями всех имеющихся в документе загружений. При выборе определенного загружения в расчете будут учтены допустимые нагрузки именно из выбранного загружения.

Учет других нелинейностей, таких как физически нелинейные свойства материала и контактное взаимодействие определяется наличием их в модели

За выбор техники решения в группе «Настройки расчета» отвечают следующие опции:

«Тип решателя» – эта опция имеет выпадающий список значениями «Direct Intel LL», «Direct Intel LDL», «Direct Intel LU», «Iterative Intel MINRES», «Iterative Eigen CG»,

«Iterative Eigen BICGSTAB\_DP», «Iterative Eigen BICGSTAB\_ILUT». Каждое значение соответствует методу, которым решается система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) метода конечных элементов.

«Число шагов» – эта опция имеет значение, определяемое натуральными числами. Данная опция имеет значение только при нелинейном анализе. Значение соответствует числу равномерных интервалов (шагов по нагрузке), на которые разбивается абсолютное значение каждой из допустимых нагрузок.

«Количество итераций» – эта опция имеет значение, определяемое натуральными числами. Данная опция имеет значение только при нелинейном анализе. Значение соответствует максимальному числу итераций для решения нелинейной задачи для каждого шага по нагрузке.

«Значение сходимости по перемещениям» – эта опция имеет значение, определяемое положительными вещественными числами. Данная опция имеет значение только при нелинейном анализе. Значение соответствует верхней границе отношения текущей нормы вектора приращения перемещений на текущей итерации каждого шага по нагрузке к норме вектора перемещений на этой итерации, при которой нелинейный расчет считает сошедшимся. В качестве нормы вектора взята евклидова норма.

«Значение сходимости по силам» – эта опция имеет значение, определяемое положительными вещественными числами. Данная опция имеет значение только при нелинейном анализе. Значение соответствует верхней границе отношения текущей нормы вектора внутренних узловых сил на текущей итерации каждого шага по нагрузке к норме вектора внешних узловых сил на этом шаге, при которой нелинейный расчет считает сошедшимся. В качестве нормы вектора взята евклидова норма, за тем лишь исключением, что норма вектора внешних сил не может быть меньше единицы.

Теперь сделаем некоторые пояснения по поводу сходимости и информации о решении. Нелинейный расчет считается сошедшимся на каждом шаге по нагрузке, если одновременно преодолены две верхние границы сходимости по силам и перемещениям. После этого происходит расчет следующего шага по нагрузке. Если в процессе нелинейного расчета достигнуто предельное (максимальное) число итераций но два критерия сходимости не выполнены одновременно, то (хотя это в общем некорректно) происходит расчет следующего шага по нагрузке.

На рисунке 8.5б представлена текстовая информация о ходе решения в виде таблицы со следующими столбцами: cumIter, time, substep, epsF, epsU. В данных столбцах выводятся следующие значения:

- $\text{cumIter}$  – суммарное количество итераций (решений СЛАУ) сделанное на всех шагах по нагрузке;
- $\text{time}$  – текущее виртуальное время, в текущей реализации время соответствующее приложению полного значения нагрузок равно единице, текущее значение пропорционально номеру шага по нагрузке;
- $\text{substep}$  – номер текущего шага по нагрузке;
- $\text{epsF}$  – отношение текущей нормы вектора внутренних узловых сил на текущей итерации каждого шага по нагрузке к норме вектора внешних узловых сил на этом шаге;
- $\text{epsU}$  – отношение текущей нормы вектора приращения перемещений на текущей итерации каждого шага по нагрузке к норме вектора перемещений на этой итерации.

На рисунке 8.5а представлена графическая информация о ходе решения и зависимостей  $\text{epsF}(\text{cumIter})$  – невязка по силам и  $\text{epsU}(\text{cumIter})$  – невязка по перемещения.

В случае нелинейного анализа имеют значение опции из группы сохранение результатов:

«Частота сохранения результатов» – эта опция имеет выпадающий список значениями «Не сохранять», «Последний шаг», «Каждый шаг», «Каждый N-ый шаг» и «N шагов». Каждое значение соответствует способу сохранения результатов для нелинейного расчета.

- Не сохранять – не сохраняет результаты вообще;
- Последний шаг – сохраняет результаты для последнего шага по нагрузке;
- Каждый шаг – сохраняет результаты для каждого шага по нагрузке;
- Каждый N-ый шаг – сохраняет результаты для каждого шага N-го по нагрузке, результаты для последнего шага сохраняются вне зависимости от значения N;
- N шагов – сохраняет результаты для N равномерно отстоящих друг от друга шагов по нагрузке, результаты для последнего шага сохраняются вне зависимости от значения N;

«Число шагов для записи результатов N=» – эта опция имеет значение, определяемое натуральными числами. Эта опция становится доступной для ввода при

выборе значения значениями «Каждый N-ый шаг» или «N шагов» опции «Частота сохранения результатов». Значение соответствует N для опции «Results save frequency».

### **Выбор результатов анализа**

После проведения расчета можно просмотреть результаты в виде карт результатов и реакций в опорах. Доступ к ним осуществляется стандартными методами при выборе значения «Общий нелинейный расчет» в списке «Тип расчета». Значения список «(Для) Момент(а) времени» соответствуют значениям виртуального времени для сохраненных шагов по нагрузке.

### **Нелинейные свойства материалов**

Для работы с нелинейным анализом добавлены следующие виды нелинейных свойств материала:

- «Идеальный упругопластичный»;
- «Изотропное билинейное упрочнение»;
- «Изотропное мультилинейное упрочнение»;
- «Изотропное нелинейное упрочнение».

#### **Идеальный упругопластичный**

Свойство подразумевает зависимость напряжения от деформации при одноосном растяжении в виде кусочно-линейной функции:

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} E \cdot \varepsilon, & 0 \leq \varepsilon \leq \frac{\sigma_T}{E} \\ \sigma_T, & \varepsilon > \frac{\sigma_T}{E} \end{cases}$$

где  $E$  – модуль упругости;  $\varepsilon$  – деформация;  $\sigma$  – напряжение;  $\sigma_T$  – предел текучести.

#### **Изотропное билинейное упрочнение**

Свойство подразумевает зависимость напряжения от деформации при одноосном растяжении в виде кусочно-линейной функции:

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} E \cdot \varepsilon, & 0 \leq \varepsilon \leq \frac{\sigma_T}{E} \\ E_T \cdot \left( \varepsilon - \frac{\sigma_T}{E} \right) + \sigma_T, & \varepsilon > \frac{\sigma_T}{E} \end{cases}$$

где  $E$  – модуль упругости;  $\varepsilon$  – деформация;  $\sigma$  – напряжение;  $\sigma_T$  – предел текучести;  $E_T$  – модуль упрочнения.

### Изотропное мультилинейное упрочнение

Свойство подразумевает зависимость напряжения от деформации при одноосном растяжении в виде кусочно-линейной функции:

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} E \cdot \varepsilon, & 0 \leq \varepsilon < \varepsilon_1 \\ \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} (\varepsilon - \varepsilon_1) + \sigma_1, & \varepsilon_1 \leq \varepsilon < \varepsilon_2 \\ \dots & \dots \\ \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_i}{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i} (\varepsilon - \varepsilon_i) + \sigma_i, & \varepsilon_i \leq \varepsilon < \varepsilon_{i+1} \\ \dots & \dots \\ \frac{\sigma_N - \sigma_{N-1}}{\varepsilon_N - \varepsilon_{N-1}} (\varepsilon - \varepsilon_{N-1}) + \sigma_{N-1}, & \varepsilon_{N-1} \leq \varepsilon < \varepsilon_N \\ \sigma_N, & \varepsilon \geq \varepsilon_N \end{cases}$$

где  $\varepsilon_i$  и  $\sigma_i$  – таблица дискретных значений деформаций и напряжений сортированная по возрастанию вдоль значений  $\varepsilon$ , определяющая концы линейных участков функции;  $E$  – модуль упругости ( $\sigma_1/\varepsilon_1$ );  $\varepsilon$  – деформация;  $\sigma$  – напряжение;  $N$  – число пар дискретных значений в таблице.

### Изотропное нелинейное упрочнение

Свойство подразумевает зависимость напряжения от деформации при одноосном растяжении в виде кусочно-линейной функции:

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} E \cdot \varepsilon, & 0 \leq \varepsilon \leq \frac{\sigma_T}{E} \\ \sigma_T + R_0 \cdot \left( \varepsilon - \frac{\sigma_T}{E} \right) + R_{inf} \cdot \left( 1 - \varepsilon^{-B \cdot \left( \varepsilon - \frac{\sigma_T}{E} \right)} \right), & \varepsilon > \frac{\sigma_T}{E} \end{cases}$$

где  $E$  – модуль упругости;  $\varepsilon$  – деформация;  $\sigma$  – напряжение;  $\sigma_T$  – предел текучести;  $R_0, R_{inf}, B$  – параметры модели.

Каждое из перечисленных нелинейных свойств материала может быть добавлено стандартными методами через диалоговое окно «Выбор свойств материала» (рисунок 8.10), путем добавления соответствующего свойства в список «Текущие», при этом остальные нелинейные свойства, рассматриваемые в данном разделе, будут удалены из списка «Доступные» равно как и свойства: «Физ. нелин. (т. течения изо.)», «Физ. нелин. (т. течения Д.-П.)» и «SMA». При удалении из списка «Текущие» любого из вышеупомянутых свойств все они будут доступны для выбора в списке «Доступные».

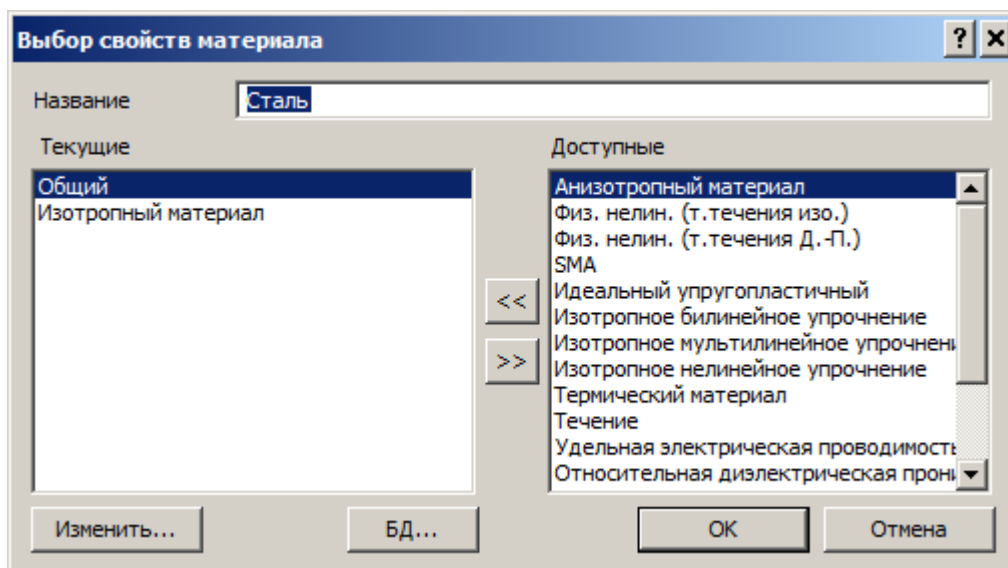


Рисунок 8.10 – Выбор свойств материала

После добавления (так же, как и при редактировании) свойства «Идеальный упругопластичный» откроется диалоговое окно «Идеальный упругопластичный» (рисунок 8.11). Отметим, что кнопка «График...» предназначена лишь для отображения в графическом виде текущих, введенных пользователем, данных (поля ввода «Модуль Юнга» и «Предел текучести»). В то время как лишь по нажатию кнопки «ОК» информация, введенная пользователем, будет сохранена программой в качестве исходных данных для расчетов, при любом другом варианте закрытия диалогового окна информация, введенная пользователем, проигнорируется, исходные данные для расчета останутся теми же, что и были до открытия диалога.

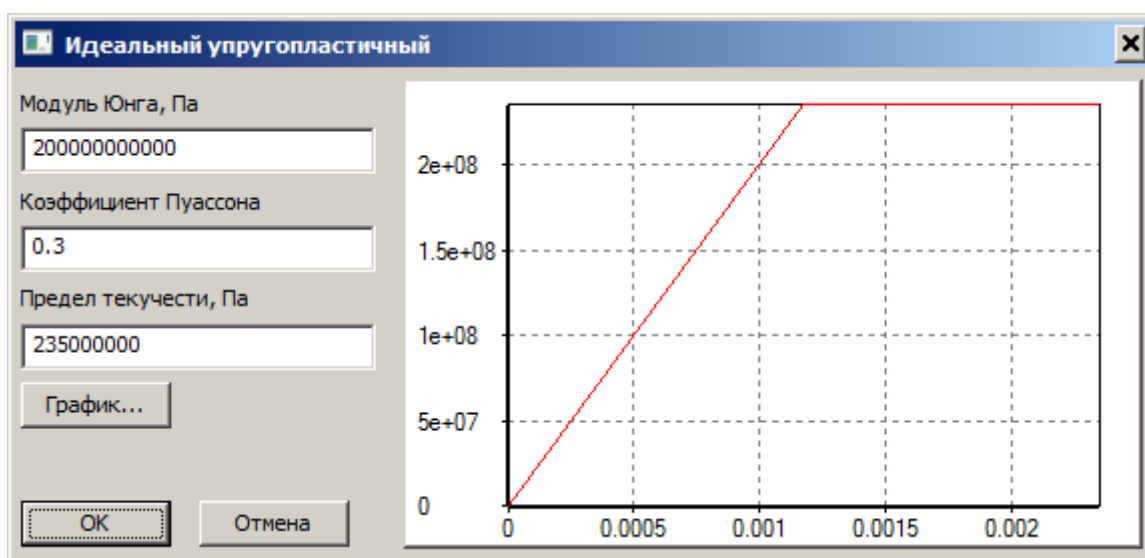


Рисунок 8.11 – Задание свойств идеального упругопластичного материала

После добавления свойства «Идеальный упругопластичный», поля ввода будут доступны для редактирования на панели «Свойства» после выбора узла дерева «Идеальный упругопластичный» на панели «Объекты» (рисунок 8.12).

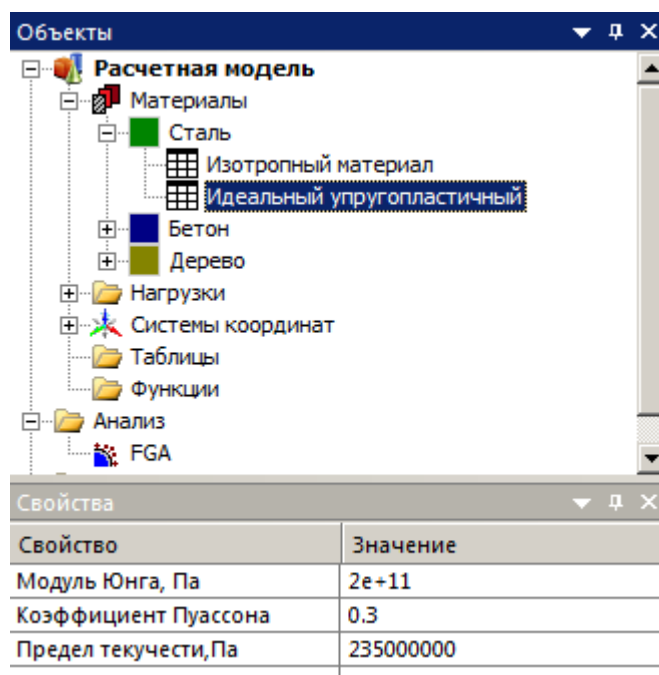


Рисунок 8.12 – Задание свойств идеального упругопластичного материала

После добавления (так же, как и при редактировании) свойства «Изотропное билинейное упрочнение» откроется диалоговое окно «Изотропное билинейное упрочнение» (рисунок 8.13). Отметим, что кнопка «График...» предназначена лишь для отображения в графическом виде текущих, введенных пользователем, данных (поля ввода «Модуль Юнга», «Предел текучести» и «Модуль упрочнения»). В то время как лишь по нажатию кнопки «ОК» информация, введенная пользователем, будет сохранена программой в качестве исходных данных для расчетов, при любом другом варианте закрытия диалогового окна информация, введенная пользователем, проигнорируется, исходные данные для расчета останутся теми же, что и были до открытия диалога.

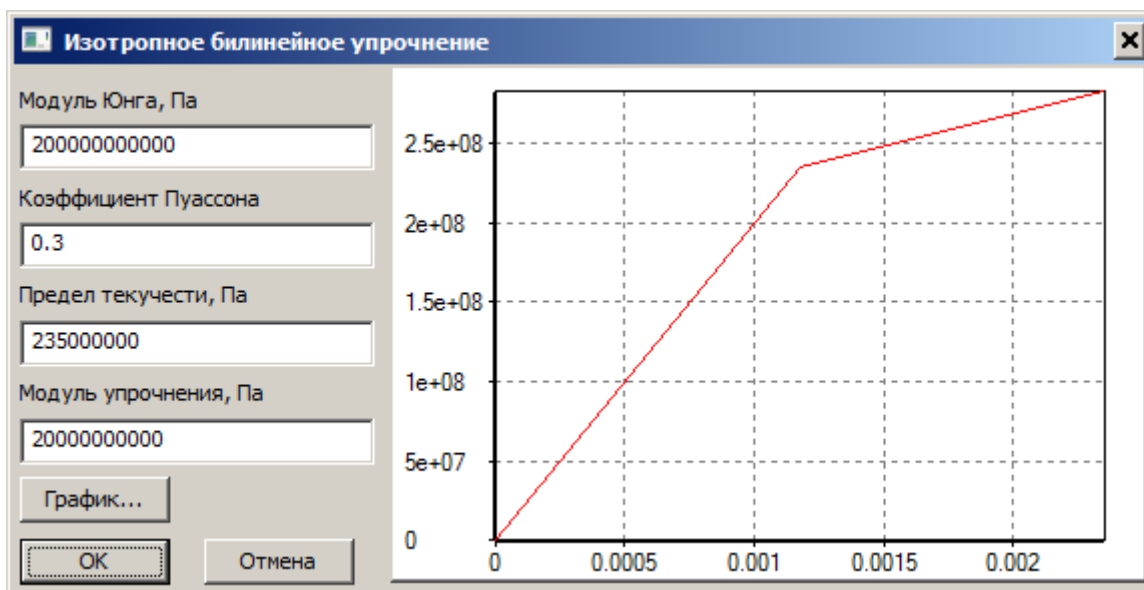


Рисунок 8.13 – Задание свойств материала с изотропным билинейным упрочнением

После добавления свойства «Изотропное билинейное упрочнение», поля ввода будут доступны для редактирования на панели «Свойства» после выбора узла дерева ««Изотропное билинейное упрочнение»» на панели «Объекты» (рисунок 8.14)

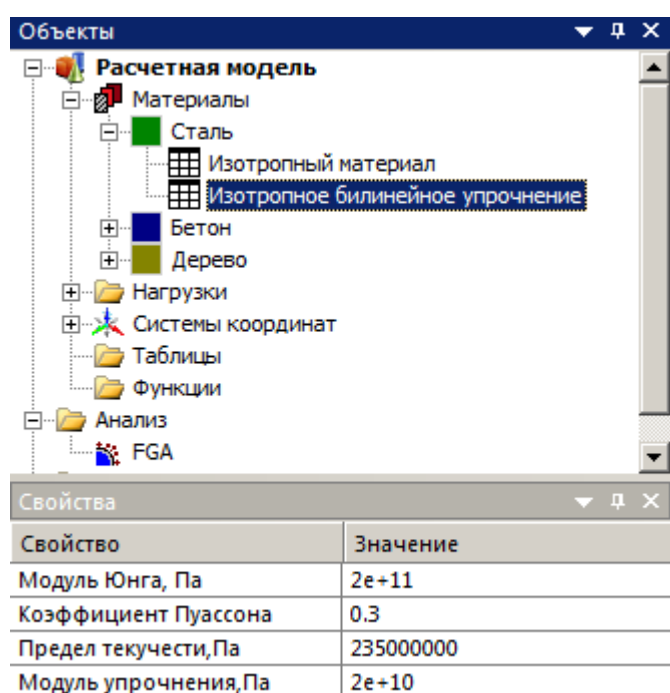


Рисунок 8.14 – Редактирование свойств материала с изотропным билинейным упрочнением

После добавления (так же, как и при редактировании) свойства «Изотропное мультилинейное упрочнение» откроется диалоговое окно «Изотропное мультилинейное упрочнение» (рисунок 8.15). Отметим, что кнопка «График...» предназначена лишь для отображения в графическом виде текущих, введенных пользователем, данных (поля ввода в столбцах «Деформация» и «Напряжения»). В то время как лишь по нажатию



кнопки «ОК» информация, введенная пользователем, будет сохранена программой в качестве исходных данных для расчетов, при любом другом варианте закрытия диалогового окна информация, введенная пользователем, проигнорируется, исходные данные для расчета останутся теми же, что и были до открытия диалога. Кроме того, заметим, что данные, введенные в таблице «Деформация-Напряжение», после нажатия кнопок «ОК» или «График...» автоматически сортируются по столбцу «Деформация» по возрастанию.

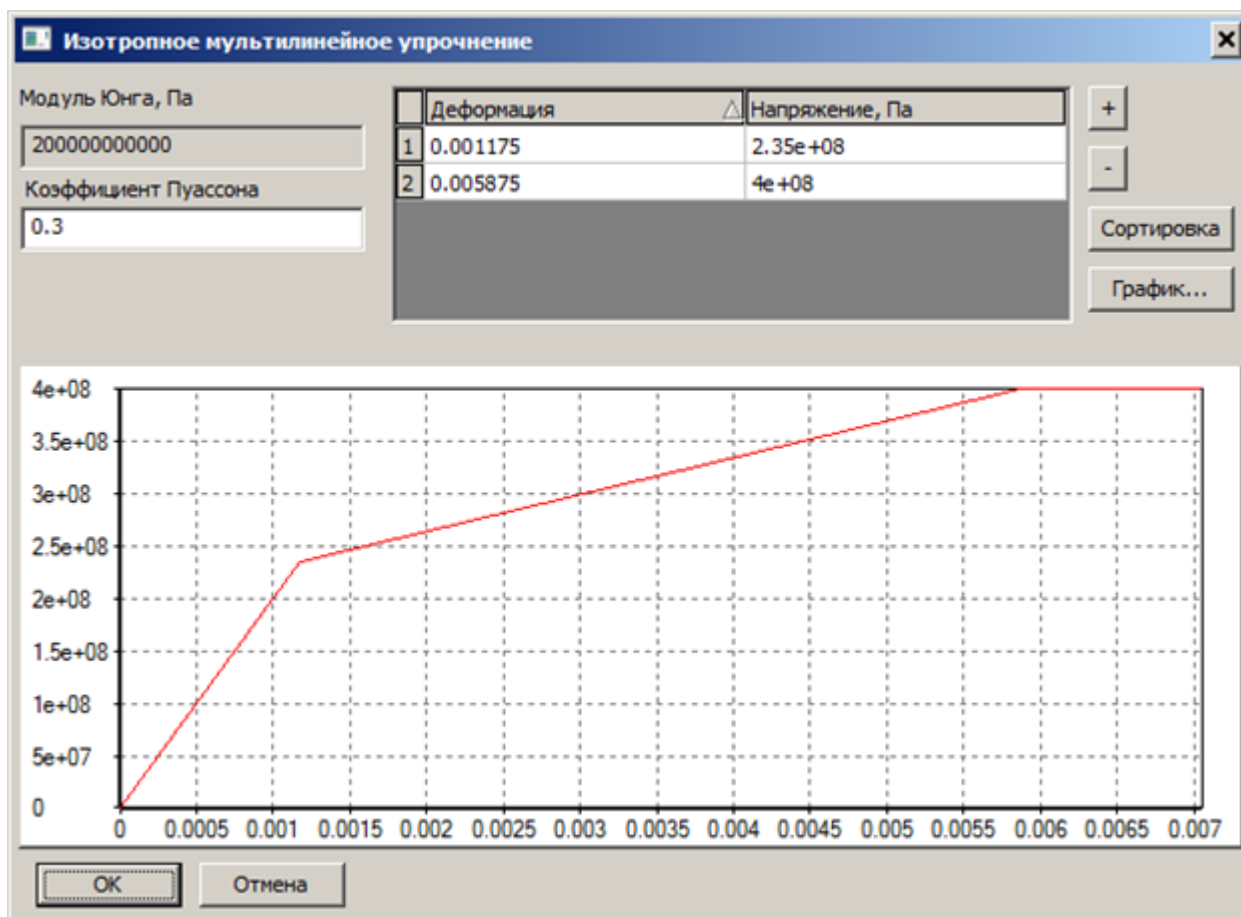


Рисунок 8.15 – Задание свойств материала с изотропным мультILINEЙным упрочнением

После добавления свойства «Изотропное мультILINEЙное упрочнение», поля ввода будут доступны для редактирования на панели «Свойства» после выбора узла дерева ««Изотропное мультILINEЙное упрочнение»» на панели «Объекты» (рисунок 8.16). Отметим, что данные, вводимые в табличной форме в диалоговом окне «Изотропное мультILINEЙное упрочнение», не доступны для редактирования и просмотра на панели «Объекты» об их наличии пользователю косвенно указывает поле «Другие свойства».

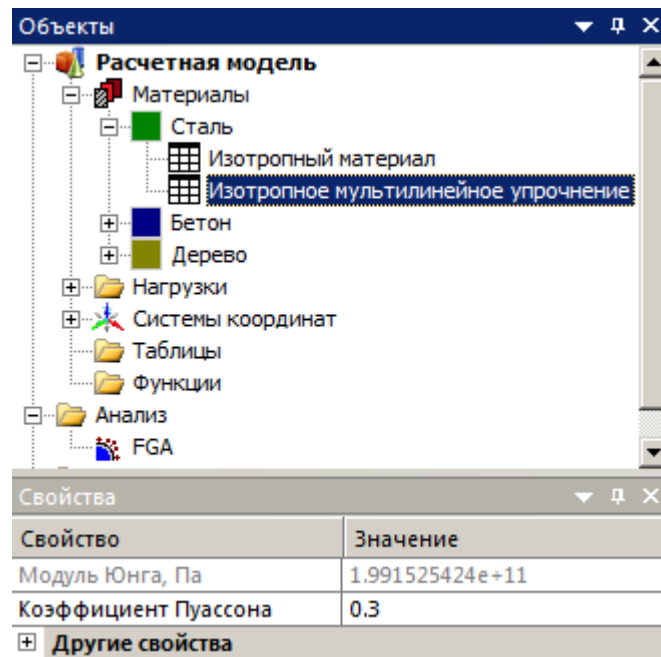


Рисунок 8.16 – Редактирование свойств материала с изотропным мультилинейным упрочнением

После добавления (так же, как и при редактировании) свойства «Изотропное нелинейное упрочнение» откроется диалоговое окно «Изотропное нелинейное упрочнение» (рисунок 8.17). Отметим, что кнопка «График...» предназначена лишь для отображения в графическом виде текущих, введенных пользователем, данных (поля ввода «Модуль Юнга», «Предел текучести» и «Модуль упрочнения»). В то время как лишь по нажатию кнопки «ОК» информация, введенная пользователем, будет сохранена программой в качестве исходных данных для расчетов, при любом другом варианте закрытия диалогового окна информация, введенная пользователем, проигнорируется, исходные данные для расчета останутся теми же, что и были до открытия диалога.

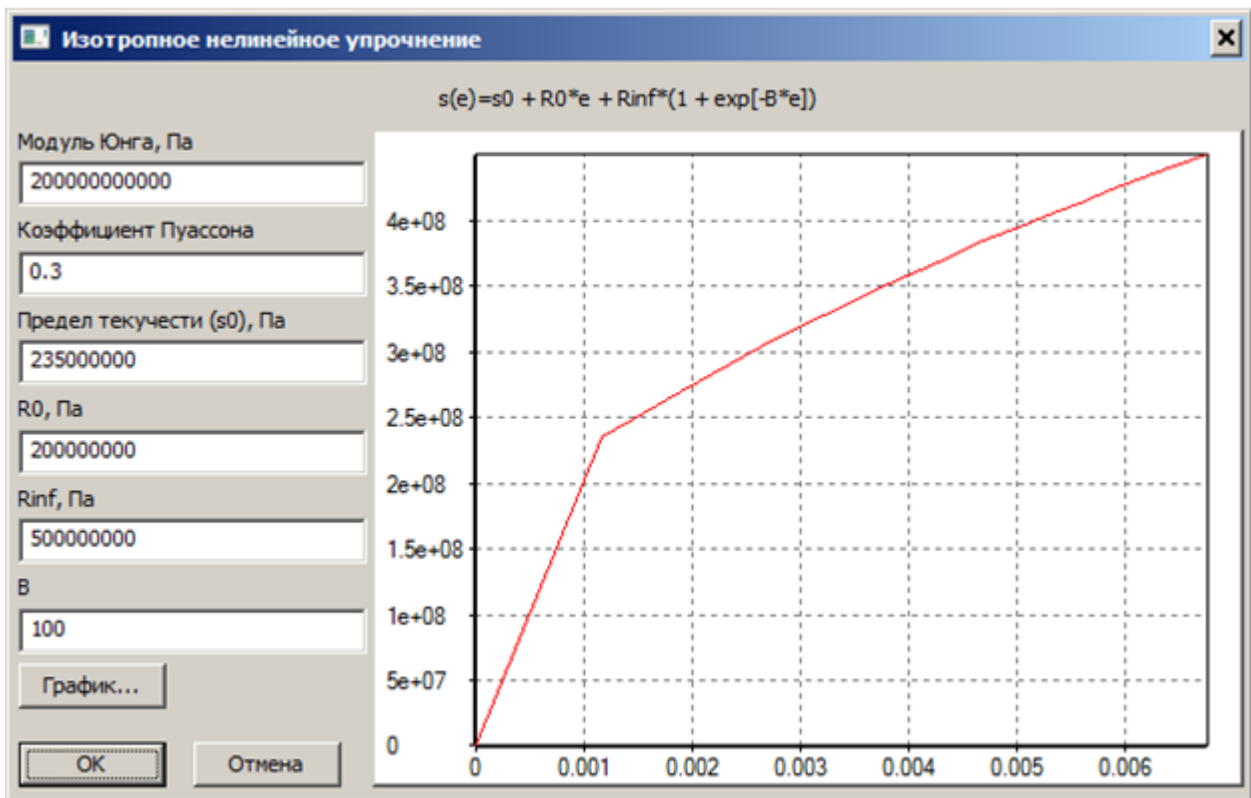


Рисунок 8.17 – Задание свойств материала с изотропным нелинейным упрочнением

После добавления свойства «Изотропное нелинейное упрочнение», поля ввода будут доступны для редактирования на панели «Свойства» после выбора узла дерева ««Изотропное нелинейное упрочнение»» на панели «Объекты» (рисунок 8.18).

Свойство	Значение
Зависимость	$s(\epsilon) = s_0 + R_0 \cdot \epsilon + R_{inf} \cdot (1 - \dots$
Модуль Юнга, Па	$2e+11$
Коэффициент Пуассона	0.3
Предел текучести ( $s_0$ ), Па	235000000
$R_0$ , Па	200000000
$R_{inf}$ , Па	500000000
$B$	100

Рисунок 8.18 – Задание свойств материала с изотропным нелинейным упрочнением

## Предупреждения о прерывании расчета

Сообщение		Возможное решение
Английский язык	Русский язык	
Solution does not obtained by following reason. Model has invalid element type.	Решение не получено. Модель содержит недопустимый тип элемента.	Обратиться к разработчику
Solution does not obtained by following reason. Model hasn't solution DOFs.	Решение не получено. Модель не имеет решение для данного количества степеней свободы.	Обратиться к разработчику
Solution does not obtained by following reason. Error in nodal force array.	Решение не получено. Ошибка в массиве узловых сил.	Обратиться к разработчику
Solution does not obtained by following reason. Error in fix nodes array.	Решение не получено. Ошибка в исправлении массива узлов.	Обратиться к разработчику
Solution does not obtained by following reason. Error in fix displacements array	Решение не получено. Ошибка в исправлении массива перемещений (смещений).	Обратиться к разработчику
Solution does not obtained by following reason. Error in initialize CStdSparseMatrix procedure.	Решение не получено. Ошибка при инициализации процедуры CStdSparseMatrix.	Обратиться к разработчику
Solution does not obtained by following reason. Error in calculation external forces procedure.	Решение не получено. Ошибка в процедуре расчета внешних сил.	Обратиться к разработчику
Solution does not obtained by following reason. Error in vectors rotation from global to local CS procedure.	Решение не получено. Ошибка при повороте векторов из глобальной процедуры CS в локальную.	Обратиться к разработчику
Solution does not obtained by following reason. Error in matrix and vector rotation from global to local CS procedure.	Решение не получено. Ошибка при повороте матрицы и вектора из глобальной в локальную систему координат.	Обратиться к разработчику

Сообщение		Возможное решение
Английский язык	Русский язык	
Solution does not obtained by following reason. Error in prepare CStdSparseMatrix (NR) procedure.	Решение не получено. Ошибка в процедуре подготовки CStdSparseMatrix (NR).	Обратиться к разработчику
Solution does not obtained by following reason. Error in assembly Matrix or Matrix and vector procedure.	Решение не получено. Ошибка в сборке Матрицы или при процедуре сборки матрицы и вектора.	Обратиться к разработчику
Solution does not obtained by following reason. Error in fill and save results procedure.	Решение не получено. Ошибка при заполнении и сохранении результатов.	Обратиться к разработчику
Solution does not obtained by following reason. Unknown error.	Решение не получено. Неизвестная ошибка.	Обратиться к разработчику
Solution was terminated by the following reason. Element Solid xxx is high distorted. Jacobian couldn't be calculated.	Решение не получено. Элемент Solid xxx сильно искажен. Якобиан нельзя вычислить.	Попробуйте улучшить сетку в окрестности элемента Solid xxx или изменить число шагов нагружения
Solution does not obtained by following reason. Error in calculation external forces procedure.	Решение не получено. Ошибка при расчете внешних сил.	Обратиться к разработчику
Solution does not obtained by following reason. Error in vectors rotation from global to local CS procedure.	Решение не получено. Ошибка при повороте векторов из глобальной в локальную систему координат.	Обратиться к разработчику
Solution was terminated by the following reason. J2 norm is infinite in RMA. Element Solid xxx.	Решение не получено. Норма J2 бесконечна в RMA. Элемент Solid XXX. Решение не получено.	Попробуйте улучшить сетку в окрестности элемента Solid xxx или изменить число шагов нагружения

## Глава 9. Конструктивные элементы

### Общая информация о конструктивных элементах

Конструктивный элемент моделирует физически однородный элемент конструкции – колонну, ригель, плиту. Конструктивный элемент – это один конечный элемент или совокупность нескольких конечных элементов, представляющие собой расположенный между двумя соединениями УЧАСТОК модели (колонны, ригеля), который при расчете согласно СНиП II-23-81\* (СП 16.13330.2011), СТО 36554501-002-2006 (СП 64.13330.2011), СП 52-101-2003 или СНиП II-22-81\* (СП 15.13330.2012) рассматривается как единое целое.

Команда Проектирование | Конструктивные элементы вызывает окно диалога для редактирования свойств, удаления конструктивных элементов, а также просмотра результатов расчёта и подбора сечений.

В качестве конструктивного элемента рассматривается непрерывная цепочка стержневых или пластинчатых элементов, обладающая определенными свойствами. Если конструктивный элемент не может быть создан, то система выдает предупреждение. В окне предупреждения представлен список всех ограничений для создания конструктивного элемента. При этом флажками отмечены причины, по которым данный конструктивный элемент не может быть создан.

В случае изменения объектов модели, входящих в конструктивные элементы, система выдаст предупреждения и предложит один из вариантов продолжения операции.

### Стальные конструктивные элементы

#### Общие сведения

Стальные конструктивные элементы служат для выполнения расчётов стальных конструкций зданий и сооружений, воспринимающих различные внешние и внутренние воздействия в процессе эксплуатации или на стадии возведения. Основными элементами, расчёт которых может быть выполнен как конструктивных элементов, являются стержни, которые, как правило, представлены колоннами, ригелями, фермами различной геометрической формы и другими конструкциями.

Исходными данными для выполнения расчёта стальных конструктивных элементов являются вычисленные по результатам статического расчёта нормативные и расчётные значения внутренних силовых факторов от различного типа внешних нагрузок.

## **Назначение стальных элементов**

### ***Общие параметры расчёта***

Начальным этапом задания стальных элементов является процесс назначения основных параметров расчёта, к которым для рассматриваемого типа конструктивных элементов относятся нормативные документы, в соответствии с которыми выполняется расчёт.

Соответствующие настройки задаются на панели параметров расчёта, которая открывается нажатием вкладки «Расчёты» → «Панель параметров расчёта». В появившейся панели необходимо выбрать пункт «Стальные» и в свойствах пункта настроить необходимые параметры: нагрузки, нормы расчёта.

### ***Панель «Конструктивные элементы»***

Для выполнения расчёта стальных конструкций необходимо присвоить соответствующим конечным элементам определённые заданные пользователем свойства стальных конструктивных элементов.

Задание стальных конструктивных элементов выполняется на панели «Конструктивные элементы», которая открывается нажатием правой кнопки мыши на любой панели инструментов в верхней части окна программы и активацией соответствующей панели.

В выпадающем списке панели необходимо выбрать тип конструктивных элементов «Стальные элементы», который позволит рассчитать стальные конструкции.

Предусмотрены два способа присвоения конечным элементам свойств конструктивных:

- а) внесение выделенных конечных элементов в новый конструктивный элемент;
- б) внесение выделенных конечных элементов в отдельные конструктивные элементы.

В первом случае выделенные конечные элементы образуют единый непрерывный конструктивный элемент, обладающий едиными свойствами. Новый конструктивный элемент, в состав которого входят несколько конечных элементов, рассчитывается по максимальным из значений внутренних силовых факторов, возникающих во входящих в него конечных элементах. Расчёт поперечных сечений такого конструктивного элемента выполняется по наиболее неблагоприятным условиям, то есть принимается таким, чтобы обеспечить выполнение требуемых критериев для всех элементов, входящих в единый конструктивный элемент.

Во втором случае каждый из выделенных конечных элементов вносится в отдельный конструктивный элемент, обладающий уникальными (назначенными

пользователем) свойствами. Отдельные конструктивные элементы, в состав которых может входить только один конечный элемент, рассчитываются по максимальным внутренним силовым факторам, возникающим в сечении конечного элемента. Расчёт по подбору (проверке) поперечных сечений таких элементов выполняется уникальным для каждого отдельного конструктивного элемента на основании, возникающих в конечном элементе, входящем в отдельный конструктивный элемент, усилий.

Присвоение конечным элементам свойств конструктивных элементов осуществляется в следующей последовательности:

1. выделение конечных элементов, которым требуется назначить свойства конструктивных;
2. присвоение выделенным конечным элементам свойств нового конструктивного элемента или отдельных конструктивных элементов нажатием соответствующих кнопок на панели «Конструктивные элементы».

В случае невозможности создания конструктивного стального элемента система предупреждает пользователя, что соответствующее действие невыполнимо. Удаление конструктивного элемента выполняется нажатием соответствующей кнопки на панели инструментов «Конструктивные элементы».

## **Параметры расчёта стальных элементов**

### ***Основные расчётные параметры***

После присвоения конечным элементам свойств стальных конструктивных элементов пользователю необходимо назначить основные параметры выполнения соответствующих расчётов.

Основные параметры, используемые при выполнении расчёта стальных конструкций на заданные усилия, изложены в нормативных документах и представлены в диалоге «Стальные конструктивные элементы».

### ***Расчётная длина элементов***

Выбор способа учёта расчётной длины элементов при выполнении расчётов конструктивных элементов осуществляется пользователем переключением соответствующей настройки в диалоге «Стальные конструктивные элементы». Назначение расчётной длины выполняется указанием коэффициента расчётной длины или непосредственно значением расчётной длины.

При выборе параметра «Коэффициент расчётной длины», указанные пользователем значения в соответствующих полях учитываются в качестве множителей к фактической длине конструктивного элемента при выполнении расчётов.



В случае выбора параметра «Расчётная длина», указанные пользователем значения в соответствующих полях, принимаются в качестве значений расчётных длин конструктивных элементов, используемых при выполнении расчётов.

#### *Коэффициент условий работы*

Коэффициент условий работы элементов стальных конструкций учитывается в качестве дополнительного множителя к расчётному сопротивлению материала. Данный параметр может быть назначен пользователем в соответствующем поле диалога «Стальные конструктивные элементы», а также принят по таблицам [1] при нажатии кнопки, расположенной справа от поля ввода значения коэффициента условий работы. При нажатии вышеуказанной кнопки, открывается диалог «Коэффициент условий работы», в котором пользователю необходимо выбрать требуемые значения, соответствующие [1].

#### *Предельная гибкость*

В поле «Предельная гибкость» задаются предельные значения гибкости рассчитываемых сжатых и растянутых элементов. Указанные параметры могут быть назначены пользователем в соответствующем поле ввода, а также выбраны по таблицам [1] при нажатии кнопок, расположенных справа от поля ввода значения предельной гибкости. При нажатии вышеуказанных кнопок, открывается диалог «Предельные гибкости», в котором пользователю необходимо выбрать требуемые значения, в соответствии с [1], для сжатых и растянутых стальных элементов.

При активации флажка «Учитывать гибкость при подборе сечения», указанные пользователем значения предельных гибкостей при сжатии и растяжении учитываются при подборе поперечного сечения, удовлетворяющего критериям [1].

#### *Классическая проверка поперечных сечений*

Активация флажка «Проверка прочности и устойчивости классическими методами» позволяет выполнить расчёт на прочность и устойчивость в соответствии с известными подходами сопротивления материалов. Проверка прочности и устойчивости при активном флажке «Проверка прочности и устойчивости классическими методами» в соответствии с [1] не выполняется.

#### *Расчёт по подбору сечений конструктивных элементов*

При выполнении расчёта стальных конструктивных элементов, при неактивном состоянии флажка «Подбирать сечение», программа выполняет проверочный расчёт назначенных пользователем поперечных сечений.

Для корректной проверки удовлетворения поперечного определённым критериям [1], при расчёте конструктивных элементов необходимо указать тип поперечного сечения. В случае, если сечение назначено пользователем из библиотеки сечений (базы данных программы), то тип сечения в соответствующем поле диалогового окна «Стальные конструктивные элементы» назначается автоматически.

Выполнение проектировочного расчёта – подбор поперечных сечений, на основании рассчитанных силовых факторов, требует активации флажка «Подбирать сечение». При этом необходимо указать путь к библиотеке, из которой необходимо осуществить подбор поперечного сечения элемента.

#### *Нагрузки на конструктивные элементы*

При выполнении расчётов стальных конструктивных элементов в поле «Нагрузки» необходимо указать нагрузки, в соответствии с которыми требуется выполнить расчёт. Установкой флажка пользователь указывает необходимость выполнения расчёта конструктивных элементов на основании результатов РСУ (расчётные сочетания усилий) или на основании выбранного в выпадающем списке нагружения.

#### **Параметры диалога стальных элементов**

Представлено общее описание дополнительных интерфейсных функций диалога «Стальные конструктивные элементы», использование которых может упростить процесс работы при выполнении соответствующих расчётов и анализе полученных результатов.

#### *Фильтры списка конструктивных элементов*

Фильтры списка стальных конструктивных элементов расположены в окне «Стальные конструктивные элементы» непосредственно под списком конструктивных элементов. Фильтры применяются для изменения параметров отображения списка стальных элементов при задании свойств и в процессе их редактирования. Описание функций, которые выполняют фильтры, доступны непосредственно в диалоге стальных конструктивных элементов при наведении на них курсора.

#### *Общие примечания*

В случае необходимости внесения изменений в ранее назначенные параметры, необходимо выделить требуемый конструктивный элемент (несколько элементов), открыть диалог «Стальные конструктивные элементы». После открытия в списке конструктивных элементов, выделенными будут элементы, выбранные в модели перед открытием диалога. Для выделенных конструктивных элементов необходимо назначить

требуемые параметры и после завершения внесения изменений нажать кнопку «Применить». В случае, если внесённые изменения необходимо применить для всех конструктивных элементов, то после завершения редактирования свойств необходимо нажать кнопку «Применить для всех».

В случае, если требуется выполнить расчёт определённых выделенных конструктивных элементов, их необходимо выбрать в списке и после назначения параметров нажать кнопку «Расчёт». Для выполнения расчёта всех конструктивных элементов необходимо нажать кнопку «Расчёт для всех».

Для назначения элементам рассчитываемой конструкции подобранных по результатам расчёта поперечных сечений служит кнопка «Заменить сечение» в диалоговом окне «Стальные конструктивные элементы». Возврат к исходным поперечным сечениям необходимо выделить соответствующие конструктивные элементы и нажать кнопку «Вернуть сечение».

### **Результаты расчёта стальных элементов**

Результаты расчёта стальных конструктивных элементов могут быть представлены как в графическом, так и в табличном виде. Графический способ представления, как правило, используется для оценки работоспособности конструкции в целом или её отдельных элементов, тогда как табличная форма представления позволяет более детально оценить результаты расчёта отдельных конструктивных элементов с последующим получением информации о коэффициентах использования поперечных сечений при выполнении расчётов.

Под коэффициентом использования понимается отношение рассчитанного фактора к его предельному значению, определяемому согласно [1].

### ***Графическое представление результатов***

Графическое представление результатов доступно после выполнения соответствующих вычислений в диалоге «Стальные конструктивные элементы».

Отображение результатов расчёта конструктивных элементов выполняется в меню «Результаты» → «Карта результатов». В появившемся окне в выпадающем списке «Тип расчёта» указываются требуемые результаты, которые должны быть представлены в графическом виде, на основании выполненного расчёта. Далее в выпадающем списке «Тип результатов» указываются критерии, которые необходимо отобразить в виде карты для выбранного типа расчёта.

На карте результатов для стержневых элементов отображаются максимальные значения коэффициента использования сечения конструктивного элемента, а также при

необходимости пользователь имеет возможность в выпадающем списке указать необходимые для отображения значения коэффициентов использования, вычисленные для каждого из возможных критериев отдельно.

#### ***Табличное представление результатов***

Табличное представление результатов расчёта стальных конструктивных элементов, как правило, используется для более детального анализа работы рассчитываемых поперечных сечений. Функционал доступен в диалоге «Стальные конструктивные элементы» после выполнения соответствующих расчётов, и представлен в нижней части вышеназванного диалога в поле «Результаты».

После выполнения расчёта, в таблице в нижней части диалогового окна «Стальные конструктивные элементы» для выделенного конструктивного элемента в списке будут приведены значения коэффициентов использования поперечных сечений для всех критериев в соответствии с [1].

### **Железобетонные конструктивные элементы**

#### **Общие сведения**

Армированные конструктивные элементы служат для выполнения расчётов бетонных и железобетонных конструкций зданий и сооружений, воспринимающих различные внешние и внутренние воздействия в процессе эксплуатации или на стадии возведения. Основными элементами, расчёт которых может быть выполнен как армированных конструктивных элементов, являются стержни и оболочки, которые, как правило, представлены фундаментами, колоннами, ригелями, фермами, плитами перекрытия, стенами, покрытиями различной геометрической формы и другими конструкциями.

Исходными данными для выполнения расчёта армированных конструктивных элементов являются вычисленные по результатам статического расчёта нормативные и расчётные значения внутренних силовых факторов от различного типа внешних нагрузок.

#### **Назначение армированных элементов**

##### ***Общие параметры расчёта***

Начальным этапом задания армированных элементов является процесс назначения основных параметров расчёта армирования. Соответствующие настройки задаются на панели параметров расчёта, которая открывается нажатием вкладки «Расчёты» → «Панель параметров расчёта». В появившейся панели необходимо выбрать

пункт «Армированные элементы» и в свойствах пункта настроить необходимые параметры: расчёт сечений, армирование в расчёте, нормы расчёта.

### ***Панель «Конструктивные элементы»***

Для выполнения расчёта железобетонных конструкций по прочности и трещиностойкости необходимо присвоить соответствующим конечным элементам определённые заданные пользователем свойства армированных конструктивных элементов.

Задание армированных конструктивных элементов выполняется на панели «Конструктивные элементы», которая открывается нажатием правой кнопки мыши на любой панели инструментов в верхней части окна программы и активацией соответствующей панели.

В выпадающем списке панели необходимо выбрать тип конструктивных элементов «Армированные элементы», который позволит рассчитать железобетонные конструкции.

Предусмотрены два способа присвоения конечным элементам свойств конструктивных:

- а) внесение выделенных конечных элементов в новый конструктивный элемент;
- б) внесение выделенных конечных элементов в отдельные конструктивные элементы.

В первом случае выделенные конечные элементы образуют единый непрерывный конструктивный элемент, обладающий едиными свойствами. Новый конструктивный элемент, в состав которого входят несколько конечных элементов, рассчитывается по максимальным из значений внутренних силовых факторов, возникающих во входящих в него конечных элементах. Армирование такого конструктивного элемента выполняется по наиболее неблагоприятным условиям, то есть принимается таким, чтобы обеспечить выполнение требуемых критериев для всех элементов, входящих в единый конструктивный элемент.

Во втором случае каждый из выделенных конечных элементов вносится в отдельный конструктивный элемент, обладающий уникальными (назначенными пользователем) свойствами. Отдельные конструктивные элементы, в состав которых может входить только один конечный элемент, рассчитываются по максимальным внутренним силовым факторам, возникающим в сечении конечного элемента. Армирование таких элементов выполняется уникальным для каждого отдельного конструктивного элемента на основании, возникающих в конечном элементе, входящем в отдельный конструктивный элемент, усилий.

Присвоение конечным элементам свойств конструктивных армированных элементов осуществляется в следующей последовательности:

1. выделение конечных элементов, которым требуется назначить свойства конструктивных;
2. присвоение выделенным конечным элементам свойств нового конструктивного элемента или отдельных конструктивных элементов нажатием соответствующих кнопок на панели «Конструктивные элементы».

В случае невозможности создания конструктивного армированного элемента система предупреждает пользователя, что соответствующее действие невыполнимо. В появившемся при этом окне предупреждения представляется список всех параметров (для пластин), ограничивающих задание конструктивных армированных элементов, где флажками отмечены причины, по которым отмеченным конечным элементам не могут быть присвоены свойства армированных конструктивных элементов и окон с соответствующим предупреждением – для стержней. Удаление конструктивного элемента выполняется нажатием соответствующей кнопки на панели инструментов «Конструктивные элементы».

#### ***Типы расчёта армированных конструктивных элементов***

После присвоения конечным элементам свойств армированных конструктивных элементов становится активным диалог работы с армированными конструктивными элементами, который открывается нажатием соответствующей кнопки на панели инструментов. Перед выполнением необходимых настроек пользователю следует выбрать тип расчёта армированных элементов: проектировочный или проверочный.

Проектировочный расчёт позволяет осуществить подбор армирования сечений стержневых элементов и пластин, удовлетворяющего критериям прочности и трещиностойкости.

Проверочный расчёт позволяет выполнить проверку заданного пользователем армирования стержневых элементов и пластин по прочности и трещиностойкости.

Настройка параметров расчёта армированных элементов в зависимости от выбранного типа расчёта (проектировочный или проверочный) отличаются только необходимостью ввода информации о заданном армировании для случая выполнения проверочного расчёта. Прочие настройки идентичны.

## **Параметры расчёта армированных элементов**

### ***Группы армированных элементов***

Назначению основных расчётных параметров, используемых при проведении проектировочных и проверочных расчётов армированных элементов, предшествует, как правило, процесс задания групп армированных элементов. Группы армированных элементов назначаются пользователем в диалоге «Армированные конструктивные элементы» с целью упрощения процесса задания и редактирования свойств отдельных конструктивных элементов.

Объединение отдельных конструктивных элементов в группы осуществляется в следующей последовательности:

1. В диалоге «Армированные конструктивные элементы» в списке в левой части окна, выделяются отдельные конструктивные элементы.
2. После выделения отдельных элементов, нажатием правой кнопки мыши создаётся группа армированных конструктивных элементов.
3. В начале списка появляется соответствующая группа, которой следует присвоить название.

Назначение расчётных параметров для группы армированных элементов автоматически распространяется на отдельные конструктивные элементы, входящие в соответствующую группу. Несколько групп армированных конструктивных элементов могут быть объединены в общую группу. Ограничений на количество объединений групп конструктивных элементов в группы групп нет, таким образом, сложность иерархии созданных армированных конструктивных элементов определяется пользователем в зависимости от решаемой задачи.

Создание групп армированных элементов рекомендуется выполнять с учётом назначения отдельных конструкций, их расположения в пространстве, схемы армирования при выполнении проверочных расчётов, то есть смысловое содержание группы определяется исключительно пользователем для упрощения процесса назначения и последующего редактирования свойств армированных элементов при проектировании.

### ***Основные расчётные параметры***

После присвоения конечным элементам свойств армированных конструктивных элементов, выбора типа расчёта и назначения групп армированных элементов пользователю необходимо назначить основные параметры выполнения соответствующих расчётов.

Основные параметры, используемые при выполнении проектировочного и проверочного расчёта железобетонных конструкций на заданные усилия, изложены в нормативных документах и представлены в диалоге «Армированные конструктивные элементы» в соответствующих вкладках.

#### *Вкладка «Общие»*

Во вкладке «Общие» пользователю необходимо задать коэффициент расчётной длины элемента в двух плоскостях, указать является ли рассчитываемая конструкция статически определимой, а также требуется ли выполнение расчёта на трещиностойкость. В зависимости от типа рассчитываемого элемента (стержень или пластина) требуется отметить необходимость назначения пользовательского варианта армирования или расчёта на продавливание.

#### Коэффициент расчётной длины

Коэффициент расчётной длины при выполнении расчётов армированных элементов назначается пользователем в соответствии с требованиями п.8.1.17 [2].

Выбор способа назначения коэффициентов расчётной длины осуществляется с помощью переключателей «Пользовательское значение» и «Рекомендованное значение». Последнее является активным «по умолчанию». Задание необходимого значения коэффициента расчётной длины осуществляется нажатием кнопки «Выбор» при установленном на «Пользовательское значение» переключателе.

«Рекомендованное значение» определяется программой автоматически на основании способов закрепления узлов рассматриваемого конструктивного элемента. Рекомендованное значение следует рассматривать как приближённое значение коэффициента расчётной длины, которое должно корректироваться пользователем при задании параметров расчёта.

#### Статическая определимость

При выполнении расчёта статически определимых систем следует активировать соответствующую настройку во вкладке «Общие». Расчёт выполняется с учётом требований п.8.1.7 [2].

#### Расчёт на трещиностойкость

Расчёт армированных элементов на трещиностойкость выполняется в соответствии с требованиями п.8.2 [2]. Соответствующая настройка является активной при задании армированных элементов.



### Пользовательский вариант армирования

Активация данной настройки при выполнении проектировочного расчёта стержневых элементов позволяет при известных (заданных пользователем) схемах армирования осуществить подбор требуемых диаметров арматурных стержней, удовлетворяющих критериям прочности и трещиностойкости. После активации настройка в диалоге «Армированные конструктивные элементы» появляется дополнительная вкладка «Вариант армирования».

Данный функционал рекомендуется использовать при выполнении расчётов железобетонных конструкций, схема армирования которых известна заранее, но требуется осуществить подбор только диаметров арматурных стержней. Под схемой армирования понимается известное количество и расположение продольной рабочей арматуры в нижней, верхней и боковой зонах.

### Расчёт на продавливание

Расчёт на продавливание выполняется для армированных пластин в соответствии с требованиями п.8.1.46 – 8.1.52. Для выполнения расчёта на продавливание железобетонных плит и оболочек им необходимо задать свойства нового (единого) конструктивного элемента. Соответствующая настройка является активной при задании нового конструктивного элемента.

#### *Вкладка «Бетон»*

В настоящем разделе пользователю необходимо задать параметры материала – бетона в соответствии с п. 6.1.12, 6.1.14, 6.1.20, 6.1.21, а также учитывая примечания к таблицам 6.7 и 6.8 [2]. Значение начального модуля упругости задаётся в диалоге основных свойств материалов в соответствии с таблицей 6.11 [2].

#### *Вкладка «Арматура»*

В разделе «Арматура» пользователю необходимо назначить класс продольной и поперечной арматуры, величины защитных слоёв бетона для верхнего, нижнего и бокового армирования и коэффициенты условий работы арматуры в бетоне. Кроме того, следует отметить наличие предварительно напряжённой арматуры в рассчитываемой конструкции, а также необходимость учёта конструктивных ограничений и симметричного армирования.

### Класс арматуры

Классы продольной и поперечной арматуры назначаются в выпадающих списках во вкладке «Арматура» диалога «Армированные конструктивные элементы». В

выпадающих списках предлагается выбрать класс армирования, соответствующий п. 6.2 [2].

#### Расстояние до центра арматуры

Необходимо указать расстояние от центра тяжести верхней, нижней и боковой арматуры до верхней, нижней и боковой граней конструкции соответственно.

#### Коэффициент условий работы

Необходимо указать значение коэффициента условий работы продольной и поперечной арматуры в конструкции в соответствии с п.6.2.9 [2].

#### Симметричное расположение арматуры

Функция «Симметричное расположение арматуры» является актуальной только в случае выполнения проектировочного расчёта.

Активация соответствующей функции означает, что при выполнении расчёта по подбору армирования сечений стержней и пластин, диаметры верхней и нижней арматуры, а также их количество по ширине сечения будет одинаковым – симметричным.

#### Учёт конструктивных ограничений

Данная функция при задании армированных элементов является активной и позволяет учесть при подборе или задании свойств армирования конструктивные ограничения, изложенные в [2]. Активное состояние соответствующей настройки означает, что при выполнении расчётов учитываются положения п. 10.3.2, 10.3.5, 10.3.8, 10.3.17 [2].

#### Предварительное напряжение арматуры

В случае выполнения расчёта предварительно напряжённых железобетонных конструкций (стержней или пластин) необходимо активировать соответствующую настройку во вкладке «Арматура». Назначение параметров предварительного напряжения возможно только для определённых классов арматуры, которые согласно требованиям п. 6.2.4 [2], могут использоваться в предварительно напряжённых железобетонных конструкциях.

После установки данной опции в активное состояние в диалоге «Армированные конструктивные элементы» появляется дополнительная вкладка «Предварительное напряжение арматуры».

#### *Вкладка «Нагрузки»*

В разделе «Нагрузки» необходимо указать результаты определения внутренних силовых факторов, на основании которых будет выполнен расчёт армирования конструктивных элементов.

Внутренние усилия, которые будут использованы для выполнения расчёта армированных конструктивных элементов, могут приниматься по результатам расчёта РСУ (расчётных сочетаний усилий), отдельного нагружения или комбинации, а также могут быть заданы пользователем вручную.

#### *Вкладка «Трещиностойкость»*

В разделе «Трещиностойкость» указывается категория трещиностойкости, а также предельно допустимая ширина раскрытия трещин – ограничение трещиностойкости. Предельно допустимая ширина раскрытия трещин назначается в соответствии с п.8.2.6 [2].

#### *Вкладка «Предварительное напряжение арматуры»*

В настоящем разделе необходимо назначить параметры выполнения расчёта железобетонных конструкций с учётом предварительного напряжения арматуры. Параметры, используемые для выполнения расчёта, назначаются в соответствии с требованиями п.9 [2].

#### Коэффициент $\gamma_{sp}$

Принимается при расчёте предварительно напряжённых элементов по прочности с учётом возможных отклонений предварительного напряжения. Значения принимаются в соответствии с п.9.2.6 [2].

#### Электротермический способ натяжения

При электротермическом способе натяжения арматуры необходимо активировать соответствующую настройку. В соответствии с п.9.1.5, 9.1.6 [2] потери от деформации стальной формы и анкеров не учитываются.

#### *Вкладка «Расположение арматуры»*

Раздел «Расположение арматуры» доступен только при выполнении проверочного расчёта армированных элементов и используется для задания пользовательских схем армирования стержневых элементов, плит и оболочек.

#### Стержни

Для стержневых элементов необходимо указать диаметр и количество стержней арматуры в верхней, нижней и боковой зонах. Параметры бокового армирования становятся доступны после активации соответствующей настройки (установки флажка

«Боковая арматура»). В соответствующих выпадающих списках доступны диаметры, соответствующие выбранному классу арматуры.

Поперечное армирование стержневых элементов задаётся в виде значения интенсивности поперечного армирования по направлению осей  $Y$  и  $Z$  локальной системы координат.

В процессе назначения арматуры происходит автоматическое вычисление значения коэффициента армирования сечений.

Активация настройки «Доп. армирование» позволяет назначить произвольные схемы расположения арматуры помимо основных, описанных выше, в том числе многорядное армирование. Дополнительное армирование назначается условно в виде слоёв арматуры, каждому из которых присваивается положение в сечении, указывается симметричность расположения арматуры, величины защитного слоя (от края до центра стержней) по направлениями осей  $Y$  и  $Z$  локальной системы координат, а также диаметр и количество стержней.

В зависимости от рассчитываемого поперечного сечения (прямоугольное, тавровое, двутавровое, круглое) назначается различное положение арматуры в выпадающем списке.

Задание информации о симметричном расположении дополнительной арматуры выполняется в выпадающем списке соответствующего столбца таблицы.

Назначение защитных слоёв выполняется в соответствии с рисунком, представленным в текущей вкладке диалога. Указывается расстояние от края конструкции до центра арматуры.

Количество стержней дополнительной арматуры в слое назначается в последнем столбце таблицы настроек дополнительной арматуры.

Параметры « $d$ » и « $d_1$ » позволяют назначить диаметры стержней дополнительной арматуры. Нулевое значение параметра « $d_1$ » означает, что соответствующему слою назначаются указанные в столбце « $d$ » диаметры арматуры при их количестве, заданном в столбце « $N$ , шт.». Ненулевые значения параметров « $d_1$ » и « $d$ » позволяют для редактируемого слоя дополнительной арматуры задать чередование стержней диаметрами  $d_1$  и  $d$  соответственно, при их общем количестве, указанном в последнем столбце таблицы « $N$ , шт.».

## Оболочки

Для оболочек необходимо указать параметры верхнего и нижнего армирования по соответствующим направлениям осей X и Y локальной системы координат. Основные параметры задаются в виде диаметра стержней арматуры и шага расположения.

Значение интенсивности армирования «A» вычисляется автоматически в процессе задания арматуры оболочек. Диаметры стержней арматуры назначаются в соответствующих столбцах таблицы «d» и «d<sub>1</sub>». Нулевое значение параметра «d<sub>1</sub>» означает, что для соответствующего положения и направления армирования (строки, соответствующие первому столбцу таблицы), назначаются указанные в столбце «d» диаметры арматуры при их шаге, указанном в столбце «S». Ненулевые значения параметров «d<sub>1</sub>» и «d» позволяют для соответствующего положения и направления арматуры задать чередование стержней диаметрами d<sub>1</sub> и d с шагом, указанным в столбце «S».

Поперечное армирование оболочек задаётся в виде значения интенсивности армирования по направлениям X и Y локальной системы координат.

Активация настройки «Учитывать доп. армирование» позволяет назначить произвольные схемы расположения арматуры, помимо основных, описанных выше, в том числе многорядное армирование оболочек. Дополнительное армирование назначается условно в виде слоёв арматуры, каждому из которых присваивается направление в локальной системе координат оболочки, положение по толщине (верхнее или нижнее), величина защитного слоя (от края до центра стержней), а также диаметр и количество стержней.

Направление дополнительного армирование выполняется выбором соответствующей оси локальной системы координат в выпадающем списке.

Для каждого вводимого слоя дополнительной арматуры указывается положение (сверху или снизу), относительно которого назначается величина защитного слоя «a<sub>2</sub>». Величина защитного слоя назначается от края элемента до центра арматуры в соответствии с рисунком, представленным в текущей вкладке диалога. Параметры дополнительного армирования «d<sub>1</sub>» и «d», а также шаг арматуры задаются по аналогии с правилами, изложенными выше для основной арматуры.

### **Параметры диалога армированных элементов**

Представлено общее описание дополнительных интерфейсных функций диалога «Армированные конструктивные элементы», использование которых может упростить

процесс работы при выполнении соответствующих расчётов и анализе полученных результатов.

### ***Фильтры списка конструктивных элементов***

Фильтры списка армированных конструктивных элементов расположены в окне «Армированные конструктивные элементы» непосредственно под списком армированных элементов (групп армированных элементов). Фильтры применяются для изменения параметров отображения списка армированных элементов при задании свойств и в процессе их редактирования. Описание функций, которые выполняют фильтры, доступны непосредственно в диалоге армированных конструктивных элементов при наведении на них курсора.

### ***Калькулятор площади арматуры***

Функционал доступен в режиме выполнения проектировочного расчёта железобетонных конструктивных элементов и представлен в нижней части диалога «Армированные конструктивные элементы» во вкладке «Арматура». «Калькулятор площади» позволяет пользователю в необходимых случаях выполнить подбор требуемого количества арматурных стержней в рассматриваемом поперечном сечении, отличного от подобранного программой.

При нажатии соответствующей кнопки открывается диалог, предназначенный для подбора пользовательского варианта армирования, отличного от предложенного программой, но интенсивностью не менее подобранного.

Область «Площади арматуры» предназначена для ввода информации об армировании, полученном в программном комплексе по результатам выполнения проектировочного расчёта и представленном на рисунке в нижней части диалога «Армированные конструктивные элементы» для выделенного элемента из списка. В поле « $n$ » необходимо ввести количество стержней, предложенное программой по результатам расчёта; в поле « $d$ » – диаметр подобранной арматуры. В таблице, приведённой в левой части окна «Расчёт площадей» необходимо выбрать диаметр арматуры, на который пользователю требуется заменить подобранную программой. Во втором и третьем столбцах вышеуказанной таблице приводится площадь выбранной пользователем арматуры. Для подбора требуемого количества пользовательской арматуры в поле «Количество стержней  $N$ » необходимо последовательно вводить количество арматурных стержней, пока площадь пользовательской арматуры, указанная в столбце « $N \times d$ » для выбранного пользователем диаметра, не превысит значение, приведённое в поле «Суммарная площадь».

### ***Подбор поперечного армирования***

Функционал доступен в режиме выполнения проектировочного расчёта железобетонных конструктивных элементов и представлен в нижней части окна «Армированные конструктивные элементы». «Подбор поперечного армирования» позволяет пользователю перейти от подобранной в программе интенсивности поперечного армирования к определённому диаметру поперечной арматуры.

После выполнения проектировочного расчёта необходимо нажать соответствующую кнопку в диалоге «Армированные конструктивные элементы». В появившемся окне «Поперечное армирование» необходимо выбрать параметр, по которому осуществляется переход от интенсивности подобранного армирования к диаметру стержней – шаг расположения поперечной арматуры или диаметр стержня. Выбор любого из вышеуказанных параметров приводит к автоматическому пересчёту второго, при этом значение интенсивности поперечного армирования в зависимости от заданных пользователем значений этих параметров вычисляется автоматическим и приводится левее в окне «Поперечное армирование». Достаточными считаются такие значения вводимых параметров по соответствующим направлениям (диаметр стержня или шаг расположения), при которых величина интенсивности поперечного армирования в диалоге «Поперечное армирование» превышает значение, подобранное программой и приведённое в нижней части диалога – «Интенсивности в плоскости XZ» и «Интенсивность в плоскости XY» соответственно.

### ***Прочие функции***

Применение заданных пользователем расчётных параметров железобетонных конструкций при выполнении проектировочного расчёта для выполнения проверочного расчёта выполняется с помощью соответствующей кнопки в диалоге «Армированные конструктивные элементы» – «Применить для обоих типов расчёта». Применение данной функции после задания соответствующих свойств, позволяет пользователю при смене типа выполняемого расчёта (проверочный или проектировочный) не выполнять повторное назначение основных параметров железобетонных конструктивных элементов.

### **Особенности реализации расчёта**

При выполнении различных типов расчётов железобетонных конструктивных элементов вводятся некоторые ограничения:

1. Подбор арматуры при выполнении проектировочного расчёта всегда начинается с угловых стержней.

2. Минимальное количество стержней арматуры в верхней и нижней зонах принимается равным двум – в углах сечения.
3. Минимальное количество стержней арматуры, располагаемой у боковых граней сечения, принимается равным единице.
4. Принимается симметричное расположение арматуры у боковых граней.
5. Расчёт армирования круглого и кольцевого сечения ригелей не выполняется.

Ригелем условно считается горизонтальный или наклонённый к горизонтальной плоскости под углом менее  $45^{\circ}$  элемент.

### **Результаты расчёта армированных элементов**

Результаты расчёта железобетонных конструктивных элементов могут быть представлены как в графическом, так и в табличном виде. Графический способ представления, как правило, используется для оценки работоспособности конструкции в целом или её отдельных элементов, тогда как табличная форма представления позволяет более детально оценить результаты расчёта отдельных конструктивных элементов с последующим получением информации о коэффициентах использования поперечных сечений, внутренних силовых факторах, используемых при выполнении расчётов.

Под коэффициентом использования понимается отношение рассчитанного фактора к его предельному значению, определяемому согласно [2].

### ***Графическое представление результатов***

Графическое представление результатов различного типа расчётов доступно после выполнения соответствующих вычислений в диалоге «Армированные конструктивные элементы».

Отображение результатов расчёта армированных конструктивных элементов выполняется в меню «Результаты» → «Карта результатов». В появившемся окне в выпадающем списке «Тип расчёта» указываются требуемые результаты, которые должны быть представлены в графическом виде, на основании выполненного проектировочного или проверочного расчётов. Далее в выпадающем списке «Тип результатов» указываются критерии, которые необходимо отобразить в виде карты для выбранного типа расчёта.

На карте результатов для стержневых элементов отображаются только рассчитанные значения интенсивности армирования в виде площади подобранной арматуры.

Для оболочек доступны «Дополнительные параметры», при активации которых (установка флажка) пользователю предлагается задать либо диаметр арматуры, либо шаг



расположения стержней. После выполнения соответствующих настроек, на шкале карты результатов будут отображаться как результаты расчёта требуемой интенсивности армирования (при выполнении проектировочного расчёта), так и диаметр и шаг расположения арматуры по соответствующим направлениям в зависимости от указанных пользователем настроек. При выборе одного из параметров (диаметр или шаг расположения) пересчёт второго происходит автоматически на основании рассчитанного значения интенсивности армирования по направлениям X и Y локальной системы координат. Класс арматуры, указываемый в «Дополнительных параметрах» не приводит к повторному выполнению расчёта, и учитывается только при выборе диаметра арматурных стержней, так как в соответствии с нормативными документами разным класса арматурной стали соответствуют различные диапазоны диаметров арматурных стержней.

#### ***Табличное представление результатов***

Табличное представление результатов расчёта железобетонных конструктивных элементов, как правило, используется для более детального анализа работы рассчитываемых поперечных сечений. Функционал доступен в диалоге «Армированные конструктивные элементы» после выполнения соответствующих расчётов, и представлен в нижней части вышеназванного диалога во вкладках «Коэф. использования» и «Трещиностойкость».

После выполнения требуемого типа расчёта, во вкладке «Коэф. использования» для выделенного конструктивного элемента в списке будут приведены значения коэффициентов использования поперечных сечений для всех критериев в соответствии с [2]. Во вкладке «Трещиностойкость» приводятся результаты определения значений ширины раскрытия трещин. При выполнении проектировочного расчёта по подбору армирования при отсутствии трещин, в соответствующей вкладке будут показаны нулевые значения ширины раскрытия трещин.

При анализе результатов расчёта армированных конструктивных элементов во вкладке «Коэф. использования» доступны кнопки «Силовые факторы для указанного коэффициента», «Все силовые факторы». При нажатии соответствующих кнопок появляется окно, в котором приводятся значения внутренних силовых факторов, используемых при проведении соответствующих расчётов по [2]. Кнопка «> 0,01» позволяет в таблице результатов вкладки «Коэф. использования» отобразить рассчитанные значения коэффициентов использования сечений, превышающие 0,01.

## Расчет оснований и фундаментов

Расчет фундамента начинается с предварительного выбора конструктивного решения и предварительных параметров, таких как размер подошвы и глубина заложения.

Проверка пригодности принятых размеров, а также выбор размеров отдельных частей фундамента и способов его армирования, выполняется исходя из расчета прочности грунта основания. Расчет оснований по деформациям производится исходя из условия совместной работы сооружения и основания. Совместная деформация основания и сооружения характеризуется абсолютной осадкой (подъемом) основания отдельного элемента фундамента.

Расчет деформаций основания при среднем давлении под подошвой фундамента, не превышающем расчетное сопротивление грунта (см. п. 5.5.8 СП 50-101-2004 / п.5.6.7 СП 22.13330.2011) следует выполнять, применяя расчетную схему в виде линейно деформируемого полупространства (см. п. 5.5.31 / 5.6.31 СП 22.13330.2011)) с условным ограничением глубины сжимаемой толщи (см. п. 5.5.41 СП 50-101-2004 / 5.6.41 СП 22.13330.2011).

При расчете деформаций основания с использованием расчетной схемы среднее давление под подошвой фундамента не должно превышать расчетное сопротивление грунта основания (п. 5.5.8 СП 50-101-2004 / п. 5.6.7 СП 22.13330.2011).

Следует отметить, что для моделирования упругого основания требуется определение коэффициентов пропорциональности, называемых коэффициентами постели.

На основании данных инженерно-геодезических изысканий APM Structure3D позволяет задать структуру грунта и определить расчетное сопротивление грунта и коэффициенты постели оснований.













Расчет внутренних усилий в системе "основание-фундамент-сооружение" допускается выполнять на основании, характеризуемом переменным в плане коэффициентом жесткости (коэффициентом постели). При этом переменный в плане коэффициент постели должен назначаться с учетом неоднородности в плане и по глубине основания. Коэффициенты постели зависят от структуры и физических свойств грунта, а также от нагрузки на основание. Эти коэффициенты могут определяться заранее или в процессе последовательных приближений. Процесс последовательных приближений включает следующие шаги:

- 1) расчет сооружения на жестком основании и определение первоначального распределения коэффициента постели исходя из глубины продавливания толщи грунта;
- 2) расчет совместных перемещений сооружения фундамента и основания с принятым распределением коэффициента постели при действии заданных нагрузок;
- 3) определение осадок основания с использованием принятой модели основания, а также следующего приближения и пересчет коэффициентов постели;
- 4) повторение шагов 2) и 3) до достижения сходимости по контрольному параметру (например, по коэффициенту постели).

Для работы с упругими основаниями служат команды одноименной панели инструментов (рисунок 9.1).



Рисунок 9.1 – Панель инструментов Упругие основания

-  Упругое основание под столбчатый фундамент (команда доступна при выделении стержня-колонны и прилегающего узла-основания);
-  Упругое основание под ленточный фундамент (команда доступна при выделении стержня-ригеля);
-  Упругое основание под сплошной фундамент (команда доступна при выделении пластины-плиты);
-  Упругое основание под столбчатый свайный фундамент (команда доступна при выделении стержня-колонны и прилегающего узла-основания);
-  Информация о грунтах (команда доступна если в документе есть грунты);
-  Задание инженерно-геологических элементов
-  Создание скважин
-  Список скважин
-  Загрузить геологическую информацию
-  Сохранить геологическую информацию
-  Показать/Скрыть скважины
-  Показать/Скрыть названия скважин



Показать/Скрыть картину напластования



Создать объёмную модель напластования грунтов

### **Общие принципы работы с диалоговым окном Фундаменты**

В общем случае сооружение может быть установлено на фундаментах разного типа. Для работы со всеми основаниями используется единое диалоговое окно со списком оснований. Вкладки диалогового окна зависят от выбранного типа основания. При выделении основания в списке диалога – на модели соответствующий элемент подсвечивается красным цветом. И, наоборот, при выделении элемента на модели – при вызове диалога этот же элемент будет также подсвечен и в списке.

Кнопка Применить диалогового окна предназначена для принятия всех изменений, произведенных во вкладках. В случае некорректного задания параметров выводится информационное сообщение.

### ***Расчет столбчатого фундамента***

Столбчатые (отдельно стоящие) фундаменты выполняют, как правило под колонны каркасных зданий. Для расчета столбчатого фундамента необходимо создать стальной, алюминиевый, железобетонный или армокаменный конструктивные элементы.

Для задания столбчатого фундамента необходимо выделить стержень (конструктивный элемент) и узел с установленной опорой, далее на панели «Упругое основание» нажать кнопку «Столбчатый фундамент», после чего появится диалоговое окно «Фундаменты» с указанием списка фундаментов, вкладок для настроек, вкладок расчета и отображения результатов.

### ***Вкладка Конфигурация***

Форма фундамента. В данном поле предоставляется возможность выбора фундамента прямоугольной или круглой формы. Для выбора соответствующей формы фундамента необходимо поставить галочку напротив.

Глубина заложения верхнего обреза фундамента – расстояние между верхней плоскостью фундамента, на которую опирается надземная часть конструкции, относительно нулевого уровня. Данный параметр может принимать, как положительное значение, что характеризует смещение обреза фундамент вверх, так и отрицательное – смещение верхнего обреза вниз.

Тип расчета. Данная настройка позволяет выбрать какой тип расчета необходимо выполнить «Проектировочный» или «Проверочный».

Проектировочный расчета позволяет выполнить подбор фундамента в соответствии с требованиями [5] и [2].

Проверочный позволяет выполнить проверку заданного фундамента в соответствии с требованиями [5] и [2].

Ограничение максимальных размеров подошвы  $B \times L$ , м – максимальное отношение размеров подошвы фундамента. Данная настройка относится к фундаментам только прямоугольной формы и позволяет ввести дополнительные конструктивные ограничения.

Ограничение максимального диаметра подошвы  $D$ , м. Данная настройка относится к фундаментам только круглой формы и позволяет ввести дополнительные конструктивные ограничения.

Максимальное отношение размеров подошвы  $B/L$  – данные настройки позволяют ввести дополнительные конструктивные ограничения по габаритам подошвы для фундамента прямоугольной формы.

Ограничение площади отрыва подошвы фундамента, % – данный параметр позволяет пользователю ввести дополнительные конструктивные ограничения в соответствии с п.5.6.27 [5].

Количество ступеней. Данная настройка становится активной только при выборе проверочного типа расчета и позволяет задать габариты, как для фундаментов прямоугольной, так и круглой формы.

Наличие подвала и учет его влияния на фундамент становится возможным после выбора режима «Наличие подвала». Данный режим становится активным после установки галочки в поле напротив. При этом, ниже графического отображения задаваемых параметров, становятся активными поля для их ввода.

#### *Вкладка Слои грунта*

Во вкладке «Слои грунта» предоставляется информация о характеристиках грунтового основания для каждого фундамента. одному фундаменту может соответствовать только одно основание.

#### *Вкладка Нагрузки и расчет*

В данной вкладке в поле «Нагрузки» предоставляется возможность использовать нагрузки на фундамент из результатов расчета, как для отдельного загрузения, так и

комбинации загружен или задать вручную. Для выбора соответствующего режима необходимо напротив него поставить галочку.

При нажатии знака вопрос напротив режима «Ручное задание нагрузок» появляется информационное окно «Схема расположения сил» с указанием направления осей ГСК (глобальной системы координат) и ориентации габаритов фундамента, и действующих на него нагрузок.

Коэффициенты условия работы  $\gamma_{c1}$  и  $\gamma_{c2}$  назначаются в соответствии с [5] таблица 5.4.

Коэффициент условия работы  $\gamma_c$  и коэффициента надежности по ответственности  $\gamma_n$  назначаются в соответствии с п.5.7.2 [5].

При необходимости учета в расчете фундамента действия сил (касательных) морозного пучения, необходимо поставить галочку напротив режима «Расчет на выпучивание», после чего становятся активными поля ввода данных для расчета.

Выбор нагрузок для расчета на действие сил морозного пучения осуществляется так же, как в поле «Нагрузки».

Выбор типа грунта для вычисления расчетной удельной касательной силы пучения  $\tau_{fh}$  выполняется на основании таблицы 6.12 [5].

В поле «Глубина промерзания» необходимо ввести значение расчетной глубины промерзания, после чего в поле вывода удельной касательной силы пучения  $\tau_{fh}$  выводится окончательное значение.

Следует заметить, что при назначении коэффициентов условия работы  $\gamma_{c1}$ ,  $\gamma_{c2}$ ,  $\gamma_c$ , коэффициента надежности по ответственного  $\gamma_n$ , при выборе параметров из таблиц после нажатия кнопки «ОК» в полях для соответствующих расчетов красный вопросительных знак меняется на зеленую галочку, что свидетельствует о применении выбранных настроек.

Для расчета фундаментов и оснований опор ЛЭП необходимо установить галочку напротив режима «Расчет оснований воздушных ЛЭП» после чего становится активной кнопка для назначения параметров расчета в зависимости от типа опоры и условия ее закрепления.

Назначение выбранных параметров для расчета фундамента осуществляется после нажатия кнопки «Применить».

### Вкладка Схема

После выполнения расчета доступна вкладка «Схема», в которой указаны геометрические размеры фундамента и его расположения относительно слоев грунта.

### Вкладка Результаты

В данной вкладке отображаются результаты расчета фундамента в соответствии с [5], [2].

### Расчет основания под ленточный фундамент

Ленточный фундамент представляет собой балку, установленную под стеной или рядом близкорасположенных колонн. Для расчета упругого основания под ленточный фундамент необходимо создать ЖБ ригель, стальной или деревянный конструктивный элемент, затем установить опоры по длине конструктивного элемента. Создать конструктивный элемент после установки опор не получится, поскольку, согласно ограничению, конструктивный элемент не может иметь опоры в пролете.

В одно основание ленточного фундамента могут входить несколько конструктивных элементов одного сечения, расположенных на одном грунте.

После выделения ригеля или группы ригелей одного сечения доступна команда Упругое основание под ленточный фундамент, после активации которой появится диалоговое окно Фундамент.

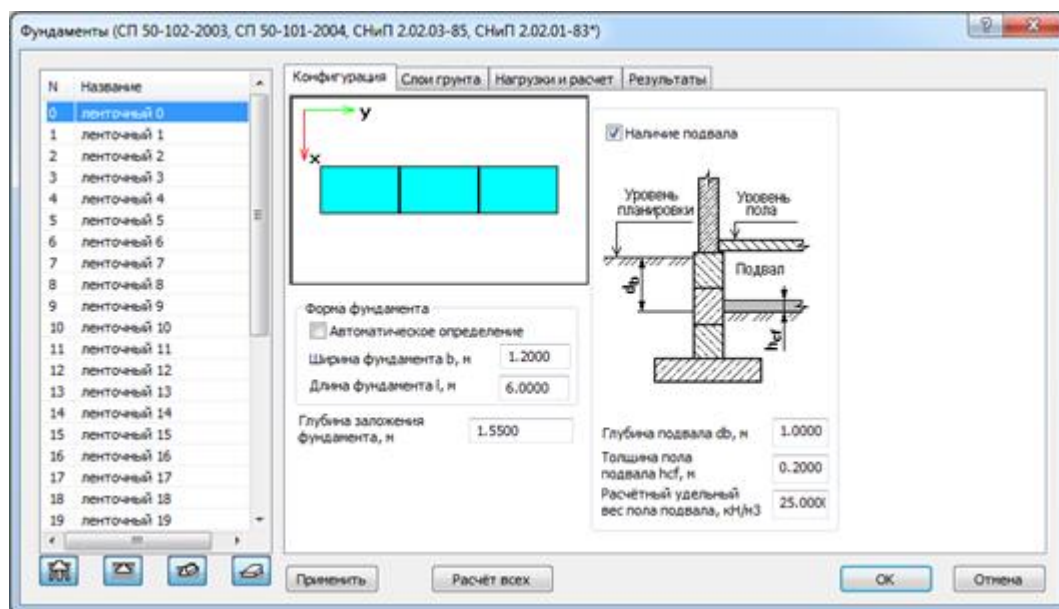


Рисунок 9.2 – Диалоговое окно Фундаменты – конфигурация ленточного фундамента

### *Вкладка Конфигурация*

Изображение фундамента соответствует виду сверху. Цвет фундамента соответствует цвету сечения, что позволяет проконтролировать, чтобы одно основание было создано из элементов одного сечения.

Форма фундамента – данные недоступны для редактирования, поскольку форма фундамента определяется сечением и расположением конструктивных элементов.

Глубина заложения фундамента – глубина заложения относительно нулевого уровня. Глубина заложения не может быть ниже глубины скального основания.

Наличие подвала – задание параметров подвала – глубины и толщины пола [м], расчетного удельного веса пола [кН/м<sup>3</sup>]. Данные параметры используются для вычисления расчетного сопротивления грунта основания (п. 5.5.8 СП 50-101-2004 / п. 5.6.7 СП 22.13330.2011).

### *Вкладка Слои Грунта*

Одному основанию может соответствовать только один грунт.

Грунт – выпадающий список содержит все заданные грунты данного документа. Одному основанию может соответствовать только один грунт. При нажатии на кнопку Новый пользователь имеет возможность ввести название нового грунта и в диалоговом окне задать структуру грунта. В общем случае площадка строительства может быть неоднородной. В этом случае необходимо для каждого основания задать свой грунт.

Для задания грунта необходимо, прежде всего, выбрать тип (глина или песок). В зависимости от выбранного типа будет то или иное выпадающее меню подтипа: для песка – гравелистый, крупный, средней крупности, мелкий, пылеватый; для глины – в зависимости от показателя текучести  $IL = 0 \dots 1$ . Далее станут доступны для задания все остальные параметры: толщина (м), плотность (кг/м<sup>3</sup>), угол внутреннего трения (град), удельное сцепление (кПа), коэф. поперечной деформации, модуль деформации (МПа).

Есть возможность выбора сразу predetermined типа грунта, например Глина  $IL = 0$  или Песок средней крупности с возможностью дальнейшего редактирования характеристик грунта.

### *Вкладка Нагрузки и Расчет*

Значения нагрузок на основание можно задать вручную в соответствии с расчетной схемой или взять из результатов статического расчета от действия какого-либо нагружения или комбинации нагружений.

Коэффициенты условий работы – кнопка вызова диалогового окна выбора коэффициентов условий работы по типу грунта согласно таблице 5.2 СП 50-101-2004.



Кнопка «Вычислить» инициирует расчет толщины продавливания грунта с учетом нагрузки на основание, коэффициентов постели, осадку и крен.

После выполнения расчета, опоры заменяются на упругие опоры соответствующей жесткости. Далее следует выполнить расчет системы «основание-фундаменты-сооружение» на упругих опорах. После чего возможно определение необходимого армирования конструктивных элементов с учетом работы конструкции на упругом основании.

### ***Расчет основания под сплошной фундамент***

Сплошной фундамент представляет собой плиту. Для расчета упругого основания под сплошной фундамент необходимо создать конструктивный элемент с типом элемента ЖБ оболочка, а затем установить опоры по всей пластине. Создать конструктивный элемент после установки опор не получится, поскольку согласно ограничению конструктивный элемент не может иметь опоры в пролете.

В одно основание сплошного фундамента могут входить несколько конструктивных элементов – ЖБ оболочек, расположенных на одном грунте.

После выделения одного или нескольких конструктивных элементов – ЖБ оболочек доступна команда Упругое основание под сплошной фундамент, после активации которой появится диалоговое окно Фундаменты.

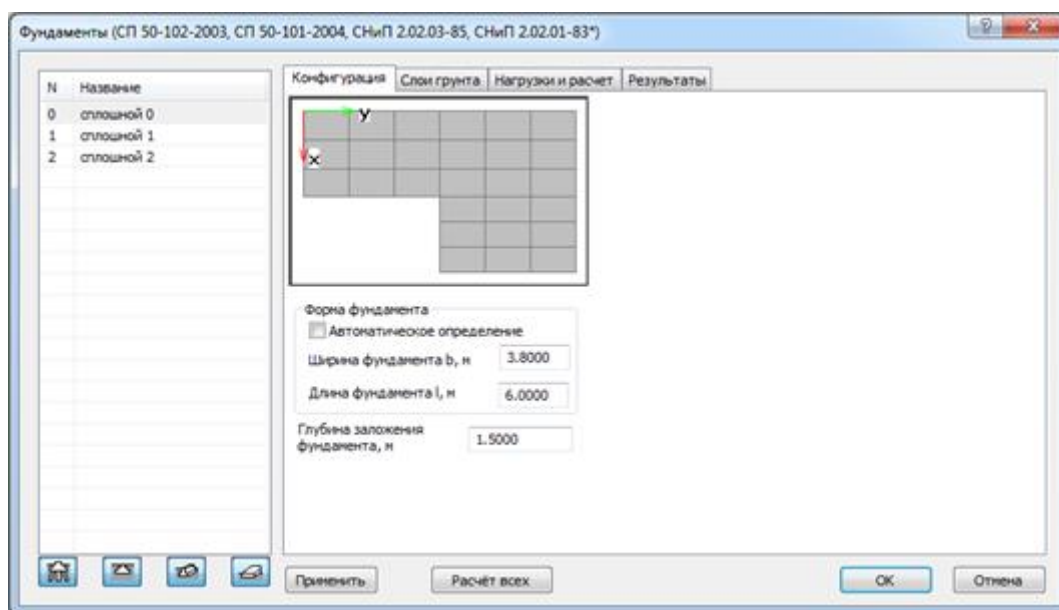


Рисунок 9.3 – Диалоговое окно Фундаменты – конфигурация сплошного фундамента.

#### ***Вкладка Конфигурация***

Изображение фундамента соответствует виду сверху.

Форма фундамента – данные недоступны для редактирования, поскольку форма фундамента определяется размерами расположением конструктивных элементов

Глубина заложения фундамента – глубина заложения относительно нулевого уровня. Глубина заложения не может быть ниже глубины скального основания.

#### *Вкладка Слои Грунта*

Одному основанию может соответствовать только один грунт.

Грунт – выпадающий список содержит все заданные грунты данного документа. Одному основанию может соответствовать только один грунт. При нажатии на кнопку Новый пользователь имеет возможность ввести название нового грунта и в диалоговом окне задать структуру грунта. В общем случае площадка строительства может быть неоднородной. В этом случае необходимо для каждого основания задать свой грунт.

Для задания грунта необходимо, прежде всего, выбрать тип (глина или песок). В зависимости от выбранного типа будет то или иное выпадающее меню подтипа: для песка – гравелистый, крупный, средней крупности, мелкий, пылеватый; для глины – в зависимости от показателя текучести  $IL = 0 \dots 1$ . Далее станут доступны для задания все остальные параметры: толщина (м), плотность (кг/м<sup>3</sup>), угол внутреннего трения (град), удельное сцепление (кПа), коэфф. поперечной деформации, модуль деформации (МПа).

Есть возможность выбора сразу предопределенного типа грунта, например Глина  $IL = 0$  или Песок средней крупности с возможностью дальнейшего редактирования характеристик грунта.

#### *Вкладка Нагрузки и Расчет*

Значения нагрузок на основание можно задать вручную в соответствии с расчетной схемой или взять из результатов статического расчета от действия какого-либо заграждения или комбинации заграждений.

Коэффициенты условий работы – кнопка вызова диалогового окна выбора коэффициентов условий работы по типу грунта согласно таблице 5.2 СП 50-101-2004.

Кнопка «Вычислить» инициирует расчет толщины продавливания грунта с учетом нагрузки на основание, коэффициентов постели, осадку и крен.

После выполнения расчета, опоры заменяются на упругие опоры соответствующей жесткости. Далее следует выполнить расчет системы «основание-фундаменты-сооружение» на упругих опорах. После чего возможно определение необходимого армирования конструктивных элементов с учетом работы конструкции на упругом основании.

### Расчет свайного фундамента

Выделение стержня – стального, железобетонного или армокаменного конструктивного элемента – колонны и узла с установленной опорой, где предполагается установка фундамента, делает доступной команду Упругое основание под одиночный свайный фундамент. После активации команды появится диалоговое окно Свайный фундамент. Для задания свайных фундаментов для нескольких опор необходимо выделить нижние участки колонн и соответствующие опоры. После выбора команды Упругое основание под одиночный свайный фундамент для каждой, из выделенных колонн будет установлен свайный фундамент. Список всех свайных фундаментов расположен в левой части диалогового окна. Каждый свайный фундамент может иметь свои параметры. Для задания параметров выберите свайный фундамент в списке. Рассмотрим вкладки диалогового окна для задания параметров свайного фундамента подробнее.

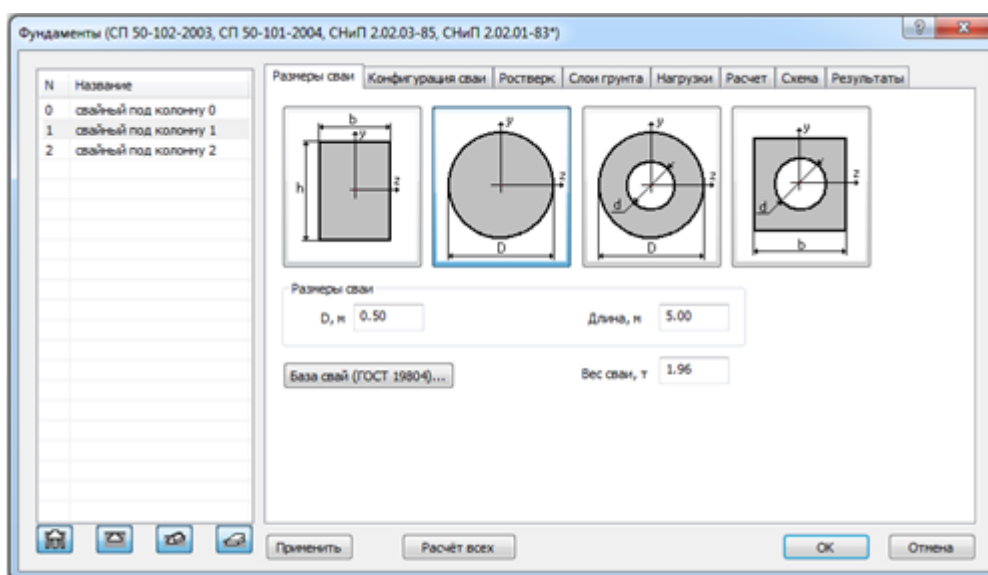


Рисунок 9.4 – Диалоговое окно Фундаменты – размеры сваи.

Выберете стандартную сваю из базы данных (кнопка «База данных»). При этом сечение и поля размеров сваи заполнятся автоматически. При использовании не стандартных свай необходимо выбрать сечение сваи, задать ее размеры и вес.

Вкладка Конфигурация сваи предназначена для выбора их списка типа сваи и задания параметров в зависимости от выбранного типа согласно таблице 9.1.

Таблица 9.1 – Параметры конфигурации сваи

Тип сваи	Доступные параметры конфигурации сваи
Стойка забивная	–

Тип сваи	Доступные параметры конфигурации сваи
Стойка оболочка	Тип опирания Нормативное значение предела прочности скального грунта, кПа Наружный диаметр заделанной в скальный грунт части, м
Стойка набивная и буровая	Нормативное значение предела прочности скального грунта, кПа Расчетная глубина заделки в скальный грунт, м Наружный диаметр заделанной в скальный грунт части, м
Висячая забивная	Способ погружения (таблица 7.3 СП 50-102-2003 / таблица 7.4 СП 24.13330.2011).
Висячая оболочка	
Висячая оболочка, заполняемая бетоном	Опираение на лессовый/глинистый грунт со степенью влажности >0.9 С уширением Способ погружения (таблица 7.5 СП 50-102-2003 / таблица 7.6 СП 24.13330.2011)
Висячая набивная и буровая	
Висячая винтовая	Параметры грунта (таблица 7.8 СП 50-102-2003 / таблица 7.9 СП 24.13330.2011) Диаметр лопасти
Висячая бурозавинчиваемая	Способ погружения (таблица 7.4 СП 24.13330.2011).
Висячая вдавливаемая	Способ погружения (таблица 7.4 СП 24.13330.2011).

Способ погружения сваи – кнопка вызова диалогового окна выбора способа погружения сваи или типа грунта согласно таблице 7.3, 7.5 или 7.8 СП 50-101-2004 / СП 24.13330.2011).

Вкладка Ростверк предназначена для задания параметров ростверка и учета наличия подвала.

Наличие подвала – задание параметров подвала: глубины и толщины пола [м], расчетного удельного веса пола [кН/м<sup>3</sup>]. Данные параметры используются для вычисления расчетного сопротивления грунта основания (п. 5.5.8 СП 50-101-2004 / п. 5.6.7 СП 22.13330.2011).

Вкладка грунт доступна только для висячих свай. Для задания грунта необходимо, прежде всего, выбрать тип (глина или песок). В зависимости от выбранного типа будет то или иное выпадающее меню подтипа: для песка – гравелистый, крупный, средней крупности, мелкий, пылеватый; для глины – в зависимости от показателя текучести  $IL = 0...1$ . Далее станут доступны для задания все остальные параметры:

толщина (м), плотность (кг/м<sup>3</sup>), угол внутреннего трения (град), удельное сцепление (кПа), коэф. поперечной деформации, модуль деформации (МПа).

Во вкладке Нагрузка выберете загрузку или введите нагрузки вручную. Для задания нагрузок из комбинации загрузок необходимо предварительно выполнить статический расчет конструкции на жестких опорах. В расчете используются осевая (вертикальная) сила и моменты в перпендикулярных плоскостях.

Во вкладке Расчет выберете способ определения прочностных характеристик грунта и коэффициент надежности. При нажатии на кнопку «Расчитать несущую способность свай» в диалоге выводится несущая способность свай по грунту на продавливание и на выдергивание. Предусмотрена также возможность задания несущей способности свай вручную, например, если прочность свай по материалу окажется меньше прочности свай по грунту.

Коэффициенты условий работы – кнопка вызова диалогового окна выбора коэффициентов условий работы по типу грунта согласно таблице 5.2 СП 50-101-2004 / СП 22.13330.2011.

Кнопка «Расчет фундамента» инициирует расчет толщины продавливания грунта с учетом нагрузки на основание, коэффициентов постели, осадку, крен, , характеристик несущей способности свай по грунту необходимое количество свай (шт.), а также для висячих свай: геометрические размеры плиты ростверка, размеры условного фундамента, расчетное сопротивление грунта под условным фундаментом (кПа). Если требуемое количество свай больше 20 – выводится информационное сообщение.

После выполнения расчета появляется вкладка Схема, на которой показано расположение свай в грунте для данного свайного основания под колонну. После выполнения расчета для всех типов свай кроме свай-стоек опора «запрет перемещения по оси Z» будет заменена на упругую опору соответствующей жесткости. Жесткость опоры определяется на основании коэффициентов постели в зависимости от параметров грунта, глубины продавливания и площади опирания основания свай. Для выполнения расчета с учетом совместной работы задания и основания необходимо выполнить повторный расчет с учетом упругих закреплений свайного фундамента.

### **Основные понятия APM Structure3D при моделировании грунтов**

Инженерно-геологический элемент (ИГЭ) – инженерно-геологическое тело, представленное одной горной породой, статистически однородное по своим свойствам: плотность (кг/м<sup>3</sup>), угол внутреннего трения (град), удельное сцепление (кПа),

коэффициент поперечной деформации, модуль деформации (МПа). Каждому ИГЭ соответствует свой цвет для отображения на карте напластования и в Грунте.

Скважина – характеризуется расположением и слоями ИГЭ. Для каждого слоя задается его толщина (м). Расположение скважины в плоскости (координаты X, Y) можно задать с помощью указателя мыши или ввести координаты с клавиатуры. Расположение скважины по высоте (координата Z) задается абсолютной отметкой устья. Кроме того, дополнительно задается нулевой уровень здания относительно уровня моря (м). По заданному расположению скважин осуществляется аппроксимация карты напластования грунтов.

Грунт – характеризуется слоями с заданными толщинами (м). Свойства каждого слоя: плотность ( $\text{кг/м}^3$ ), угол внутреннего трения (град), удельное сцепление (кПа), коэффициент поперечной деформации, модуль деформации (МПа). Каждому слою грунта соответствует свой цвет.

Для одного основания фундамента можно задать только один грунт. Характеристики грунта могут быть заданы в диалоговом окне или получены для каждого основания из карты напластования грунтов.

### **Задание характеристик грунтов оснований**

В APM Structure3D предусмотрено 2 способа задания характеристик грунтов:

1. Задание списка предопределенных грунтов, а затем последующий выбор одного из них для каждого основания. Такой подход предпочтителен если площадка строительства однородна (изменения характеристик грунта незначительны) или количество оснований невелико.

2. Задание ИГЭ со свойствами, формирование скважин на основании данных инженерно-геологических изысканий, построение карты напластования грунтов. Такой подход позволяет автоматически получить характеристики грунта в любой точке для значительного количества оснований и неоднородных геологических условий.

Рассмотрим каждый из способов задания характеристик грунтов подробнее.

### ***Работа со списком грунтов***

Кнопка Информация о грунтах вызывает диалоговое окно для создания, редактирования и удаления грунтов. Диалоговое окно содержит список грунтов данного документа (слева), схематичное изображение выбранного грунта (справа) и кнопки для работы с выбранным грунтом и диалоговым окном (по центру).

Кнопка «Редактировать...» вызывает для выбранного диалоговое окно Слои грунта, в котором вы можете изменить структуру грунта.

Кнопка «Новый...» вызывает окно ввода названия создаваемого грунта. Далее пользователь использует диалоговое окно Слои грунта для задания структуры нового грунта. После создания новый грунт будет доступен для выбора в диалоговом окне фундамент.

Кнопка «Удалить» предназначена для удаления выбранного грунта. Грунт нельзя удалить до тех пор пока он используется в расчете какого-либо основания данного документа.

Созданные с помощью данной команды грунты будут доступны для последующего выбора во вкладке Слои грунта диалоговом окне Фундаменты.

### ***Карта напластования***

Определение характеристик грунта для неоднородной площадки строительства осуществляется в несколько этапов:

1. Задание инженерно-геологических элементов (ИГЭ) и их свойств.
2. Задание координат скважин и формирование в них слоев грунта из ИГЭ.
3. Аппроксимация по имеющимся скважинам и построение карты напластования слоев грунтов.
4. Создание отдельных Грунтов под каждое основание.

Рассмотрим этапы построения карты напластования подробнее.

Для создания скважин выберете на панели инструментов Упругие основания команду Задание инженерно-геологических элементов. Появившееся диалоговое окно содержит все заданные ИГЭ данного документа. Для задания нового ИГЭ необходимо, прежде всего, выбрать тип (глина или песок). В зависимости от выбранного типа будет то или иное выпадающее меню подтипа: для песка – гравелистый, крупный, средней крупности, мелкий, пылеватый; для глины – в зависимости от показателя текучести  $IL = 0...1$ . Далее станут доступны для задания все остальные свойства: плотность ( $кг/м^3$ ), угол внутреннего трения (град), удельное сцепление (кПа), коэффициент поперечной деформации, модуль деформации (МПа). Есть возможность выбора предопределенного типа грунта, например Глина  $IL = 0$  или Песок средней крупности с возможностью дальнейшего редактирования свойств.

Для задания расположения скважин с помощью указателя мыши служит команда Создание скважин. Данный метод задания следует использовать если предварительно в местах расположения скважин созданы узлы, тогда обеспечится точная привязка курсора. После указания места расположения скважины появится диалоговое окно.

Вызвать данное диалоговое окно можно после задания ИГЭ с помощью команды Инженерно-геологические данные.

Область для формирования картины напластования грунтов в ГСК – данная настройка позволяет автоматически по расположению скважин задать область карты напластования. Предусмотрен также ввод граничных координат области если автоматическое построение карты напластования не охватывает весь контур фундамента здания. Последний вариант может быть использован, например, для вытянутого в плане здания при расположении скважин по линии.

Список скважин включает номер, название и координаты скважины, которые могут быть введены с клавиатуры. Расположение скважины в плоскости – координаты X, Y модели. Расположение скважины по высоте – координата Z задается абсолютной отметкой устья. Кроме того, дополнительно задается нулевой уровень здания относительно уровня моря (м). Для добавления/удаления скважин используются кнопки, расположенные ниже списка скважин.

В правой части диалогового окна для каждой скважины осуществляется набор слоев из ранее созданных ИГЭ и их толщин. При этом задавать можно один из двух параметров – толщину или мощность слоя. Цвет слоя соответствует цвету ИГЭ.

Отображение самих скважин и их названий на модели возможен только при нажатых кнопках: Показать/Скрыть скважины и Показать/Скрыть названия скважин.

Все изменения в диалоговом окне доступны для отображения на расчетной модели после нажатия кнопки «Применить».

Кнопки группы Задать грунт позволяют задать грунт «Для всех фундаментов» или только «Для фундаментов с незадавленными слоями грунта». Последняя настройка позволяет комбинировать оба способа задания грунтов основания, например, когда часть здания расположена на однородной площадке строительства, а под другой частью здания грунты неоднородны. После нажатия одной из указанных кнопок выполняется построение карты напластования на основании аппроксимации. Отображение карты на модели возможно только при нажатой кнопки Показать/Скрыть картину напластования. Интерполяция свойств грунта базируется на автоматическом создании новых грунтов под каждым основанием.

Настройка «Картина напластования» позволяет настроить прозрачность визуализации.

Инженерно-геологические данные сохраняются в вместе с моделью ARМ Structure3D, однако предусмотрена возможность сохранения ИГЭ и скважин в



отдельный файл формата (\*.soildata). Для этого предусмотрены кнопки «Сохранить...» и «Загрузить...» диалогового окна Инженерно-геологические данные или соответствующая кнопка панели инструментов Упругие основания.

## Алюминиевые конструктивные элементы

### **Общие сведения**

Алюминиевые конструктивные элементы служат для выполнения расчётов алюминиевых конструкций зданий и сооружений, воспринимающих различные внешние и внутренние воздействия в процессе эксплуатации или на стадии возведения. Основными элементами, расчёт которых может быть выполнен как конструктивных элементов, являются стержни, которые, как правило, представлены колоннами, ригелями, фермами различной геометрической формы и другими конструкциями.

Исходными данными для выполнения расчёта алюминиевых конструктивных элементов являются вычисленные по результатам статического расчёта нормативные и расчётные значения внутренних силовых факторов от различного типа внешних нагрузок.

### **Назначение алюминиевых элементов**

#### ***Общие параметры расчёта***

Начальным этапом задания алюминиевых элементов является процесс назначения основных параметров расчёта, к которым для рассматриваемого типа конструктивных элементов относятся нормативные документы, в соответствии с которыми выполняется расчёт.

#### ***Панель «Конструктивные элементы»***

Для выполнения расчёта алюминиевых конструкций необходимо присвоить соответствующим конечным элементам определённые заданные пользователем свойства алюминиевых конструктивных элементов.

Задание алюминиевых конструктивных элементов выполняется на панели «Конструктивные элементы», которая открывается нажатием правой кнопки мыши на любой панели инструментов в верхней части окна программы и активацией соответствующей панели.

В выпадающем списке панели необходимо выбрать тип конструктивных элементов «Алюминиевые элементы», который позволит рассчитать алюминиевые конструкции.

Предусмотрены два способа присвоения конечным элементам свойств конструктивных:

- а) внесение выделенных конечных элементов в новый конструктивный элемент;
- б) внесение выделенных конечных элементов в отдельные конструктивные элементы.

В первом случае выделенные конечные элементы образуют единый непрерывный конструктивный элемент, обладающий едиными свойствами. Новый конструктивный элемент, в состав которого входят несколько конечных элементов, рассчитывается по максимальным из значений внутренних силовых факторов, возникающих во входящих в него конечных элементах. Расчёт поперечных сечений такого конструктивного элемента выполняется по наиболее неблагоприятным условиям, то есть принимается таким, чтобы обеспечить выполнение требуемых критериев для всех элементов, входящих в единый конструктивный элемент.

Во втором случае каждый из выделенных конечных элементов вносится в отдельный конструктивный элемент, обладающий уникальными (назначенными пользователем) свойствами. Отдельные конструктивные элементы, в состав которых может входить только один конечный элемент, рассчитываются по максимальным внутренним силовым факторам, возникающим в сечении конечного элемента. Расчёт по подбору (проверке) поперечных сечений таких элементов выполняется уникальным для каждого отдельного конструктивного элемента на основании, возникающих в конечном элементе, входящем в отдельный конструктивный элемент, усилий.

Присвоение конечным элементам свойств конструктивных элементов осуществляется в следующей последовательности:

1. выделение конечных элементов, которым требуется назначить свойства конструктивных;
2. присвоение выделенным конечным элементам свойств нового конструктивного элемента или отдельных конструктивных элементов нажатием соответствующих кнопок на панели «Конструктивные элементы».

В случае невозможности создания конструктивного алюминиевого элемента система предупреждает пользователя, что соответствующее действие невыполнимо. Удаление конструктивного элемента выполняется нажатием соответствующей кнопки на панели инструментов «Конструктивные элементы».

## **Параметры расчёта алюминиевых элементов**

### ***Основные расчётные параметры***

После присвоения конечным элементам свойств алюминиевых конструктивных элементов пользователю необходимо назначить основные параметры выполнения соответствующих расчётов.

Основные параметры, используемые при выполнении расчёта алюминиевых конструкций на заданные усилия, изложены в нормативных документах и представлены в диалоге «Алюминиевые конструктивные элементы».

#### *Расчётная длина элементов*

Выбор способа учёта расчётной длины элементов при выполнении расчётов конструктивных элементов осуществляется пользователем переключением соответствующей настройки в диалоге «Алюминиевые конструктивные элементы». Назначение расчётной длины выполняется указанием коэффициента расчётной длины или непосредственно значением расчётной длины.

При выборе параметра «Коэффициент расчётной длины», указанные пользователем значения в соответствующих полях учитываются в качестве множителей к фактической длине конструктивного элемента при выполнении расчётов.

В случае выбора параметра «Расчётная длина», указанные пользователем значения в соответствующих полях, принимаются в качестве значений расчётных длин конструктивных элементов, используемых при выполнении расчётов.

#### *Коэффициент условий работы*

Коэффициент условий работы элементов алюминиевых конструкций учитывается в качестве дополнительного множителя к расчётному сопротивлению материала. Данный параметр может быть назначен пользователем в соответствующем поле диалога «Алюминиевые конструктивные элементы», а также принят по таблицам [3] при нажатии кнопки, расположенной справа от поля ввода значения коэффициента условий работы. При нажатии вышеуказанной кнопки, открывается диалог «Коэффициент условий работы», в котором пользователю необходимо выбрать требуемые значения, соответствующие [3].

#### *Предельная гибкость*

В поле «Предельная гибкость» задаются предельные значения гибкости рассчитываемых сжатых и растянутых элементов. Указанные параметры могут быть назначены пользователем в соответствующем поле ввода, а также выбраны по таблицам [3] при нажатии кнопок, расположенных справа от поля ввода значения предельной

гибкости. При нажатии вышеуказанных кнопок, открывается диалог «Предельные гибкости», в котором пользователю необходимо выбрать требуемые значения, в соответствии с [3], для сжатых и растянутых алюминиевых элементов.

При активации флажка «Учитывать гибкость при подборе сечения», указанные пользователем значения предельных гибкостей при сжатии и растяжении учитываются при подборе поперечного сечения, удовлетворяющего критериям [3].

#### *Классическая проверка поперечных сечений*

Активация флажка «Проверка прочности и устойчивости классическими методами» позволяет выполнить расчёт на прочность и устойчивость в соответствии с известными подходами сопротивления материалов. Проверка прочности и устойчивости при активном флажке «Проверка прочности и устойчивости классическими методами» в соответствии с [3] не выполняется.

#### *Расчёт по подбору сечений конструктивных элементов*

При выполнении расчёта алюминиевых конструктивных элементов, при неактивном состоянии флажка «Подбирать сечение», программа выполняет проверочный расчёт назначенных пользователем поперечных сечений.

Для корректной проверки удовлетворения поперечного определённым критериям [3], при расчёте конструктивных элементов необходимо указать тип поперечного сечения. В случае, если сечение назначено пользователем из библиотеки сечений (базы данных программы), то тип сечения в соответствующем поле диалогового окна «Алюминиевые конструктивные элементы» назначается автоматически.

Выполнение проектировочного расчёта – подбор поперечных сечений, на основании рассчитанных силовых факторов, требует активации флажка «Подбирать сечение». При этом необходимо указать путь к библиотеке, из которой необходимо осуществить подбор поперечного сечения элемента.

#### *Нагрузки на конструктивные элементы*

При выполнении расчётов алюминиевых конструктивных элементов в поле «Нагрузки» необходимо указать нагрузки, в соответствии с которыми требуется выполнить расчёт. Установкой флажка пользователь указывает необходимость выполнения расчёта конструктивных элементов на основании результатов РСУ (расчётные сочетания усилий) или на основании выбранного в выпадающем списке нагружения.

## **Параметры диалога алюминиевых элементов**

Представлено общее описание дополнительных интерфейсных функций диалога «Алюминиевые конструктивные элементы», использование которых может упростить процесс работы при выполнении соответствующих расчётов и анализе полученных результатов.

### ***Фильтры списка конструктивных элементов***

Фильтры списка алюминиевых конструктивных элементов расположены в окне «Алюминиевые конструктивные элементы» непосредственно под списком конструктивных элементов. Фильтры применяются для изменения параметров отображения списка алюминиевых элементов при задании свойств и в процессе их редактирования. Описание функций, которые выполняют фильтры, доступны непосредственно в диалоге алюминиевых конструктивных элементов при наведении на них курсора.

### ***Общие примечания***

В случае необходимости внесения изменений в ранее назначенные параметры, необходимо выделить требуемый конструктивный элемент (несколько элементов), открыть диалог «Алюминиевые конструктивные элементы». После открытия в списке конструктивных элементов, выделенными будут элементы, выбранные в модели перед открытием диалога. Для выделенных конструктивных элементов необходимо назначить требуемые параметры и после завершения внесения изменений нажать кнопку «Применить». В случае, если внесённые изменения необходимо применить для всех конструктивных элементов, то после завершения редактирования свойств необходимо нажать кнопку «Применить для всех».

В случае, если требуется выполнить расчёт определённых выделенных конструктивных элементов, их необходимо выбрать в списке и после назначения параметров нажать кнопку «Расчёт». Для выполнения расчёта всех конструктивных элементов необходимо нажать кнопку «Расчёт для всех».

Для назначения элементам рассчитываемой конструкции подобранных по результатам расчёта поперечных сечений служит кнопка «Заменить сечение» в диалоговом окне «Алюминиевые конструктивные элементы». Возврат к исходным поперечным сечениям необходимо выделить соответствующие конструктивные элементы и нажать кнопку «Вернуть сечение».

## **Результаты расчёта алюминиевых элементов**

Результаты расчёта алюминиевых конструктивных элементов могут быть представлены как в графическом, так и в табличном виде. Графический способ представления, как правило, используется для оценки работоспособности конструкции в целом или её отдельных элементов, тогда как табличная форма представления позволяет более детально оценить результаты расчёта отдельных конструктивных элементов с последующим получением информации о коэффициентах использования поперечных сечений при выполнении расчётов.

Под коэффициентом использования понимается отношение рассчитанного фактора к его предельному значению, определяемому согласно [3].

### ***Графическое представление результатов***

Графическое представление результатов доступно после выполнения соответствующих вычислений в диалоге «Алюминиевые конструктивные элементы».

Отображение результатов расчёта конструктивных элементов выполняется в меню «Результаты» → «Карта результатов». В появившемся окне в выпадающем списке «Тип расчёта» указываются требуемые результаты, которые должны быть представлены в графическом виде, на основании выполненного расчёта. Далее в выпадающем списке «Тип результатов» указываются критерии, которые необходимо отобразить в виде карты для выбранного типа расчёта.

На карте результатов для стержневых элементов отображаются максимальные значения коэффициента использования сечения конструктивного элемента, а также при необходимости пользователь имеет возможность в выпадающем списке указать необходимые для отображения значения коэффициентов использования, вычисленные для каждого из возможных критериев отдельно.

### ***Табличное представление результатов***

Табличное представление результатов расчёта алюминиевых конструктивных элементов, как правило, используется для более детального анализа работы рассчитываемых поперечных сечений. Функционал доступен в диалоге «Алюминиевые конструктивные элементы» после выполнения соответствующих расчётов, и представлен в нижней части вышеназванного диалога в поле «Результаты».

После выполнения расчёта, в таблице в нижней части диалогового окна «Алюминиевые конструктивные элементы» для выделенного конструктивного элемента в списке будут приведены значения коэффициентов использования поперечных сечений для всех критериев в соответствии с [3].

## Расчётные комбинации загружений

### **Общие сведения**

Конструкции зданий и сооружений на этапе возведения и в процессе эксплуатации могут испытывать многообразный спектр внешних воздействий, включающих постоянные, временные и особые нагрузки. Корректное выполнение расчётов на соответствие поперечных сечений требованиям нормативных документов, а также расчётов на прочность узловых соединений требует определения наиболее неблагоприятных для проверяемого критерия значений внутренних силовых факторов от действия внешних нагрузок.

В тех случаях, когда конструкции зданий и сооружений должны быть рассчитаны на широкий спектр внешних нагрузок, включающих знакопеременные, взаимоисключающие, сопутствующие внешние кратковременные или длительные воздействия, процесс определения наиболее неблагоприятных для конструкции значений силовых факторов может оказаться весьма трудоёмким. Применение функционала «Расчётные комбинации загружений» в значительной степени упрощает соответствующие расчёты по определению наиболее неблагоприятных значений внутренних силовых факторов, используемых при проверке критерием, предъявляемых к конструкциям нормативными документами.

### **Назначение параметров расчёта**

#### ***Нормативные документы***

Основным параметром, требующим назначения для использования функционала «Расчётные комбинации загружений» является нормативный документ, в соответствии с которым выполняется расчёт по определению наиболее неблагоприятных значений силовых факторов.

Соответствующие настройки задаются на панели параметров расчёта, которая открывается нажатием вкладки «Расчёты» → «Панель параметров расчёта». В появившейся панели необходимо выбрать пункт «PCY» и настроить необходимые параметры: нормативный документ, в соответствии с которым вычисляются расчётные сочетания усилий.

#### ***Предварительные настройки***

Наиболее корректное выполнение расчётов по определению PCY (расчётных сочетаний усилий), гарантирующее экстремальные значения внутренних усилий и напряжений, реализуется в том случае, если пользователем предварительно назначены конструктивные элементы. Как правило, материал конструкций при выполнении

расчётов известен заранее, поэтому, прежде чем приступать к назначению параметров в диалоге «Расчётные комбинации загружений» необходимо назначить конечным элементам свойства конструктивных. В таком случае, полученные по результатам расчёта РСУ значения усилий и напряжений гарантируют экстремальные значения критериев, предъявляемых к конструкциям соответствующими нормативными документами.

В случае, если материал конструкций неизвестен заранее или его требуется определить, назначение конструктивных элементов перед выполнением расчёта РСУ можно не выполнять. При этом, полученные по результатам расчёта РСУ значения внутренних силовых факторов и напряжений будут рассчитаны как для случая назначения стальных конструктивных элементов.

Перед назначением параметров в диалоге «Расчётные комбинации загружений» должен быть выполнен статический расчёт исследуемой конструкции на все загрузки, участвующие в последующем формировании РСУ.

#### **Диалог «Расчётные комбинации загружений»**

После выполнения статического расчёта по выбранным загрузкам, а также после назначения конструктивных элементов, необходимо перейти в диалог «Расчётные комбинации загружений» для назначения параметров расчёта («Расчёты» → «Расчётные комбинации загружений»).

#### ***Общие параметры***

В поле «Тип сочетания» назначается тип расчёта, который необходимо выполнить. При активном типе сочетания «РСУ» по результатам расчёта в диалоге «Таблица загружений для вычисления РСУ» выполняется вычисление внутренних силовых факторов; для типа сочетания «РСН» – формируются комбинации нагрузок.

В выпадающем списке «Уровень ответственности» пользователю необходимо назначить уровень ответственности рассчитываемого здания или сооружения на основании действующих нормативных документов или ввести пользовательское значение в соответствующее поле ввода.

Расчёты по определению РСУ и РСН могут быть выполнены для двух групп предельных состояний. При расчёте по первой группе предельных состояний учитываются расчётные значения внутренних силовых факторов (или нагрузок при вычислении РСН), по второй группе предельных состояний – нормативные значения. Для получения результатов по двум группам предельных состояний, соответствующие расчёты необходимо выполнить последовательно, то есть на начальном этапе



выполнить, например, расчёт по первой группе, а затем по второй группе предельных состояний.

### ***Параметры загрузки***

В данной области диалогового окна «Таблица загрузений для вычисления РСУ» пользователю необходимо назначить соответствие каждой из заданных нагрузок определённому типу в соответствии с [4]. Все заданные пользователем загрузки отображаются в таблице в нижней части диалогового окна. Для каждой из приведённых в списке нагрузок необходимо назначить тип загрузки, вид нагрузки, коэффициент надёжности по нагрузке, а также указать является ли заданная в общей модели нагрузка нормативной или расчётной. В случае выполнения расчёта по РСН возникает необходимость указания степени влияния той или иной нагрузки.

Для назначения требуемых параметров необходимо выбрать нагрузку в списке, затем последовательно назначить из выпадающих списков тип загрузки и вид нагрузки. В выпадающих списках «Тип загрузки» и «Вид нагрузки» приводятся параметры, соответствующие классификации нагрузок, приведённой в [4]. Для каждого из представленных видов нагрузки, автоматически присваивается коэффициент надёжности по нагрузке (за исключением пользовательского значения, которое необходимо задать в поле ввода «Кэф. надёжности по нагрузке»).

После назначения требуемых параметров заданной нагрузки в соответствии с классификацией [4] (или используя пользовательские значения) необходимо нажать кнопку «Изменить» для того, чтобы выбранные параметры были присвоены соответствующей нагрузке.

### ***Группы***

Функция «Группы» служит для назначения групп взаимоисключающих, сопутствующих и одновременно действующих загрузений. Для активации соответствующей настройки необходимо нажать кнопку «Группы», после чего в нижней части диалогового окна «Таблица загрузений для вычисления РСУ» появляется таблица, в которой будут отображаться заданные пользователем группы.

Для создания группы загрузений, которые будут включены в РСУ (или РСН) по специальным правилам необходимо нажать кнопку «Создать». После нажатия открывается диалоговое окно «Новая группа». Пользователю требуется выбрать загрузки, представленные в списке в левой части диалогового окна и перенести в список в правой части окна («Состав группы») нажатием кнопки «→». Далее необходимо с помощью переключателя выбрать тип связи (правила взаимодействия выбранных

нагрузок при формировании РСУ или РСН). Для добавления группы необходимо нажать кнопку «Добавить группу». Соответствующая группа появляется в списке групп в нижней части диалогового окна «Таблица загружений для вычисления РСУ».

### ***Прочие параметры диалога***

#### ***Учёт сейсмической нагрузки***

Для учёта требований нормативных документов при выполнении расчётов РСУ или РСН, учитывающих сейсмическое воздействие, необходимо установкой флажка активировать «Расчёт особых сочетаний нагрузок по п.5.1 СП 14.13330.2014».

#### ***Нормативная и расчётная нагрузка***

При задании внешних нагрузок в модели пользователь может назначать как расчётные, так и нормативные значения внешних нагрузок, что необходимо учитывать при настройке параметров расчёта РСУ или РСН. Соответствующая настройка выполняется установкой флажка «Нормативная нагрузка» при назначении параметров нагрузки.

В случае назначения в модели нормативного значения нагрузки на конструкции, в диалоге «Таблица загружений для вычисления РСУ» для соответствующей нагрузки необходимо установить флажок «Нормативная нагрузка». В таком случае, при формировании РСУ или РСН по первой группе предельных состояний заданная пользователем нагрузка будет умножена на коэффициент надёжности по нагрузке. В противном случае, если в модели заданы расчётные значения нагрузок, в диалоговом окне «Таблица загружений для вычисления РСУ» флажок «Нормативная нагрузка» устанавливать не следует.

### ***Особенности реализации***

При выполнении расчётов по определению РСУ или РСН используются изложенные ниже основные правила:

- особое сочетание может содержать только одно из особых загружений;
- в одно сочетание может входить только одно из ветровых загружений;
- загрузки, входящие в группы, участвуют в формировании сочетаний с учётом правил, назначенных для каждой из групп;
- знакопеременной возможно задать только особую нагрузку.

### ***Графическое представление результатов***

Графическое представление результатов доступно после выполнения соответствующих вычислений в диалоге «Таблица загружений для вычисления РСУ».

Отображение результатов расчёта элементов выполняется в меню «Результаты» → «Карта результатов». В появившемся окне в выпадающем списке «Тип расчёта» указываются требуемые результаты, которые должны быть представлены в графическом виде, на основании выполненного расчёта. В выпадающем списке «Значения» пользователю необходимо указать какие значения РСУ или РСН необходимо отобразить в виде карты. В соответствующем выпадающем списке могут быть отображены алгебраически минимальные, максимальные значения силовых факторов и напряжений, а также максимальные по модулю значения.

Далее в выпадающем списке «Тип результатов» указываются критерии, которые необходимо отобразить в виде карты.

#### ***Табличное представление результатов***

Табличное представление результатов расчёта РСУ или РСН, как правило, используется для более детального анализа работы рассчитываемых поперечных сечений. Функционал доступен в диалоге «Результаты РСУ» («Результаты» → «Результаты РСУ»).

#### **Список литературы по конструктивным элементам**

1 СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции. Актуализированная редакция. СНиП II-23-81\*». – М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2017. – 142с.

2 СП 63.13330.2012 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». – М.: Министерство регионального развития Российской Федерации, 2012. – 156с.

3 СП 128.13330.2016 «СНиП 2.03.06-85 Аллюминиевые конструкции». – М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2016. – 80с.

4 СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция. СНиП 2.01.07-85\*». – М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2016. – 82с.

5 СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01.-83\*». – М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2016. – 225с.

## Глава 10. Результаты

В этой главе дается краткое описание результатов всех типов расчета, проводимых в APM Structure3D.

### Результаты статического расчета

- Результатом статического расчета конструкции являются:
- Перемещения узлов конструкции (линейные и угловые)
- Нагрузки на концах стержней, в узлах пластин и объёмных элементов
- Эпюры силовых факторов для стержней на всей конструкции
- Напряжения, действующие в стержнях, пластинах и объёмных элементах
- Распределение напряжений в произвольном сечении стержня
- Расчетные параметры, характерные для отдельной балки, такие как: моменты изгиба, кручения, поперечные и осевые силы, углы изгиба, закручивания, деформации и напряжения по длине балки. Все эти параметры, представленные в форме графиков, выводятся в системе координат стержня. В системе можно просмотреть величины как относительных перемещений (перемещения относительно линии, соединяющей два деформированных конца стержня) так и величины полной деформации. В случае, когда конструкция состоит из единственной балки, графики перемещений значения абсолютных и относительных перемещений совпадают.
- Реакции (силы и моменты), действующие в опорах конструкции
- Масса всей конструкции

### **Перемещения узлов конструкции, нагрузки на концах стержней, в узлах пластин и объёмных элементов**

Узловые перемещения и нагрузки на концах стержней, в узлах пластин и объёмных элементов выводятся в виде таблицы.

Значения перемещений показаны в глобальной системе координат, а нагрузки в узлах в системе координат элемента (стержня или пластины). Для объёмных элементов и перемещения и нагрузки показываются в глобальной системе координат. Для просмотра этих результатов выберите пункт меню Результаты | Нагрузки.

В верхнем окне текущий элемент выделяется цветом. Чтобы посмотреть требуемый элемент, вы можете выбрать его в верхней части окна или списке Элементы в нижней части. Нажав кнопку Показать графики, пользователь может посмотреть расчетные параметры балки по ее длине.

Эта команда вызывает на экран окно диалога Графики. Диалог содержит кнопки, нажав которые, Вы можете посмотреть соответствующие графики. Если флаг Показывать полное перемещение отмечен, то строятся графики полного перемещения (выбранного стержня совместно с остальной частью конструкции), если нет то только перемещение участков стержня относительно линии, соединяющей два деформированных конца (т.е. без учета перемещений концов).

### Эпюры силовых факторов для всей конструкции

Эпюры силовых факторов для всей конструкции строятся с помощью команды Результаты | Силовые факторы в элементе. В окне выводятся эпюры для элементов из включенных слоев, если элемент находится в выключенном слое, то для него эпюра не строится. Отдельно для каждого стержня эти эпюры можно посмотреть в меню Результаты | Нагрузки.

Эпюры в элементе отображаются в виде цветной карты результатов. На карте результатов возможна простановка выносок с помощью команды Выноска панели инструментов Карта результатов. Ниже показан пример окна с эпюрами на стержнях.

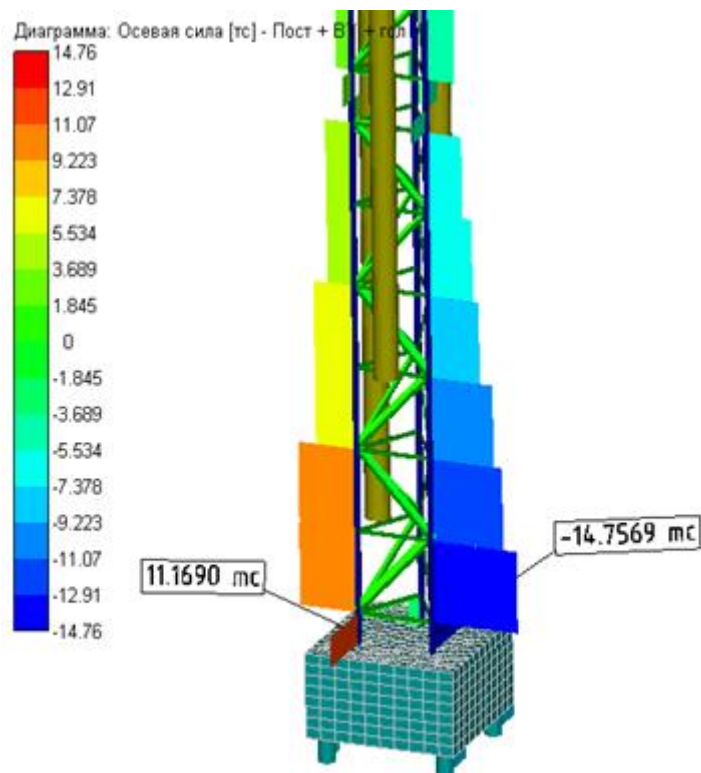


Рисунок 10.1 – Показ эпюр силовых факторов (осевой силы) на стержнях

### Карта распределения результатов в стержнях, пластинах и объёмных элементах (обычная)

Такие результаты расчёта как напряжения, перемещения, усилия, коэффициент запаса и др. в стержнях, пластинах и объёмных элементах могут выводиться в виде карты результатов. Карта результатов конструкции представляет собой трехмерную конструкцию, окрашенную в цвета, в соответствии со значениями выбранного компонента результатов на поверхности. Величина перемещений при этом показывается для наглядности в увеличенном масштабе. Для просмотра карты результатов выберите пункт меню Результаты | Карта результатов.

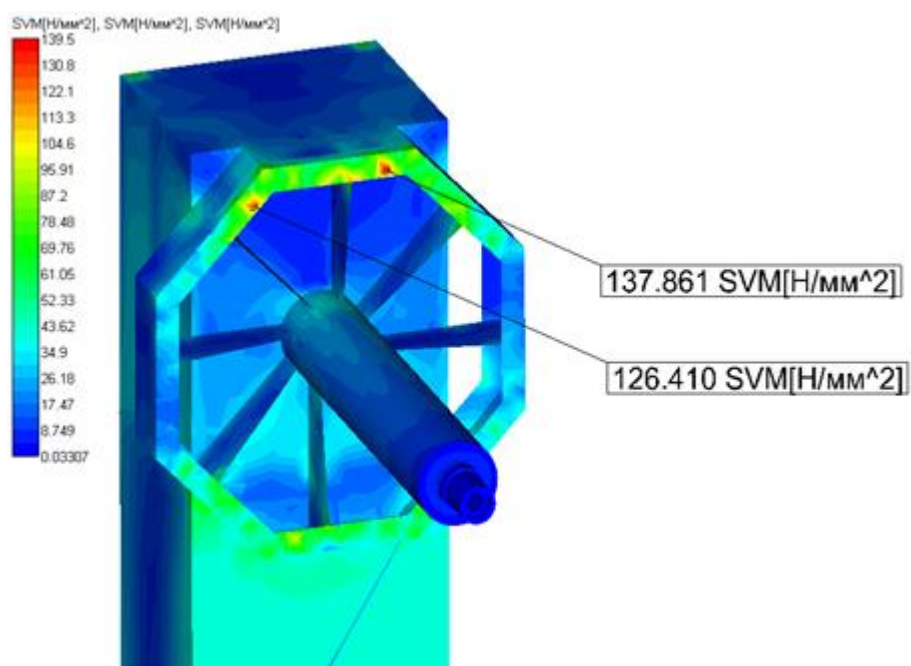


Рисунок 10.2 – Карта результатов (напряжений)

Карту распределения напряжений в стержнях можно посмотреть, как на проволочной модели, так и на объёмной модели стержня с учётом реальных размеров сечения. Переключение режимов показа осуществляется с помощью кнопок на панели фильтров вида: Стержни Проволочные, Стержни Проволочные Сечения и Стержни Объёмные Сечения.

В том случае, если на карте напряжений стержни показываются в объёмном виде, сама карта напряжений для стержневой части конструкции строится только на НЕДЕФОРМИРОВАННОЙ конструкции.

### Карта распределения результатов в стержнях, пластинах и объёмных элементах (альтернативная)

Такие результаты расчёта как напряжения, перемещения, усилия, коэффициент запаса и др. в стержнях, пластинах и объёмных элементах могут выводиться в виде

альтернативной карты результатов. Для показа данной карты следует в меню Файл | Настройки установить птичку в опции Альтернативная карта результатов.

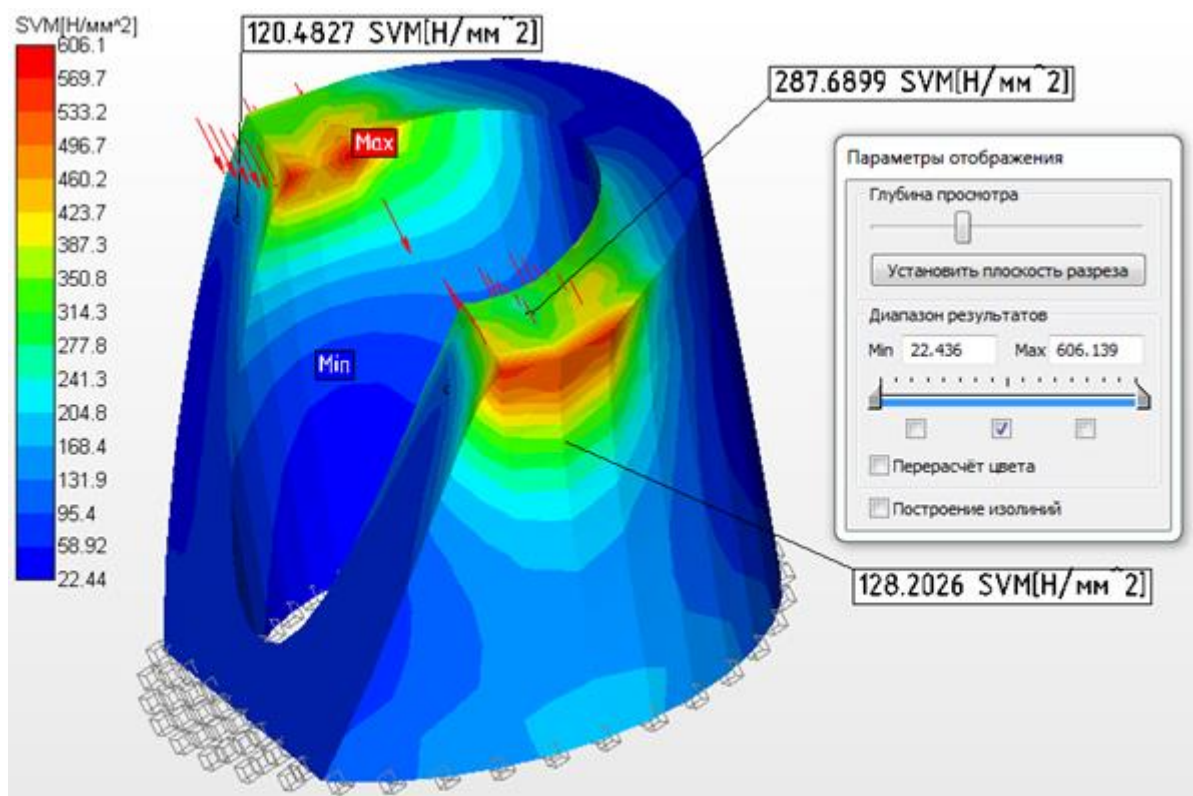


Рисунок 10.3 – Показ напряжений на альтернативной карте результатов

После открытия альтернативной карты результатов в окне появляется дополнительное окно Параметры отображения (см. рисунок 10.3), в котором пользователь имеет возможность настроить вид альтернативной карты результатов.

Движок Глубина просмотра позволяет срезать часть карты результатов в направлении, совпадающем с плоскостью экрана. На рисунке 10.3 после среза части модели, сама модель была повернута. Кнопка Установить плоскость разреза устанавливает глубину разреза в соответствии с текущим положением движка, но плоскостью разреза становится плоскость параллельная плоскости экрана.

С помощью полей ввода Min Max или двух ограничителей диапазона результатов пользователь имеет возможность оставить для просмотра только определенную часть карты результатов, погасив ту часть, которая выходит на заданный диапазон (рисунок 10.4)

На рисунке 10.4 показана только та часть карты результатов, которая лежит в заданном диапазоне. Для наглядности движок глубины просмотра вернули в начальное состояние.

Весь диапазон результатов при смещении движков разделился теперь на три части:

- От начала диапазона до левого движка,
- Между движками,
- От правого движка до конца диапазона.

Непосредственно под движками имеются три переключателя, в которых пользователь может устанавливать флажки. Эти три флажка включают/выключают показ каждого из перечисленных выше диапазонов результатов.

Флажок в опции Пересчет цвета позволяет изменить цветовую шкалу, чтобы на ней показывался не полный диапазон, а только тот диапазон результатов, показ которого в данный момент включен на альтернативной карте результатов.

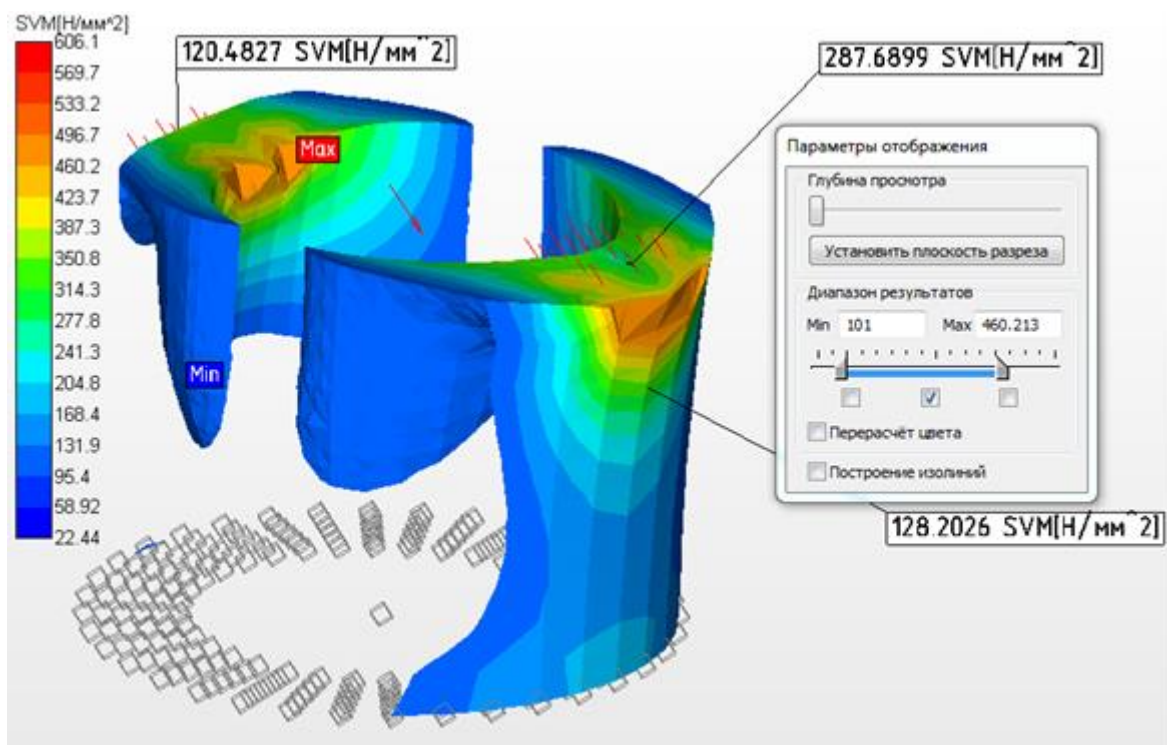


Рисунок 10.4 – Показ части карты напряжений с выбранным диапазоном на альтернативной карте результатов



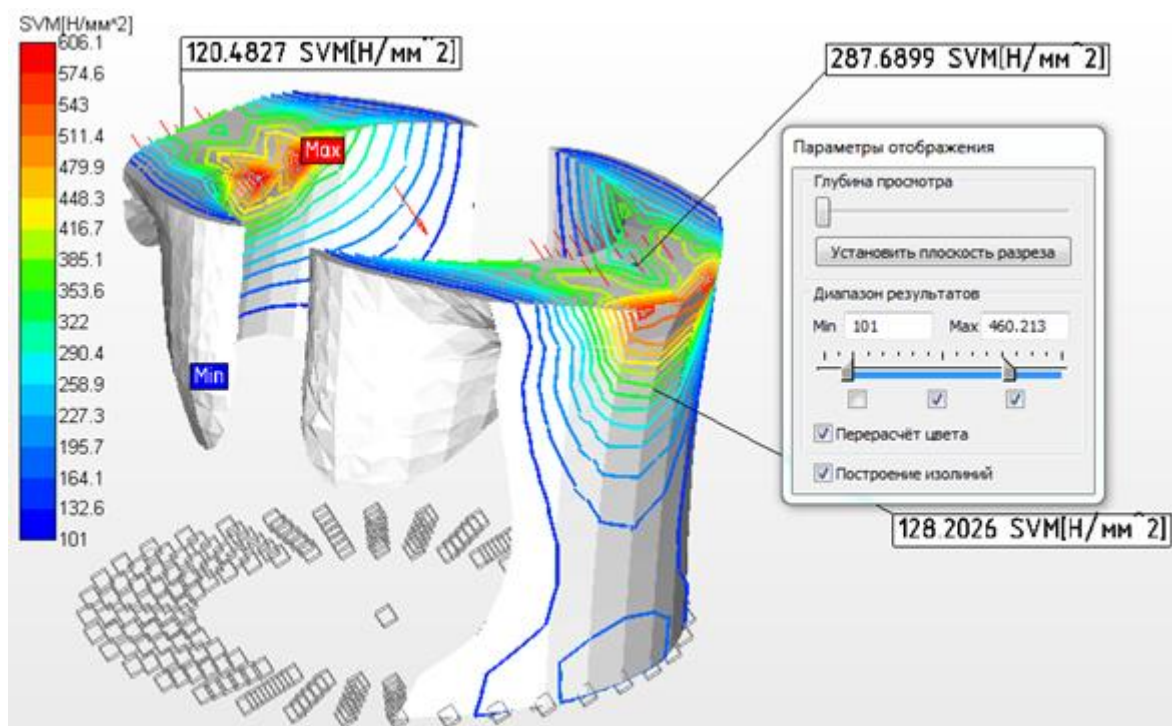


Рисунок 10.5 – Показ части карты напряжений с помощью изолиний на альтернативной карте результатов

При установке птички в опции Построение изолиний на показываемой части карты результатов будут с помощью линий цвета обозначены границы перехода от одного цветового тона на шкале результатов к другому. По умолчанию карта результатов отрисовывается с числом изоуровней равным 16, и поэтому во всем диапазоне карты результатов число изолиний будет также равно 16-и.

### Результаты расчета топологической оптимизации

Основным результатом расчета "Топологическая оптимизация" является распределение объемных долей по элементам.

Для просмотра карт результатов топологической оптимизации в окне "Параметры вывода результатов" (Результаты | Карта результатов) и в поле "Тип расчета" выбираем "Топологическая оптимизация", а в выпадающем списке "Тип результата" выбираем "Объемная доля".

Если был включен параметр "Сохранять каждую ... итерацию в процессе расчёта" (более подробно см. в главе 3 "Описание команд" в разделе "Параметры расчета" для топологической оптимизации) и сохранён хотя бы один промежуточный результат, то на вкладке "Статика", из выпадающего списка "Итерация" необходимо выбрать номер итерации, на которой вас интересует распределение объемных долей (оптимальное распределение сохраняется на последней итерации).

Для анимирования истории оптимизации необходимо перейти на вкладку "Анимация" и выбрать диапазон итераций.

Если же промежуточные результаты не были сохранены, то для просмотра доступна только карта с оптимальным распределением объемных долей.

Целью расчета "Топологическая оптимизация" является создание новой сеточной структуры модели, в которой материал будет располагаться в определённых местах. Для дальнейшей обработки модели, после оптимизации каждому элементу присваивается значение объемной доли, которое можно посмотреть в диалоге "Объемная доля" (Инструменты | Операции с сеткой | Объемная доля).

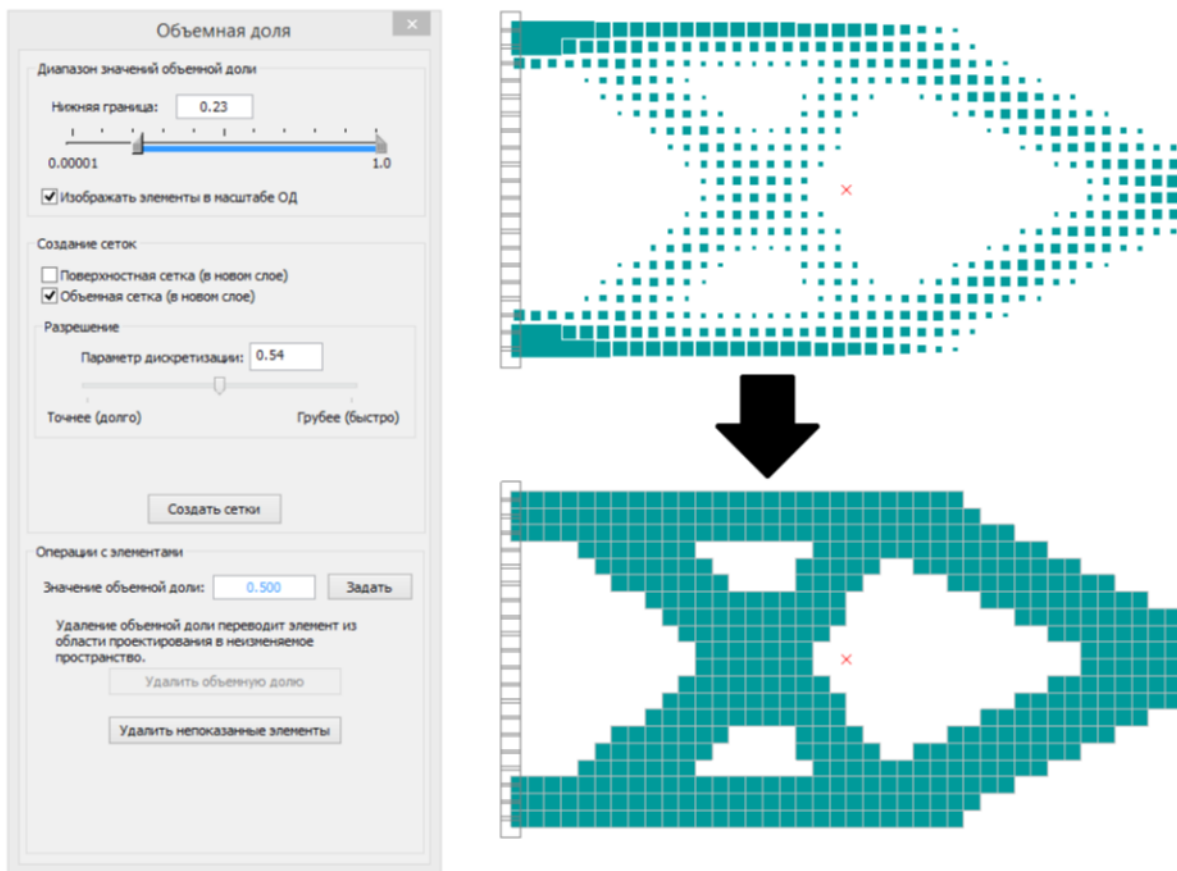


Рисунок 10.6 – Показ распределения объемной доли в конструкции через окно Объемная доля. Сверху – отображение элементов в масштабе объемной доли, снизу – без масштаба объемной доли

На рисунке 10.6 в верхней части показана оптимизированная конструкция, в которой установлена птичка в опции Изображать элементы в масштабе ОД – размеры конечных элементов отображены пропорционально их объемной доле, полученной в результате расчета топологической оптимизации. Нижняя граница отображения объемной доли устанавливается с помощью верхнего движка Диапазон значений объемной доли (рисунок 10.6).

Если птичка в опции Изображать элементы в масштабе ОД не стоит, то в зависимости от положения движка Диапазон значений объемной доли будут показаны элементы, которые должны быть оставлены в модели после Топологической оптимизации.

Поле Параметр дискретизации определяет размер конечных элементов в сгенерированной сетке (сетках). При малых значениях параметра пространственная конфигурация сетки наиболее полно отразит результат расчета, однако мелкий размер элементов и большое количество элементов могут затруднить расчет. При высоких значениях параметра сетка будет состоять из более крупных элементов, создающих более грубое приближение результата оптимизированной конструкции, однако само построение такой сетки и последующие расчеты выполняются значительно (на 1-2 порядка) быстрее, чем при мелкой сетке.

Новая КЭ сетка из 4-х узловых тетраэдрических элементов может быть создана в новых слоях после нажатия кнопки Создать сетки. Результат создания более мелкой сетки оптимизированной структуры в новом слое показан на рисунке 10.7. Окно Объемная доля, с параметрами, при которых генерировалась новая сетка, показано слева.

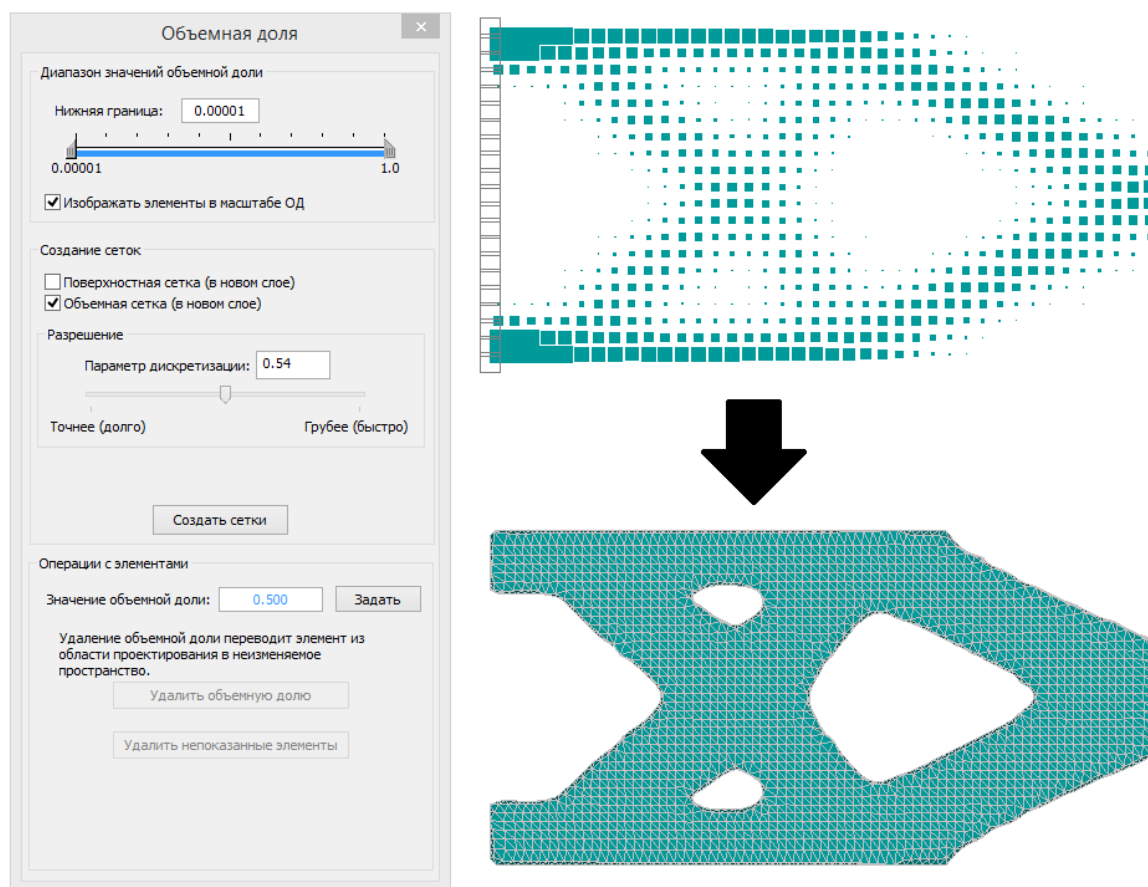


Рисунок 10.7 – Показ результата создания новой сеточной оптимизированной структуры с более мелким шагом по сравнению с исходной

### **Карта распределения напряжений в сечении стержня**

Пользователь может посмотреть распределение напряжений в произвольном сечении стержня. Для этого выберите пункт меню Результаты / Напряжение в сечении, который доступен при просмотре карты напряжений конструкции. Редактор переключится в режим просмотра напряжений в сечении. Подведите курсор к требуемому участку балки (на недеформированной конструкции) и щелкните левой кнопкой. В результате на экране появится окно, показывающее карту напряжений в выбранном сечении.

Выбор типа напряжений для просмотра в сечении будет определяться той картой напряжений, которая была открыта и на которой выбирался стержень для просмотра.

### **Реакции в опорах**

Реакции в опорах выводятся в глобальной системе координат в виде таблицы с помощью команды Результаты | Реакции в опорах. Выбранный узел (или группа узлов) в таблице выделяется цветом в окнах редактора конструкций. Нажав на заголовок столбца таблицы можно отсортировать опоры в порядке возрастания/убывания реакции в выбранном столбце таблицы.

Показ векторов реакций – отображение вектора и значения реакции для выбранной в таблице опоры или группы опор.

Фильтры – позволяют вкл./выкл. отображение опор по отдельным направлениям ГСК и односторонних опор.

Кнопка «Еще...» вызывает диалоговое окно с информацией о центре тяжести, суммарных реакциях в опорах, моменте относительно центра масс и абсолютных значениях реакции и момента.

### **Срез композита**

С помощью данной команды возможно посмотреть напряжения и деформации в поперечном сечении выбранной композитной пластины. Предварительно необходимо открыть любую карту результатов и после этого в меню Результаты выбираем Срез композита и затем следует выбрать пластину щелчком ЛКМ для просмотра результатов в ее сечении. После этого откроется диалоговое окно Сечение композита.

В окне Список пластин выбранная нами пластина выделена, но можно выбрать любую другую пластины для просмотра напряжений и деформации в ее сечении.

Из выпадающего списка Параметр отображения выбирается, что именно для данной пластины, Напряжения или Деформации мы хотим просмотреть.

Выбранный параметр можно посмотреть по Расчетному направлению: По ЛСК пластины или в Направлении укладки.

Далее после выбора Узла пластины (из выпадающего списка) нажимаем кнопку Показать графики.

### Расход...

Команда выводит сводную таблицу расхода профилей стержневых элементов модели или пластинчатых конечных элементов.

### Результаты расчета РСУ...

Команда выводит таблицу результатов расчета РСУ согласно рисунку 10.8.

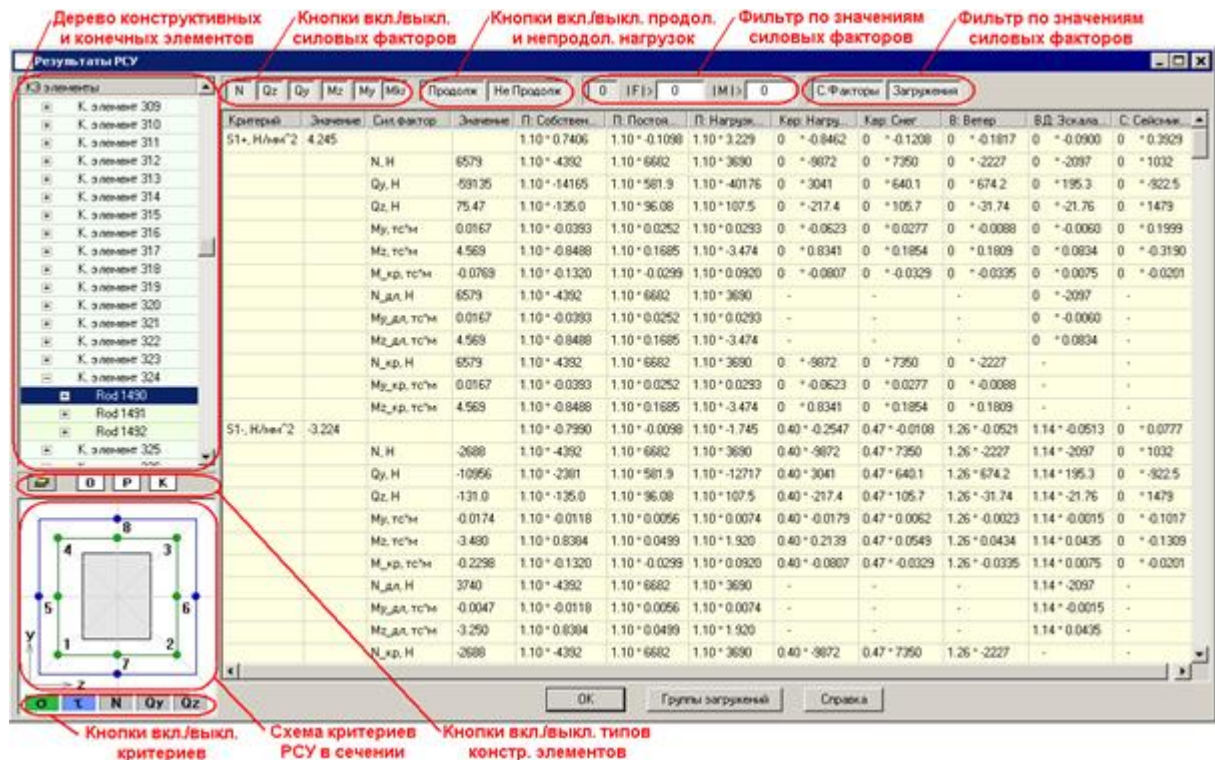


Рисунок 10.8 – Таблица результатов расчета РСУ для стержня

### Стержни

В расчете РСУ определяются экстремальные значения нормальных и касательных напряжений в характерных точках сечения.

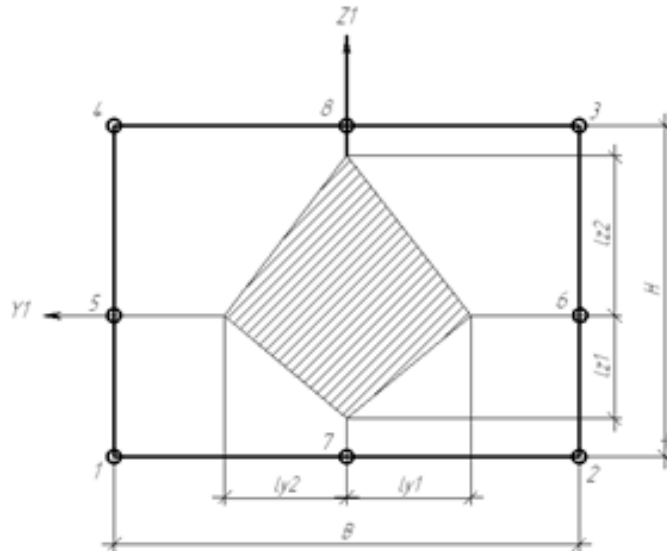


Рисунок 10.9 – Прямоугольник, ограничивающий габариты произвольного сечения.

Для нормальных напряжений:

$$\sigma_i = \frac{N}{F} \pm \frac{M_y \cdot z_i}{I_y} \pm \frac{M_z \cdot y_i}{I_z}$$

где  $i$  – точка сечения стержня ( $i = 1 \dots 8$ )

При  $y = \pm b/2$  и  $z = \pm h/2$  формула примет вид:

$$\sigma_i F = N \pm \frac{M_y}{I_{z,j}} \pm \frac{M_z}{I_{y,j}}$$

Для касательных напряжений:

$$\tau_y F = \frac{Q_y}{2} \pm \frac{M_{ip}}{2 \cdot (I_{y1} + I_{y2})}$$

$$\tau_z F = \frac{Q_z}{2} \pm \frac{M_{ip}}{2 \cdot (I_{z1} + I_{z2})}$$

Таблица 10.1 – Обозначение критериев РСУ для стержней

Обозначение в таблице результатов РСУ	Обозначения в формулах	Обозначение в таблице результатов РСУ	Обозначения в формулах
S1+	$\sigma_{1+}$	T5+	$\tau_{5+}$
S2+	$\sigma_{2+}$	T6+	$\tau_{6+}$
S3+	$\sigma_{3+}$	T7+	$\tau_{7+}$
S4+	$\sigma_{4+}$	T8+	$\tau_{8+}$
S5+	$\sigma_{5+}$	T5-	$\tau_{5-}$

S6+	$\sigma_{6+}$	T6-	$\tau_{6-}$
S7+	$\sigma_{7+}$	T7-	$\tau_{7-}$
S8+	$\sigma_{8+}$	T8-	$\tau_{8-}$
S1-	$\sigma_{1-}$	N+	$N^+$
S2-	$\sigma_{2-}$	N-	$N^-$
S3-	$\sigma_{3-}$	Qy+	$Q_{y+}$
S4-	$\sigma_{4-}$	Qy-	$Q_{y-}$
S5-	$\sigma_{5-}$	Qz+	$Q_{z+}$
S6-	$\sigma_{6-}$	Qz-	$Q_{z-}$
S7-	$\sigma_{7-}$		
S8-	$\sigma_{8-}$		

### Пластины

Напряжения вычисляются на верхней и нижней поверхностях с учетом изгибающих усилий по следующим зависимостям:

$$\sigma_x^{H(B)} = N_x \pm \frac{6 \cdot M_x}{h^2}, \quad \sigma_y^{H(B)} = N_y \pm \frac{6 \cdot M_y}{h^2}, \quad \tau^{H(B)} = T_{xy} \pm \frac{6 \cdot M_{xy}}{h^2}$$

где  $h$  – толщина пластины, В и Н – индексы, соответствующие верхней и нижней поверхностям пластины. Угол изменяется с шагом  $\alpha = 22,5^\circ$ .

Таблица 10.2 – Обозначение критериев РСУ для пластин

Угол, град.	Обозначение в таблице результатов РСУ	Обозначения в формулах	Обозначение в таблице результатов РСУ	Обозначения в формулах
90	Sh90+	$\sigma_+^B$	S190+	$\sigma_+^H$
90	Sh90-	$\sigma_-^B$	S1h90-	$\sigma_-^H$
67,5	Sh67_5+	$\sigma_+^B$	S167_5+	$\sigma_+^H$
67,5	Sh67_5-	$\sigma_-^B$	S167_5-	$\sigma_-^H$
45	Sh45+	$\sigma_+^B$	S145+	$\sigma_+^H$
45	Sh45-	$\sigma_-^B$	S145-	$\sigma_-^H$
22,5	Sh22_5+	$\sigma_+^B$	S122_5+	$\sigma_+^H$
22,5	Sh22_5-	$\sigma_-^B$	S122_5-	$\sigma_-^H$
0	Sh0+	$\sigma_+^B$	S10+	$\sigma_+^H$

0	Sh0-	$\sigma_-^B$	SI0-	$\sigma_-^H$
-22,5	Sh_22_5+	$\sigma_+^B$	SI_22_5+	$\sigma_+^H$
-22,5	Sh_22_5-	$\sigma_-^B$	SI_22_5-	$\sigma_-^H$
-45	Sh_45+	$\sigma_+^B$	SI_45+	$\sigma_+^H$
-45	Sh_45-	$\sigma_-^B$	SI_45-	$\sigma_-^H$
-67,5	Sh_67_5+	$\sigma_+^B$	SI_67_5+	$\sigma_+^H$
-67,5	Sh_67_5-	$\sigma_-^B$	SI_67_5-	$\sigma_-^H$
90	Th90+	$\tau_+^B$	T190+	$\tau_+^H$
90	Th90-	$\tau_-^B$	T190-	$\tau_-^H$
45	Th45+	$\tau_+^B$	T145+	$\tau_+^H$
45	Th45-	$\tau_-^B$	T145-	$\tau_-^H$
0	Th0+	$\tau_+^B$	T10+	$\tau_+^H$
0	Th0-	$\tau_-^B$	T10-	$\tau_-^H$
—	Qx+	$Q_{x+}$	Qy+	$Q_{y+}$
—	Qx-	$Q_{x-}$	Qy-	$Q_{y-}$

## Результаты расчета на устойчивость

В 15 версии был сделан вывод результатов расчета устойчивости через Карту результатов и окно Параметры вывода результатов. Но также был оставлен и старый механизм просмотра результатов расчета устойчивости.

Результатом расчета на устойчивость являются:

- Коэффициенты запаса устойчивости конструкции.
- Формы потери устойчивости конструкции.

Команда Результаты | Устойчивость выводит таблицу с коэффициентами запаса устойчивости. Для просмотра форм потери устойчивости выберите строчку в таблице и нажмите кнопку "Форма".

## Результаты геометрически нелинейного расчета

Результатами геометрически нелинейного расчёта являются те же параметры, что и для линейного статического расчета.

## Результаты расчета односторонних опор и канатов

Результатами расчёта односторонних опор и канатов является показ «работающих» односторонних опор (не работающие односторонние опоры – перечеркиваются). Для конструкции с канатами результатами будут являться все те



параметры, которые характерны для результатов статического расчета, но с учетом особенностей стержневого конечного элемента – канат (гибкая нить). Для него будут доступны напряжения, перемещения конструкции с канатами, а также усилия в канате и провис каната.

Провис – это смещение отдельных участков каната под действием силы тяжести относительно прямой, соединяющей точки крепления каната.

И еще одна особенность. Если канат, как стержневой элемент, в процессе расчета конструкции подвергается сжатию, то он автоматически перейдет в режим, когда он находится под действием только силы тяжести и за счет гравитации будет оказывать в местах крепления к конструкции «тянущие» усилия.

## Результаты расчета задачи пластичности

Расчет физической нелинейности (решение задачи пластичности) возможно с учетом разгрузки (см. команду Расчет / Параметры расчета...). При расчете с учетом разгрузки для каждого нагружения создаются два: Нагружение 0 – Нагрузка и Нагружение 1 – Разгрузка.

Помимо результатов линейного статического расчета для нагружения «Разгрузка» доступны карты результатов полных относительных деформаций.

Помимо результатов линейного статического расчета для нагружения «Нагрузка» доступны следующие карты результатов: полные относительные деформации, упругие деформации и пластические деформации.

Компоненты соответствуют линейным (EPSX, EPSY, EPSZ), сдвиговым (EPSXY, EPSYZ, EPSZX) и интенсивности (EPSINT) относительных деформаций.

## Результаты расчета общей нелинейности

Расчет общей нелинейности (геометрической и физической одновременно) позволяет получить одновременно параметры и геометрически нелинейного расчета с учетом нелинейных свойств материала. Просмотр результатов возможен для двух режимов Нагрузка и Разгрузка.

## Результаты расчета на собственные частоты

В 16 версии был сделан вывод результатов расчета собственных частот через Карту результатов и окно Параметры вывода результатов. Но также был оставлен и старый механизм просмотра результатов расчета собственных частот.

Результатом расчета на собственные частоты являются:

- Несколько первых частот собственных колебаний конструкции.
- Соответствующие им формы собственных колебаний конструкции.
- Модальная масса для каждой собственной частоты по различным направлениям ГСК и сумма модальных масс по тем же направлениям.

В сейсмических нормах многих стран (Еврокод 8, UBC-97, сейсмические нормы Украины и др.) принято, что сумма модальных масс по каждому из направлений сейсмического воздействия должна быть не менее установленной границы. Обычно для горизонтальной составляющей сейсмического воздействия принимается 85-90%, для вертикальной – 70-90%.

Собственные частоты и формы колебаний можно посмотреть с помощью команды Результаты | Собственные частоты. Собственные частоты и модальные массы выводятся в виде таблицы.

### Результаты расчета на вынужденные колебания

В 16 версии был сделан вывод результатов расчета вынужденных колебаний через Карту результатов и окно Параметры вывода результатов. В этом окне на вкладке Статика для выбранного момента времени возможно посмотреть статичную картинку для любого параметра поведения рассчитываемой конструкции в конкретный момент времени (Напряжения, Перемещения и т.п.).

На вкладке Анимация просматриваем для выбранного параметра просмотр анимированной картинке от времени. После нажатия кнопки Ок появляется окно Анимация в котором задаются параметры анимации.

Но также был оставлен и старый механизм просмотра результатов расчета вынужденных колебаний.

Результатом расчета конструкции на вынужденные колебания являются:

- Перемещения узлов конструкции.
- Напряжения, действующие в стержнях, пластинах и объёмных элементах.
- Реакции в опорах.
- Собственные частоты и собственные формы колебаний.

### Перемещения узлов конструкции

Узловые перемещения выводятся с помощью команды Результаты | График Перемещения. Ниже показан пример графика.

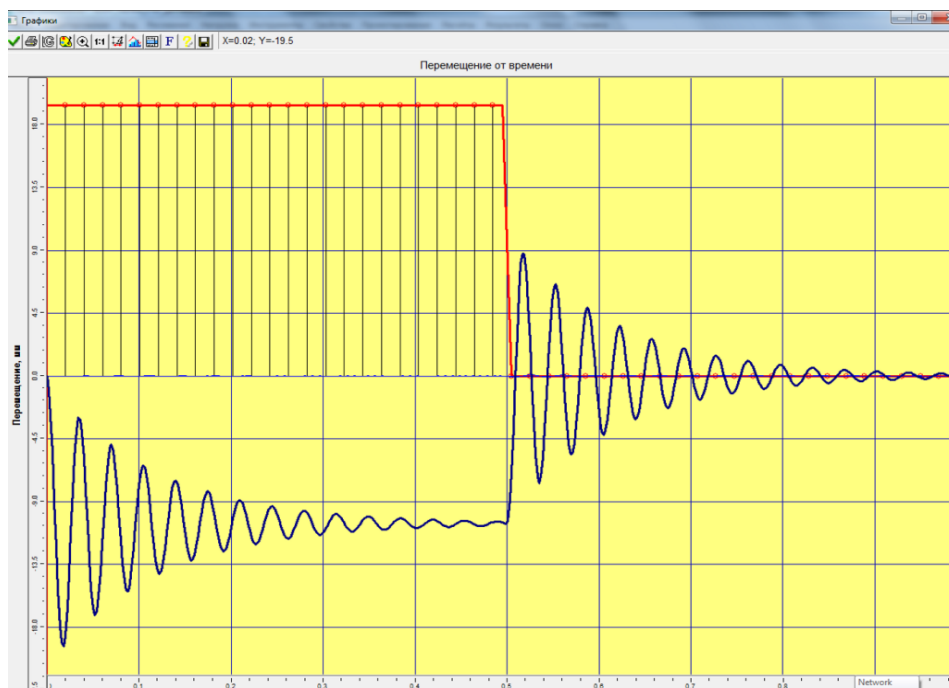


Рисунок 10.10 – Окно графика изменения вынуждающей нагрузки (красная линия) и перемещения одного из уз-лов конструкции от времени.

### Напряжения, перемещения, усилия

Напряжения, действующие в стержнях, пластинах и объёмных элементах, также, как и перемещения и внутренние усилия, выводится в виде цветowych карт для каждого рассчитанного момента времени, последовательно сменяющих друг друга.

Чтобы запустить анимацию нажимаем кнопку Старт/пауза. В поле ввода Период анимации задаем длительность во времени, которую будет длиться один период анимации. На самой конструкции строится карта напряжений (перемещений) конструкции и соответствующая выбранной карте шкала с диапазоном результатов. С помощью настроек в диалоговом окне «Анимация» можно просматривать не полный период колебаний, а только какую-то его часть. После просмотра хотя бы одного цикла анимационных колебаний, сам процесс может быть записан в AVI – файл с помощью соответствующей кнопки.

Кроме этого, строится график эквивалентного напряжения от времени в произвольном сечении стержня с помощью команды Результаты | График Напряжений.

### Расчет несущей способности стержней

Расчет несущей способности стержневых элементов металлоконструкций выполняется для конструктивных элементов и в данной версии APM Structure3D реализован в соответствии с требованиями СНиП II-23-81\* (СП 16.13330.2011)

“Стальные конструкции”. Проверка прочности / устойчивости стержневых элементов может быть также выполнена классическими методами сопротивления материалов.

Для выполнения этого расчета, предварительно должны быть выполнены статический или деформационный расчет, а также созданы конструктивные элементы. Расчет выполняется командой меню Расчет | Проверка несущей способности или в диалоге Конструктивные элементы кнопкой Расчет. Кнопка Расчет позволяет провести проверку несущей способности, не закрывая окна диалога

В случае, когда конструктивный элемент не проходит все проверки, есть возможность автоматического подбора сечения из библиотеки сечений. Для этого при установке свойств конструктивного элемента необходимо отметить флажок Подбирать сечение и выбрать библиотеку сечений, нажав на кнопку Загрузить библиотеку.

Для корректной работы алгоритма проверки несущей способности и подбора сечений необходимо внимательно следить за типом сечения, задаваемым конструктивному элементу. Т.е. сечение стержней, входящих в конструктивный элемент, и сечения в библиотеке, выбранной для подбора, должны иметь один тип. Например: если сечение стержней – двутавр, то в библиотеке для подбора должны быть только двутавровые сечения.

Кнопка Результаты в диалоге Конструктивные элементы вызывает окно с результатами проверки для выбранного элемента.

Коэффициент	Исходное	Подбранное
Название сечения	Двутавр с уклоном №10 ГС	Двутавр с уклоном №20 ГОСТ 8239
Прочность при растяжении/сжатии	0.0000	0.0000
Устойчивость при скатии в пл.XOY	0.0000	0.0000
Устойчивость при скатии в пл.XOZ	0.0000	0.0000
Предельная гибкость в пл. XOY	0.3287	0.1610
Предельная гибкость в пл. XOZ	1.0973	0.6448
Прочность при изгибе в пл.XOY	2.4120	0.5202
Прочность при изгибе в пл.XOZ	0.0012	0.0003
Прочность под действием поперечной силы Oy	0.0684	0.0308
Прочность под действием поперечной силы Oz	0.0000	0.0000
Прочность при скатии и изгибе	2.4130	0.5204
Устойчивость плоской формы изгиба в пл. XOY	2.4120	0.5202

Рисунок 10.11 – Диалоговое окно Результаты

В первом столбце таблицы приводится тип проверки, а во втором и в третьем – коэффициенты использования. Так, например, для проверки «Прочность при растяжении/сжатии» коэффициентом использования будет отношение действующего сжимающего/растягивающего напряжения к максимально допустимому. В случае, если конструктивный элемент удовлетворяет критериям данного типа проверки – коэффициент использования будет меньше единицы. На рисунке 10.11 можно видеть,

что некоторые из проверок не прошли (они выделены цветом), и при расчёте было подобрано сечение, которое удовлетворяет всем проверкам СНиП.

Кнопка Заменить сечение проводит автоматическую замену поперечного сечения стержней, входящих в конструктивный элемент на подобранное. Кнопка Вернуть сечение – возвращает исходное сечение стержням, входящим в конструктивный элемент.

## Результаты расчёта контактного взаимодействия

Результатом расчёта контактного взаимодействия является напряжённо-деформированное состояние модели конструкции (см. результаты статического расчёта), а также карта распределения нормальных и тангенциальных напряжений, взаимного проникновения и состояния контактных элементов в контактной области, представленные в виде изообластей.

После проведения расчёта можно увидеть состояние контактных/целевых элементов, оценить форму и размеры площадки контакта по распределению нормальной силы, а также проконтролировать точность нахождения решения по карте взаимного проникновения деталей.

Все результаты контактного взаимодействия отображаются либо отдельно от всей конструкции, либо на полупрозрачной модели для удобства просмотра изообластей для контактных и целевых элементов.

## Расширенное представление результатов армирования

Для расширенного визуального представления результатов армирования служат команды панели инструментов «Результаты армирования».

Панель инструментов доступна при включенном режиме проектирования железобетонных элементов (команда Проектирование | Железобетонные элементы). Описание команд меню приводится ниже.

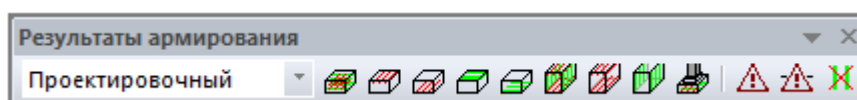














Рисунок 10.12 – Панель инструментов Результаты армирования

-  объемное отображение армирования пластинчатых железобетонных элементов
-  показать верхнюю арматуру по оси x
-  показать нижнюю арматуру по оси x
-  показать верхнюю арматуру по оси y

-  показать нижнюю арматуру по оси y
-  объемное отображение армирования стержневых железобетонных элементов
-  показать продольную арматуру стержневых железобетонных элементов
-  показать поперечную арматуру стержневых железобетонных элементов
-  показать одиночные фундаменты
-  отображать только элементы с не пройденным расчетом (активного типа)
-  отображать только элементы с невозможностью расчета
-  отображать только элементы без продольной арматуры

## Результаты расчета коэффициента концентрации напряжений

### Вызов в APM Structure3D

Команда меню Результаты | Коэффициент концентрации напряжений...

Ниже представлено описание элементов диалогового окна "Коэффициент концентрации напряжений", показанного на рисунке 10.13.

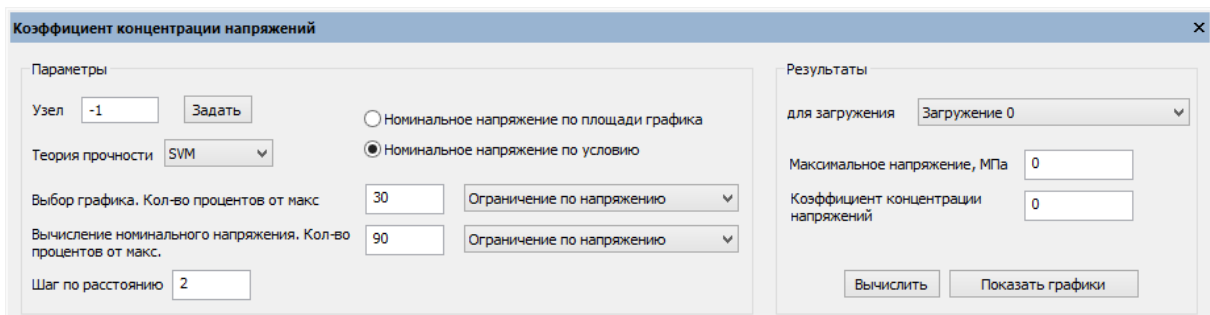


Рисунок 10.13 – Диалоговое окно "Коэффициент концентрации напряжений"

### Блок Параметры

Узел. Пользователь должен ввести номер узла или позволить программе найти его автоматически (если указано значение меньше нуля).

Теория прочности. Если в поле Узел указано значение меньше нуля, то номер узла находится автоматически по одной из теорий прочности:

1. Теория формоизменения (SVM);

$$S_{SVM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_z - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{zy}^2 + \tau_{xz}^2)}$$

где:  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – нормальные напряжения,  $\tau_{xy}, \tau_{zy}, \tau_{xz}$  – касательные напряжения.

2. Теория Мора (SMOHR);

$$S_{SMOHR} = S_1 - \frac{\sigma_+}{\sigma_-} S_3$$

где:  $S_1, S_3$  – главные напряжения,  $\sigma_+$  – предел прочности на растяжение,  $\sigma_-$  – предел прочности на сжатие.

3. Теория наибольших нормальных напряжений (S1);

$$S_{S1} = S_1$$

4. Теория наибольших относительных удлинений (MAXEPS);

$$S_{MAXEPS} = S_1 - \mu(S_2 + S_3)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

5. Теория наибольших касательных напряжений (SMAXTAU);

$$S_{SMAXTAU} = \frac{S_1 - S_3}{2}$$

Выбор графика. Кол-во процентов от макс. Из всех полученных диаграмм (ось ординат – напряжение по выбранной теории прочности, ось абсцисс – расстояние от начальной точки (узла)) выбирается одна, у которой линия тренда, полученная по линейному закону, резко убывает (градиент убывания напряжений максимальный).

Ограничение по напряжению. В этом случае для выбора диаграммы используется отрезок оси ординат. Для этого находится минимальное пороговое напряжение, заданное в процентном соотношении от максимального. Затем, линия тренда для каждой из диаграмм строится на основе тех данных, которые лежат в диапазоне между минимальным пороговым значением и максимальным (образующих отрезок оси ординат).

Ограничение по расстоянию. В этом случае для выбора диаграммы используется отрезок оси абсцисс. Для этого находится максимальное пороговое расстояние, заданное в процентном соотношении от максимального. Затем, линия тренда для каждой из диаграмм строится на основе тех данных, которые лежат в диапазоне от нуля до максимального порогового значения (образующих отрезок оси абсцисс).

Графики строятся следующим образом.

1. От начальной точки (узла) (найденного в пункте 1) проводится луч через все узлы тех КЭ, которые принадлежат начальной точке (узлу);

2. От начальной точки (узла) (найденного в пункте 1) проводится луч через геометрические центры тех КЭ, которые принадлежат начальной точке (узлу);

3. В точках (полученных путем пересечения лучей с гранями КЭ), лежащих по одну сторону от начальной точки (узла) вычисляется напряжение и расстояние до этой точки;

4. Пункт 3 выполняется до тех пор, пока не будут рассмотрены все лучи.

Пример построения диаграмм на 4-х узловом объемном КЭ показан на рисунке 10.14.

Пункт 1: 0 – номер начальной точки (узла); Три луча красного цвета.

Пункт 2: 0 – номер начальной точки (узла); ГЦ - геометрический центр КЭ; Один луч зеленого цвета.

Пункт 3: 1, 2, 3, 4 – точки пересечения каждого луча с гранями КЭ;

Пункт 4: Пункт 3 выполняется четыре раза (т.к. имеем четыре луча)

В результате получаем четыре диаграммы "Напряжение, МПа – Расстояние от начальной точки (узла), мм".

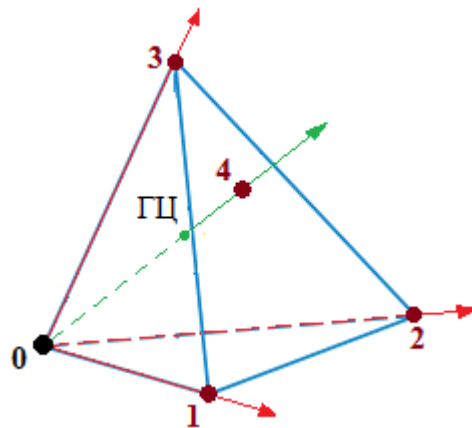


Рисунок 10.14 – Схема работы метода на примере 4-х узлового тетраэдра

Вычисление номинального напряжения. Кол-во процентов от макс. Номинальное напряжение вычисляется по данным диаграммы, полученной в п. 4.

Ограничение по напряжению. При увеличении расстояния (по оси абсцисс) на дельту от начального узла, напряжение изменяется на величину меньше заданного в процентном соотношений от максимального. Если это условие выполняется, то меньшее из двух напряжений на последнем шаге (дельта) принимается за номинальное.

Ограничение по расстоянию. Вначале вычисляется расстояние в процентном соотношений от максимального, которое принимается за пороговое значение. Затем, из координат по которым была построена диаграмма, используются данные по расстоянию (координаты оси абсцисс). За номинальное напряжение принимается напряжение, при котором компонента по расстоянию соответствует или превышает пороговое значение.

Шаг по расстоянию. Используется для вычисления номинального напряжения с ограничением по напряжению.

Номинальное напряжение по площади графика. Номинальное напряжение для выбранного графика вычисляется с учетом площади этого графика.



Номинальное напряжение по условию. Номинальное напряжение для выбранного графика вычисляется с учетом настроек в разделе Вычисление номинального напряжения.

### **Блок Результаты**

Для загрузки. Позволяет выбрать загрузку, для которого нужно провести расчет.

Максимальное напряжение. В поле выводится значение максимального напряжения по выбранной теории прочности.

Алгоритм вычисления максимального напряжения:

1. Среднее значение напряжения

$$Savg_i = \frac{\sum_{j=0}^N Snode_j}{N}$$

где:  $i$  – индекс КЭ,  $N$  – число узлов в КЭ,  $Snode_j$  – напряжение в  $j$ -ом узле КЭ.

2. Среднее значение между элементами

$$Savg = \frac{\sum_{i=0}^M Savg_i}{M}$$

где:  $M$  – число КЭ, сходящихся в узле.

Это значение берется как максимальное.

Коэфф. концентрации. Отношение максимального напряжения из п. 3 к значению напряжения из п. 5 и есть коэфф. концентрации.

Кнопка Вычислить. Запускает расчет коэффициента концентрации напряжений.

Кнопка Показать графики. Отображает все графики, полученные в результате расчета. Для каждого графика используется свой стиль и цвет. Выбранный график имеет увеличенную, по отношению к другим, толщину линии.

### **Пример расчета коэффициента концентрации**

В качестве примера решим задачу Кирша (растяжение пластины с отверстием в центре) и найдем условное значение коэффициента концентрации напряжений. КЭ-модель пластины состоит из 4-х узловых тетраэдров (рисунок 10.15). Нижняя грань КЭ-модели жестко закреплена, а к верхней приложена нагрузка в виде давления на объемные элементы  $P = 100$  МПа. Карта результатов эквивалентных напряжений по Мизесу статического расчета показана на рисунке 10.16.

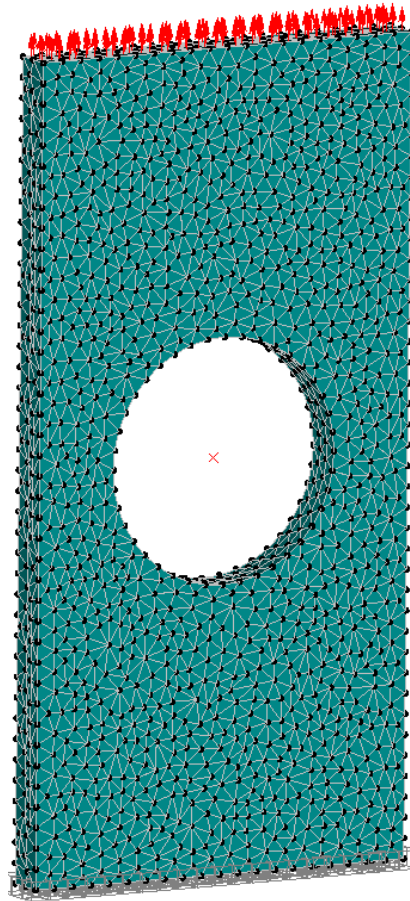


Рисунок 10.15 – КЭ-модель пластины с отверстием

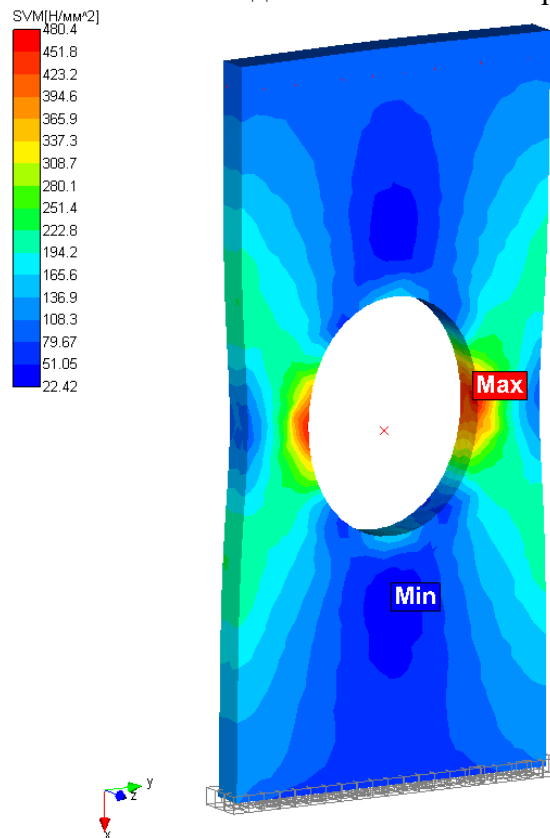


Рисунок 10.16 – Карта результатов эквивалентных напряжений по Мизесу

Последовательность шагов:

1) На рисунке 10.17 показаны введенные значения для каждого параметра и задана теория прочности формоизменения (SVM). Номер узла с максимальной концентрацией напряжении определится автоматически, поскольку начальное значение меньше нуля.

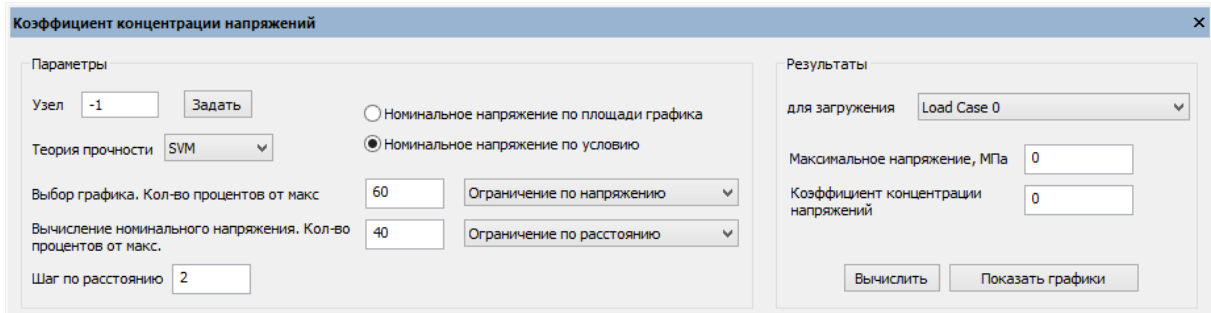


Рисунок 10.17 – Диалоговое окно "Коэффициент концентрации напряжений"

2) Нажимаем кнопку "Вычислить"

По теории формоизменения максимальная концентрация напряжении наблюдается у узла под номером 1303. С учетом КЭ, принадлежащих данному узлу, было получено 16 диаграмм. На рисунке 10.18 приведены диаграммы, построенные в редакторе Microsoft Excel.

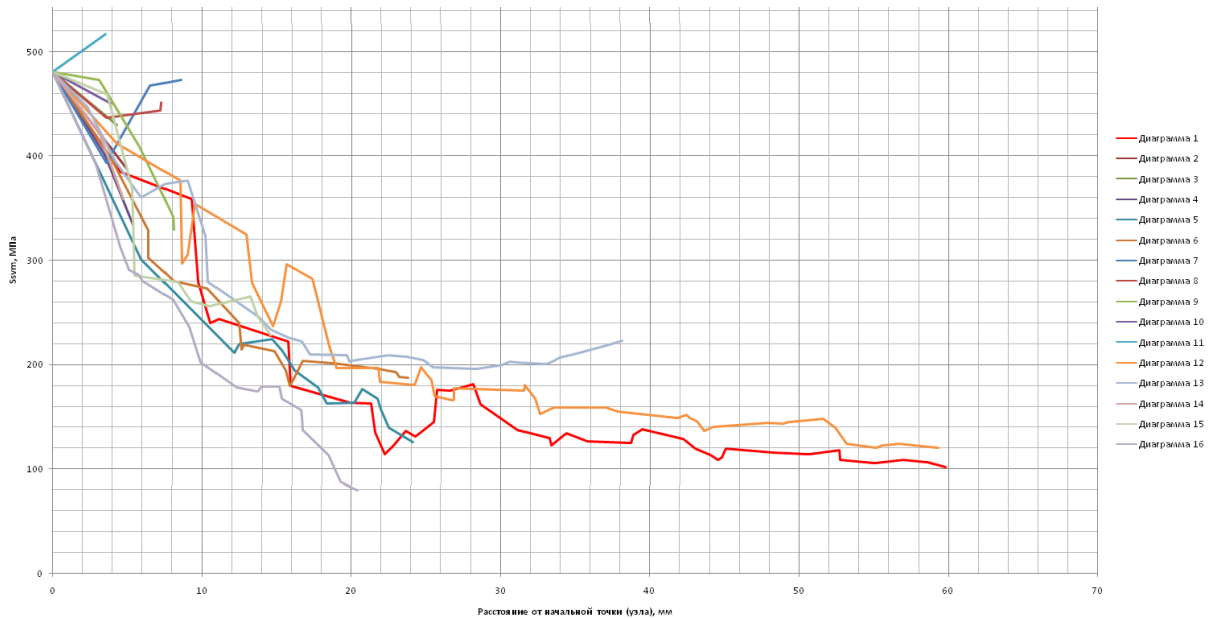


Рисунок 10.18 – Диаграммы, полученные в примере

Выбор диаграммы. Кол-во процентов от макс.

Ограничение по напряжению. При значении 60% от макс. пороговое напряжение составляет 288,27 МПа. Согласно критерию использования данных для вычисления линии тренда для каждой из диаграмм, применяются данные между максимальным напряжением и пороговым (на рисунке 10.19 отмечено как "Рассматриваемый диапазон"). После обработки диаграмм, максимальное убывание линии тренда

соответствует диаграмме под номером 16. Она будет использоваться для определения номинального напряжения.

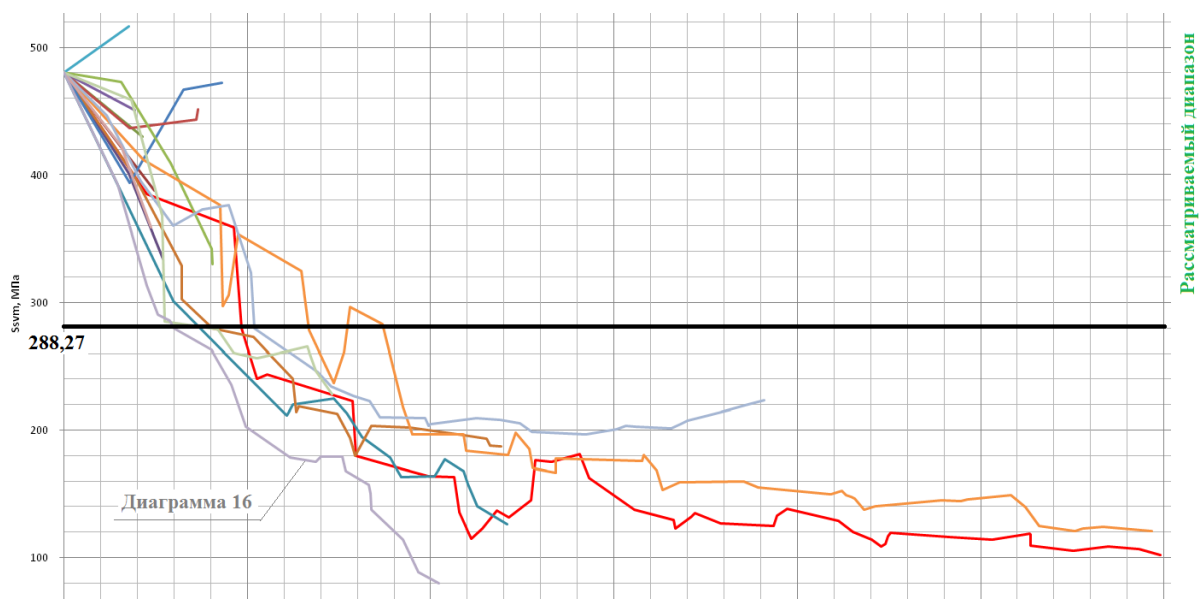


Рисунок 10.19 – Схема обработки диаграмм

Вычисление номинального напряжения. Кол-во процентов от макс.

Ограничение по расстоянию. Значение максимальной компоненты по оси абсцисс (расстояние) для выбранной диаграммы составляет 20,44 мм. С заданным 40% количеством от максимального пороговое расстояние составляет 8,17 мм. Согласно данным выбранной диаграммы, значение компоненты по оси абсцисс, превышающей пороговое значение, составляет 9,13 мм. Значение напряжения в компоненте оси ординат в этой точке составляет 235,8 МПа. Это значение принимается за номинальное напряжение.

Результаты вычислений показаны на рисунке Рисунок 10.21. Номер узла с максимальной концентрацией напряжении – 1303. Округленное значение коэффициента концентраций напряжений – 2.04.

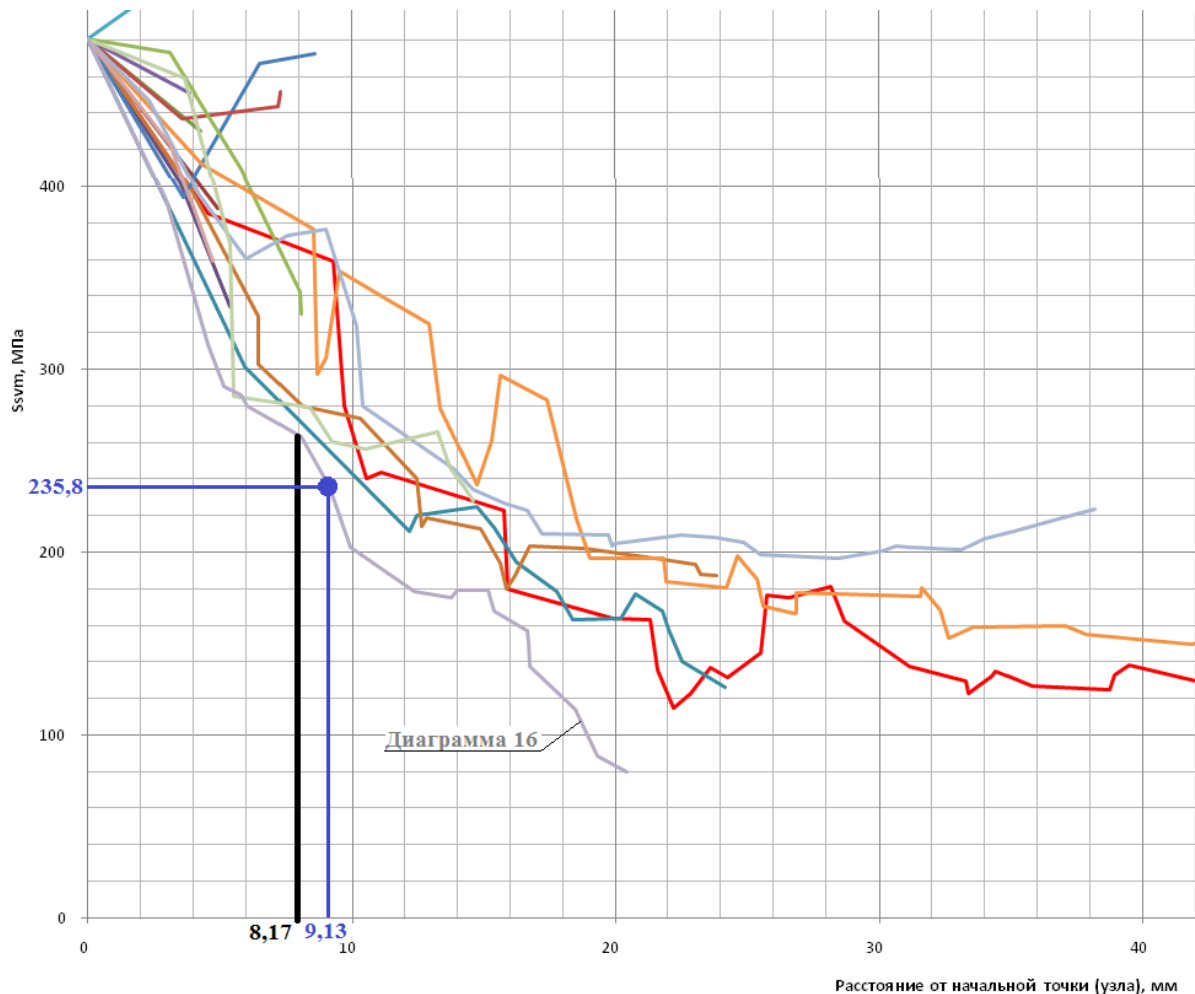


Рисунок 10.20 – Схема нахождения номинального напряжения

Результаты вычислений показаны на рисунке 10.21. Номер узла с максимальной концентрацией напряжении – 1303. Округленное значение коэффициента концентраций напряжений – 2.04.

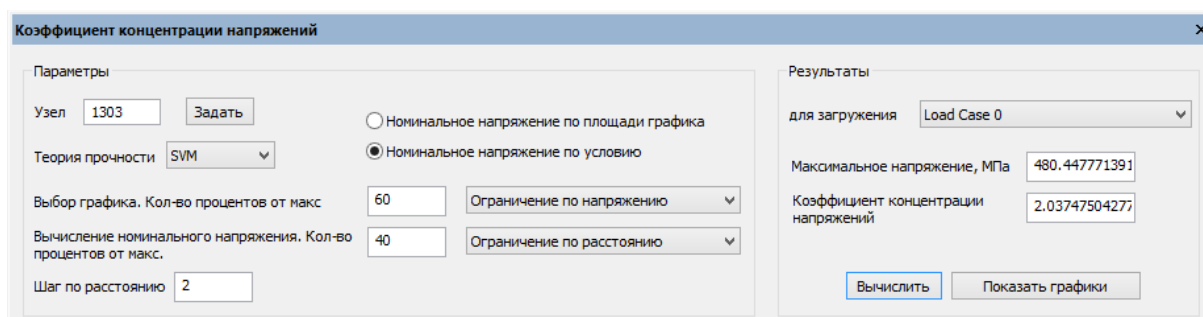


Рисунок 10.21 – Диалоговое окно "Коэффициент концентрации напряжений" с результатами

Чтобы посмотреть графики, нажимаем кнопку "Показать графики". На рисунке 10.22 показаны графики, полученные в результате расчета. Картина идентична представленной выше, которая использовалась для пояснения процесса вычисления номинального напряжения. Графики характеризуют зависимость напряжения от

расстояния. На рисунке 10.22, график, который удовлетворяет параметрам расчета, отмечен жирной сплошной линией.

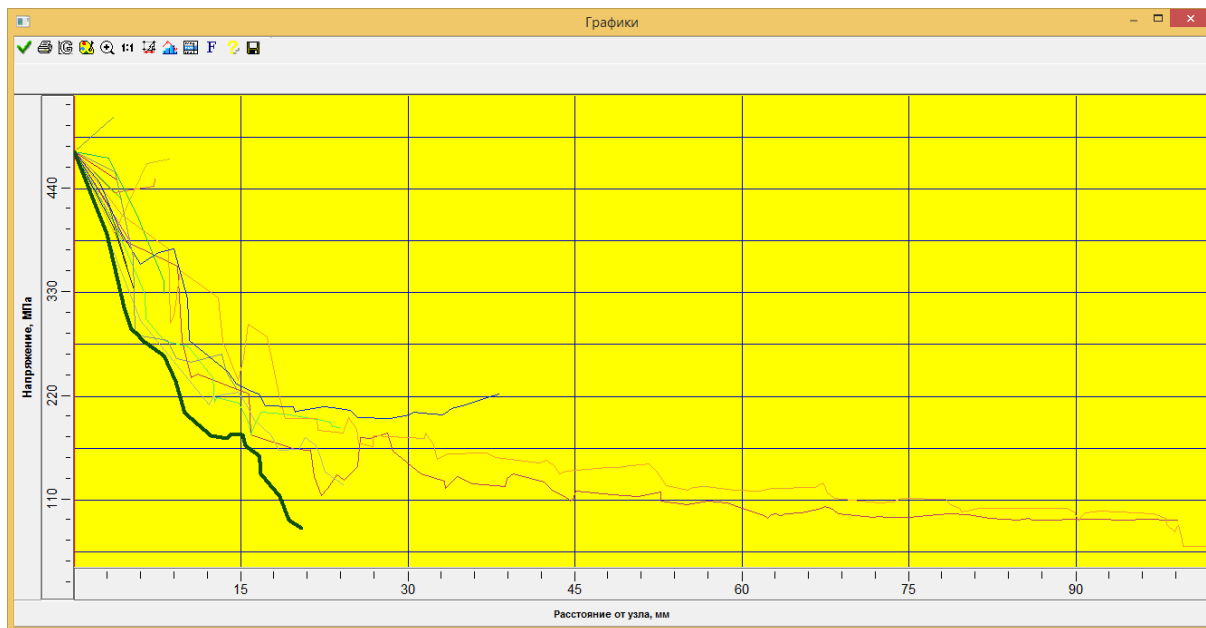


Рисунок 10.22 – Графики, полученные в результате расчета

# Глава 11. Топологическая оптимизация

## Формирование оптимизационной задачи и система откликов

Для создания задачи для топологической оптимизации в программе появилось отдельное окно «Топологическая оптимизация», доступное в меню «Расчёты». В нём пользователю, для проведения успешного расчёта, необходимо последовательно выполнить действия, соответствующие каждому из подпунктов дерева «Топологическая оптимизация».

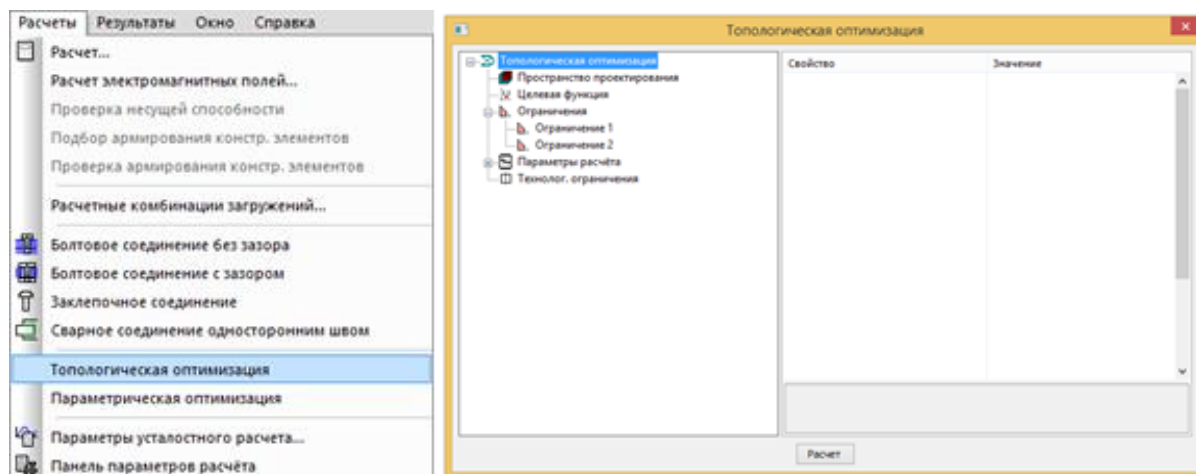


Рисунок 11.1 – Окно расчёта топологическая оптимизация

### Выбор области проектирования

Под областью проектирования (ОП) подразумевается область, распределение материала в которой может изменяться в ходе оптимизации. ОП может быть задана пользователем и в нашей программе происходит путем назначения конечным элементам свойства «объемная доля».

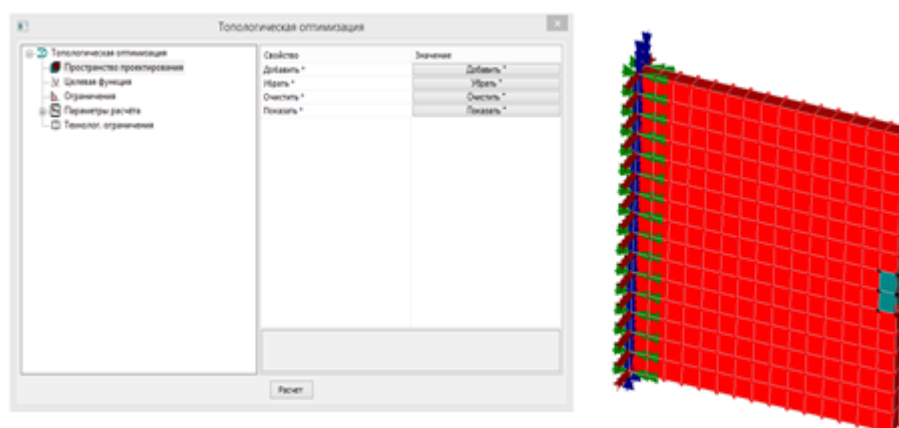


Рисунок 11.2 – Пункт дерева «Пространство проектирования»

Кнопка «Добавить» позволяет присвоить выделенным КЭ свойство «Объемную долю», тем самым включив их в область проектирования.

Кнопка «Удалить» позволяет удалить у выделенных КЭ свойство «Объемную долю», тем самым исключив их из области проектирования.

Кнопка «Очистить» позволяет удалить свойство «Объемную долю» у всех конечных КЭ, тем самым удалив область проектирования.

Кнопка «Показать» позволяет открыть диалоговое окно «Объемна доля», с помощью которой можно посмотреть текущее распределение объемных долей в модели.

### Формирование постановки оптимизационной задачи, отклики

Постановка задачи топологической оптимизации формируется путем задания Ц.Ф. и ограничений с помощью откликов системы.

Под откликом статической системы в APM Structure 3D понимается какое-либо значение, характерное для её состояния. В ходе топологической оптимизации рассматривается лишь зависимость отклика системы от распределения объемных долей. Любой отклик можно выбрать в качестве базы для Ц.Ф. либо ограничения. Ниже представлена таблица с кратким описанием каждого из них и необходимыми параметрами для задания.

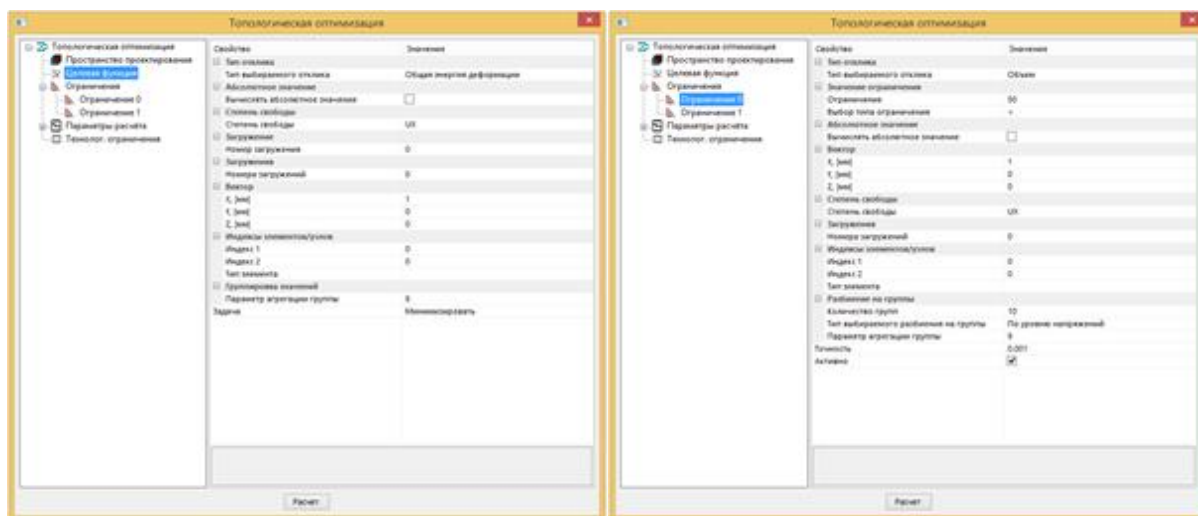


Рисунок 11.3 – Окна настроек откликов для Ц.Ф. и ограничений оптимизационной задачи



Ниже представлена таблица по доступным для расчёта откликам и краткое пояснение к ним.

Тип отклика	Описание	Необходимые параметры
Компонента перемещения	Возвращает значение линейного перемещения для узла с указанным индексом по заданной степени свободы. Доступен так же и для узлов с упругой опорой.	« <b>Степень свободы</b> » – выбор оси ГСК, на которую будет производиться проекция перемещения узла, либо его угловое смещение. « <b>Номера загружений</b> », для каждого из выбранных загружений будет сформировано отдельное ограничение. « <b>Индекс 1</b> » - индекс узла, для которого необходимо вычислять перемещение
Проекция перемещения на направление	Возвращает значение проекции линейного перемещения узла с указанным индексом на заданный вектор. Доступен так же и для узлов с упругой опорой.	« <b>Вектор</b> » - координаты вектора в ГСК, на который будет производиться проекция перемещения заданного узла. « <b>Номера загружений</b> », для каждого из выбранных загружений будет сформировано отдельное ограничение. « <b>Индекс 1</b> » - индекс узла, для которого необходимо вычислять перемещение
Взаимное смещение двух узлов	Возвращает сумму проекций перемещений двух узлов на вектор, построенный с помощью координат двух этих узлов в ненагруженном состоянии.	« <b>Номера загружений</b> », для каждого из выбранных загружений будет сформировано отдельное ограничение. « <b>Индекс 1</b> », « <b>Индекс 2</b> » - индексы узлов, для которых необходимо вычислять взаимное смещение.
Общая энергия деформации	Возвращает сумму энергии деформации для всех загружений и всех элементов конструкции. Учитывает так же и энергию упругих опор.	« <b>Номера загружений</b> », по которым будет суммироваться значение энергии деформации.
Объем	Возвращает объем элементов, входящих в пространство проектирования	—
Масса	Возвращает суммарную массу элементов, входящих в пространство проектирования	—

Тип отклика	Описание	Необходимые параметры
Реакция в опоре	Возвращает реакцию в опоре по указанной степени свободы. Доступен только для жестких опор.	<p>«<b>Степень свободы</b>» - выбор оси ГСК, на которую будет производиться проекция реакции в опоре узла.</p> <p>«<b>Номера загружений</b>», для каждого из выбранных загружений будет сформировано отдельное ограничение.</p> <p>«<b>Индекс 1</b>» - индекс узла, для которого необходимо вычислять реакцию в опоре.</p>
Напряжение группы элементов	<p>В группу входят все элементы пространства проектирования. Отклик разбивает элементы по группам напряжений (SVM) и для каждой группы возвращает максимальное напряжение в ней.</p> <p>Разбиение ведется исходя указанного количества групп и "типа разбиения".</p> <p>Доступно только для элементов типа «Пластина» и «Объемный элемент».</p>	<p>Значение «<b>параметр агрегации группы</b>», отвечающее за точность вычисления значения максимального напряжения для группы, стоит указывать в пределах от 5 до 20. При меньших значениях возвращаемое значение будет выше, чем реальное максимальное в группе элементов, что завышает коэффициент запаса полученной.</p> <p><b>Тип разбиения на группы</b></p> <p>Определяет стратегию выделения элементов в группы. Наиболее удачной является стратегия «<b>по уровню напряжений</b>», где диапазон действующих напряжений в модели разбивается на указанное количество и все элементы, с напряжениями, попадающими в часть диапазона напряжений, образуют группу.</p> <p>Стратегия «<b>По уровню напряжений и количеству элементов</b>» сортирует все элементы по значению напряжений, а после по порядку отбирает равное количество элементов для каждой группы.</p>



Для отклика «Общая энергия деформации» номера загружений выбираются с помощью параметра «Номера загружений». Для всех остальных откликов, характерных для загружений, выбор следует производить с помощью пункта «Номер загрузки».

Для отклика «Напряжения группы элементов» доступна только одна группа.

С помощью параметра «Задача» можно указать программе, необходимо минимизировать или максимизировать значение Ц.Ф.

Ниже представлена таблица, в которой указаны необходимые параметры, для того чтобы сформировать Ц.Ф. для разных типов откликов.

Тип отклика	Необходимые параметры для настройки	Параметры отклика, которые можно настроить дополнительно
Компонента перемещения	а) Степень свободы б) <b>Номер</b> загрузки в) Индекс узла в строке "Индекс1"	"Вычислять абсолютное значение"
Проекция перемещения на направление	а) Вектор (Его координаты) б) <b>Номер</b> загрузки в) Индекс узла в строке "Индекс1"	"Вычислять абсолютное значение"
Взаимное смещение двух узлов	а) <b>Номер</b> загрузки б) Индекс узла в строке "Индекс1" в) Индекс узла в строке "Индекс2"	"Вычислять абсолютное значение"
Общая энергия деформации	<b>Номера</b> загружений	
Объем	—	
Масса	—	
Реакция в опоре	а) Степень свободы б) <b>Номер</b> загрузки в) Индекс узла в строке "Индекс1"	"Вычислять абсолютное значение"
Напряжение группы элементов	а) <b>Номер</b> загрузки	"параметр агрегации группы"
Напряжение в элементе (SVM)	а) <b>Номер</b> загрузки в) Индекс элемента в строке "Индекс1" г) Тип элемента	"Вычислять абсолютное значение"

### **Формирование откликов для ограничений**

Если вам необходимо, чтобы в оптимизированной конструкции какое-либо значение лежало в определенных рамках, то нужно добавить ограничение в

оптимизационную задачу. Для этого в пункте дерева "Ограничения" необходимо нажать кнопку "добавить ограничение", либо нажать по нему правой кнопкой и выбрать пункт с таким же названием:

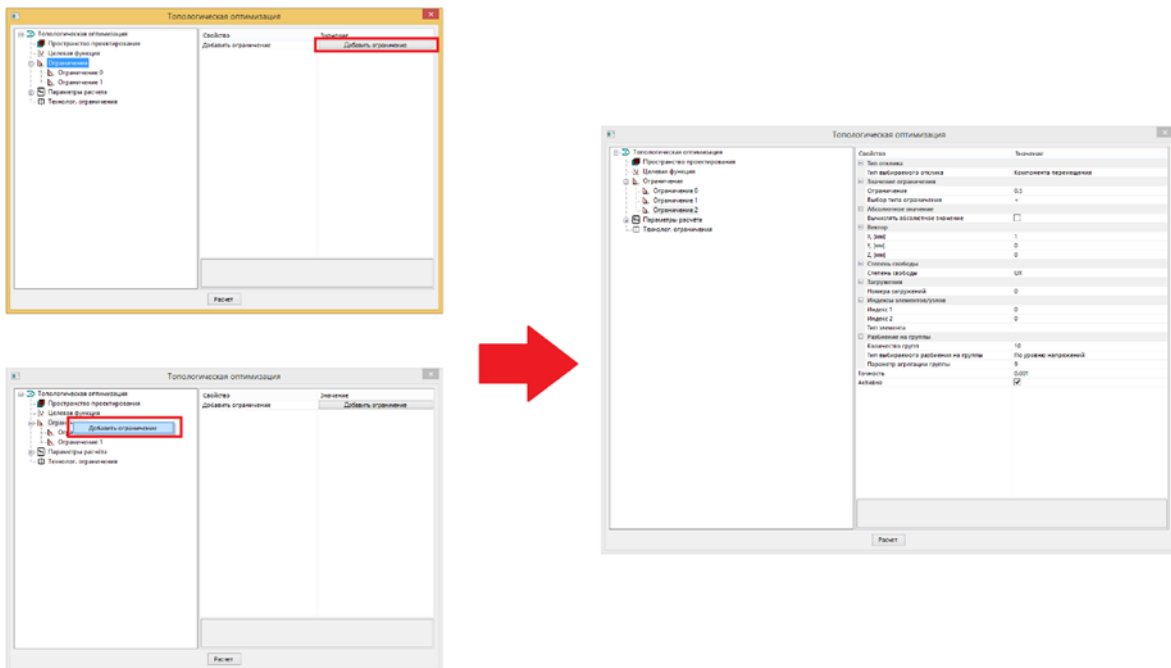


Рисунок 11.5 – Добавление ограничения

Кнопка "Удалить", доступная по правому щелчку мыши на выбранном ограничении, позволяет удалить это ограничение.

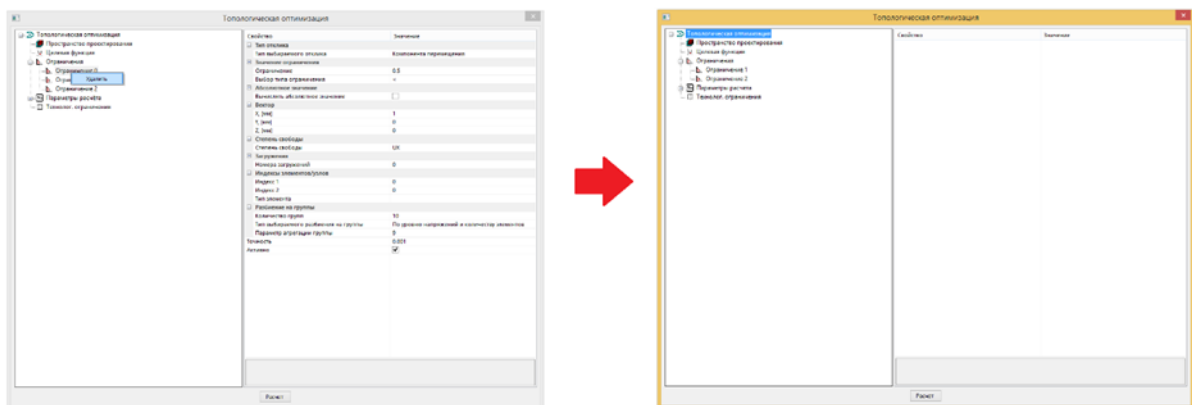


Рисунок 11.6 – Удаление ограничения

Галочка "Активно" позволяет сохранить настройки для ограничения, но не добавлять ограничение непосредственно в оптимизационную задачу.

Значение "Точность" позволяет определить точность, с которой оптимизатору необходимо будет соблюсти заданное значение ограничения. Задается в абсолютной величине, таким образом, для малого значения необходимо указывать и более высокую точность.

Основные настройки для ограничения сосредоточены в группе "Значение ограничения".

Необходимо задать ограничивающее значение и тип ограничения (больше или меньше). К примеру, если необходимо задать, чтобы в узле перемещение было больше 0.3 мм, то группа настроек должна быть сформирована так, как указано на картинке

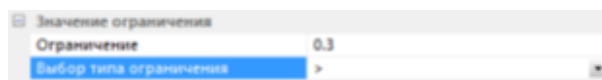


Рисунок 11.7 – Формирование значения ограничения

В значении ограничения нет возможности указать единицы. В данном пункте меню идёт работа с заранее заданными единицами, которые указаны для различных откликов в следующей таблице.

Отклик	Единица измерения	Примечания
Компонента перемещения	мм	
Проекция перемещения на направление	мм	
Взаимное смещение двух узлов	мм	
Общая энергия деформации	Дж	
Объем	%	Ограничение задается в виде процента от начального объема конструкции
Масса	кг	
Реакция в опоре	Н	
Напряжение группы элементов	МПа	
Напряжение в элементе (SVM)	МПа	

При выбранной галочке «Вычислять абсолютное значение» нельзя указать отрицательное значение для ограничения, поскольку его невозможно будет соблюсти.

Ограничения формируются благодаря откликам системы способом схожим с формированием значения для Ц.Ф. Необходимо выбрать тип отклика и необходимые для него параметры. Каждое указанное в отклике загрузение формирует своё ограничение,

кроме откликов, не характерных для загружений и энергии деформации. В следующей таблице указаны основные правила формирования ограничений с помощью откликов.

Отклик для ц.ф.	Необходимые параметры для настройки	Параметры отклика, которые можно настроить дополнительно
Компонента перемещения	а) Степень свободы б) Номера загружений в) Индекс узла в строке "Индекс1"	"Вычислять абсолютное значение"
Проекция перемещения на направление	а) Вектор (Его координаты) б) Номера загружений в) Индекс узла в строке "Индекс1"	"Вычислять абсолютное значение"
Взаимное смещение двух узлов	а) Номера загружений б) Индекс узла в строке "Индекс1" в) Индекс второго узла в строке "Индекс2"	"Вычислять абсолютное значение"
Общая энергия деформации	Номера загружений	—
Объем	—	—
Масса	—	—
Реакция в опоре	а) Степень свободы б) Номера загружений в) Индекс узла в строке "Индекс1"	"Вычислять абсолютное значение"
Напряжение группы элементов	а) Номера загружений б) Количество групп	а) "параметр агрегации группы" б) Тип разбиения на группы
Напряжение в элементе (SVM)	а) Номера загружений в) Индекс элемента в строке "Индекс1" г) Тип элемента	"Вычислять абсолютное значение"

### Параметры расчёта

В программе присутствует два решателя оптимизационных задач ("оптимизатора") для топологии. По методу ОС (Optimality criteria) и по методу SQP (Sequential quadratic programming), подробнее о которых можно прочитать в интернете.

С помощью метода ОС можно решить лишь ограниченный круг задач. В нашей программе он доступен для решения задачи нахождения конструкции максимальной жесткости с заданным ограничением на объем, и решения этой же задачи с учётом

симметрии. Учёт объемных сил для этого метода корректно не осуществляется. Так же этот метод доступен для решения на "CUDA", но в решателе "OC-CUDA" недоступен учёт симметрии.

Любая другая постановка задачи будет решаться с помощью методов SQP, для этого в группе настроек "Параметры расчёта" окна "Топологическая оптимизация" необходимо выбрать "оптимизатор" NLOPT (возможно, мы его переименуем).

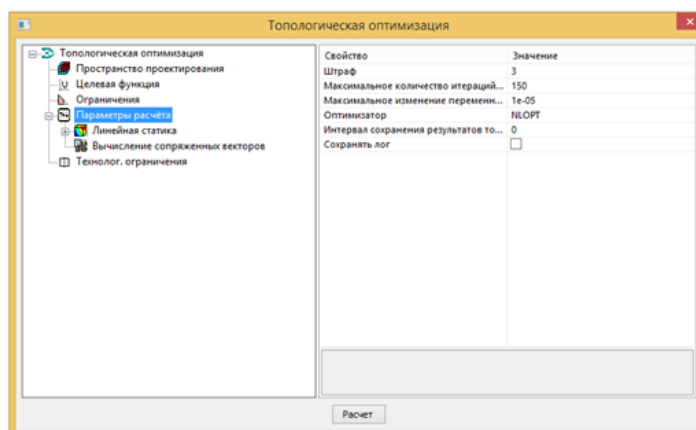


Рисунок 11.8 – Группа настроек "Параметры расчёта" в окне "Топологическая оптимизация"

Параметр штраф (степень  $p$  в формуле на рисунке ниже) является основным для топологической оптимизации и определяет коэффициент, на который домножается локальная матрица жесткости элемента с объемной долей.

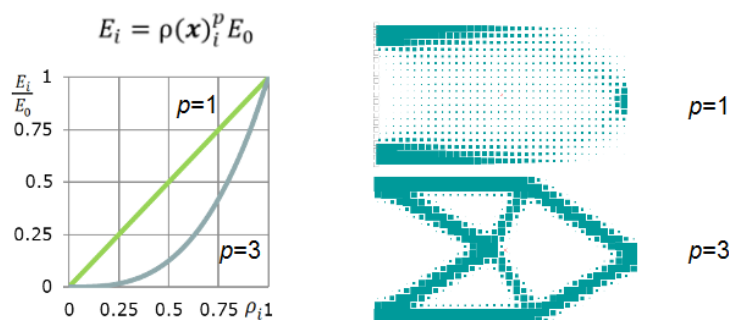


Рисунок 11.9 – Формирование локальной матрицы жесткости элемента в ходе топологической оптимизации

Примечание: с помощью параметра  $p$  получается добиться дискретной конструкции благодаря тому, что становится невыгодно иметь промежуточные плотности (это можно понять из анализа графика). При решении задач с помощью твердотельных и пластинчатых КЭ данный параметр регулировать не требуется. Решение задач со стержнями требует выставить  $p=1$ , поскольку конструкция уже является дискретной.



В качестве критериев остановки для решения задачи можно выбрать следующие параметры:

- а) максимальное изменение проектных переменных, оптимизация будет остановлена, когда проектные переменные уже практически не изменяются и максимальное изменение любой проектной переменной не будет превышать заданное значение.
- б) максимальное количество итераций - оптимизация будет остановлена после выполнения указанного количества итераций.

В ходе оптимизации, от итерации к итерации, изменяется поле объемных долей. С помощью пункта настроек "Интервал сохранения результатов", можно указать программе, с каким шагом по итерациям необходимо сохранять это распределение в карту результатов. В дальнейшем она будет доступна в ней с доступом по итерациям. Если задать 0, то в карту результатов будет сохранено лишь оптимальное решение. Целое значение больше нуля в данном поле будет определять шаг по итерациям, с которым сохраняется распределение объемных долей.

Для решателя NLOPT доступен лог, который можно будет сохранить в папке с файлом. Для осуществления этого действия в меню настроек есть галочка. Лог – это файл с расширением \*.txt , название которого формируется из названия рабочего файла путем добавления к нему продолжения "\_TopOptLog".

#### **Подпункт "линейная статика"**

В отдельный пункт дерева "Линейная статика" выведены настройки линейного статического расчёта, результаты которого используются в ходе оптимизации. Данные настройки следует указывать по тем же правилам, что и для линейного статического расчёта

#### **Подпункт "Вычисление сопряженных векторов"**

В пункте дерева "Вычисление сопряженных векторов" собраны настройки для решателя СЛАУ при нахождении сопряженных векторов, которые используются для эффективного вычисления градиентов (или "чувствительностей", англ. sensitivities). Применяя глобальную матрицу жесткости, полученную и сохраненную на этапе получения результатов линейного статического расчёта, мы добиваемся большой вычислительной эффективности. В данной группе настроек стоит указывать значения, сходные с пунктом дерева "Линейная статика".

Выставлять эти значения имеет смысл только тогда, когда есть необходимость поиска сопряженных векторов, в следующей таблице показано, для каких откликов они необходимы:

Компонента перемещения	+
Проекция перемещения на направление	+
Взаимное смещение двух узлов	+
Общая энергия деформации	-
Объем	-
Масса	-
Реакция в опоре	+
Напряжение группы элементов	+
Напряжение в элементе (SVM)	+

## Расчёт

Пройдясь по всем пунктам меню, есть возможность нажать кнопку «расчёт» и запустить оптимизацию с помощью кнопки «Расчёт»

После запуска перед пользователем появляется окно, показывающее ход расчёта, в котором есть возможность увидеть необходимые параметры сходимости и краткое описание оптимизационной задачи: тип Ц.Ф., количество проведенных итераций, значение Ц.Ф., погрешность на итерации. И этап расчёта на итерации. На вкладке «график» представлен график максимального изменения проектных переменных (т.е. погрешность на ит.), а также диапазон его возможных значений. На вкладке «Лог» имеется расширенная информация по ходу оптимизации, откуда можно увидеть историю оптимизации и выполнимость выбранных ограничений. В активном окне будет отображаться изменение объемных долей и возможные предупреждения. В ходе оптимизации есть возможность остановить её, после нажатия на кнопку «Остановить расчёт» необходимо дождаться сообщения об остановке оптимизации в логе, поскольку она не может быть остановлена моментально.

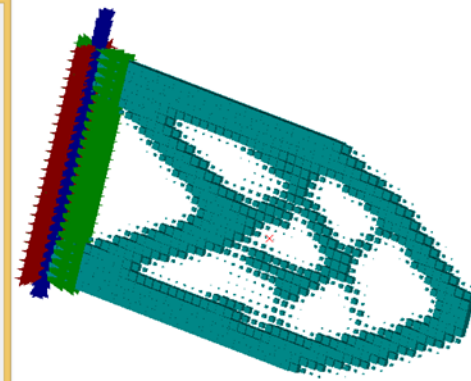
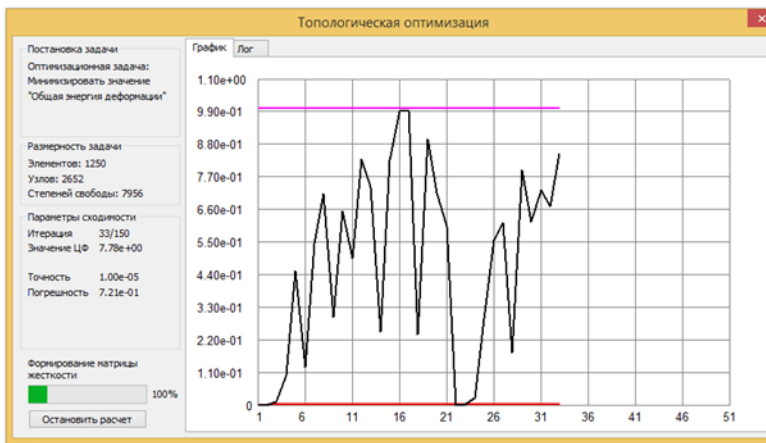
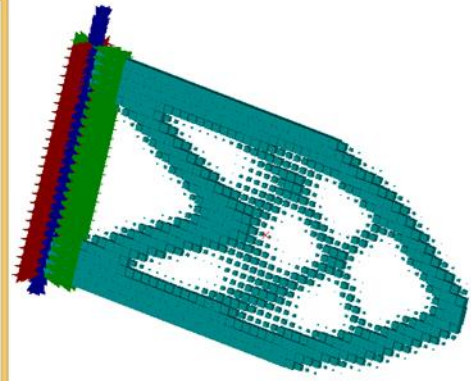
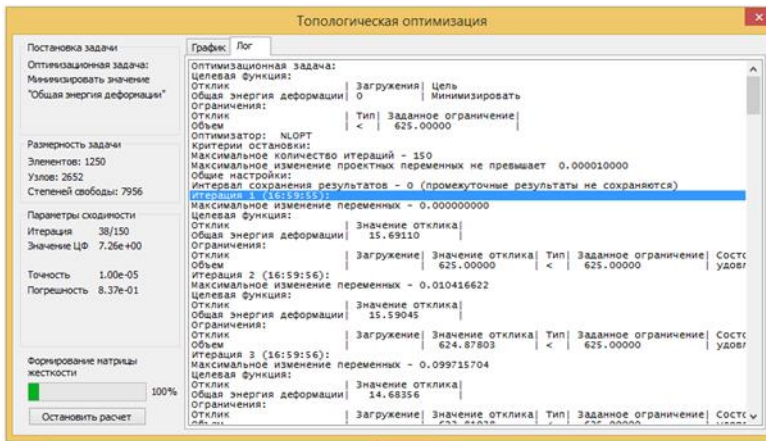


Рисунок 11.10 – Ход оптимизации

По завершении оптимизации в лог выводится сообщение о причине останова оптимизации, значение Ц.Ф. и так же об этом появляется уведомление над прогресс-баром.

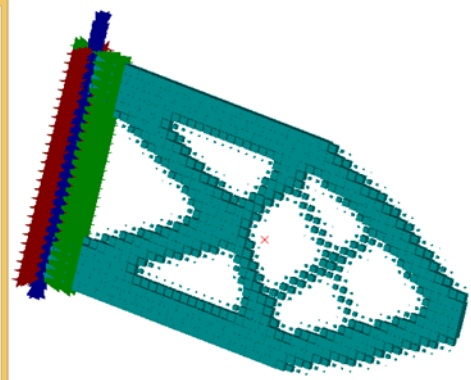
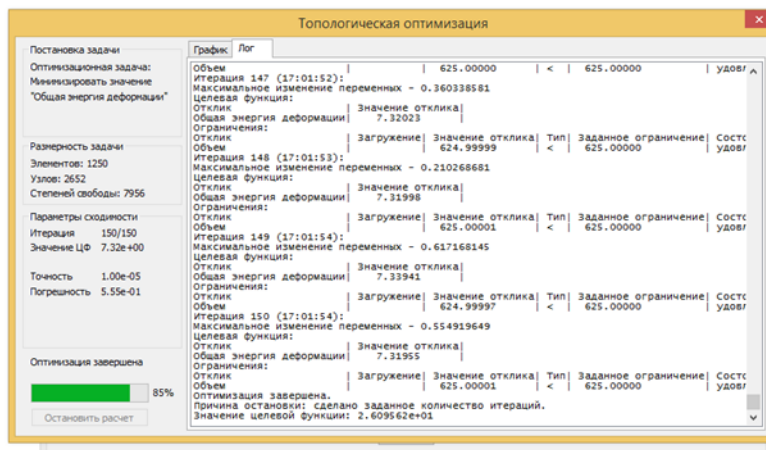


Рисунок 11.11 – Результат оптимизации.

## Глава 12. Расчет моделей с трещиной

Операция встроить трещину в модель (4 узловые тетраэдры)

### Краткие теоретические сведения

Функциональный компонент "Встроить трещину в модель (4 узловые тетраэдры)" предназначен для встраивания трещины заданных размеров в КЭ-модель. Он позволяет инженеру-расчетчику провести анализ конструкций на статическую и усталостную трещиностойкость на этапе эксплуатации и получить ответы на следующие вопросы:

- какая нагрузка является критической для заданных размеров трещины;
- какие размеры трещины являются критическими для заданной нагрузки;
- возможна ли дальнейшая эксплуатация конструкций с трещиной.

Напряжения в вершине трещины могут достигать критических значений (превышающих предел прочности в несколько раз), поэтому для анализа материала на трещиностойкость в вершине трещины используются инструменты линейной упругой механики разрушения (ЛУМР). В случае статического расчета:

- коэффициент интенсивности напряжений (КИН) для трех типов трещин (KI, KII, KIII);
- интенсивность выделения энергий для трех типов трещин (GI, GII, GIII);
- инвариантный J-интеграл.

В случае усталостного расчета:

- число циклов до разрушения по Парису (в случае, если характер изменения нагрузки гармонический);
- коэф. запаса для случайных нагружений (в случае, если характер изменения нагрузки гармонический или стохастический).

Типы трещин показаны на рисунке 12.1.

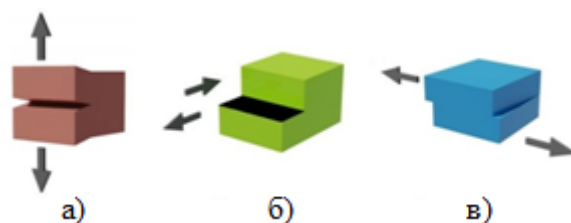


Рисунок 12.1 – Типы трещин. а) трещина отрыва, б) трещина поперечного сдвига, в) трещина продольного сдвига

Перечисленные параметры дают достоверные значения в том случае, если:

- зона пластичности у вершины трещины не превышает 20% длины трещины (маломасштабная текучесть). Т.е. поддерживаются, например,

такие материалы как чугун, дюраль, многие легированные стали, стекло, керамика, сухое дерево, бетон. Если зона пластичности у вершины трещины больше 20% длины трещины (крупномасштабная текучесть), то параметры ЛУМР использовать нельзя;

- относительному удлинению образца после разрыва  $\delta$  (%). Стандарт ГОСТ 25.506-85 допускает испытания на трехточечный изгиб образцы с  $\delta > 15\%$  (ориентировочно, пределом можно считать  $\delta < 20\%$ );
- разрушающее напряжение в нетто-сечении образца не превышает 0.8 предела текучести материала, определенного на гладких образцах.

Помимо ЛУМР функциональный элемент позволяет решать задачи, относящиеся к категории нелинейной механики разрушения. Это характерно для случаев, когда вышеперечисленные требования к свойству материала не выполняются (например, зона текучести у вершины трещины превышает допустимые 20%). Поддерживается физическая, геометрическая и общая нелинейность. В случае нелинейного расчета можно получить следующие параметры механики разрушения (MP):

- инвариантный J-интеграл.

Результатом анализа на трещиностойкость является отчет в текстовой форме, который включает в себя полученные значения параметров MP в каждом узле фронта трещины, а также информацию о том, является ли дальнейшая эксплуатация конструкций с трещиной безопасной или нет. Оценка безопасности проводится путем сравнения полученных значений КИН с критическим значением. Критическое значение КИН можно найти в нормативных справочниках (например, в электронной базе данных материалов Total Materia).

### **Вызов в APM Structure 3D**

Меню Инструменты | Операции с сеткой | Встроить трещину в модель (4-узловые тетраэдры).

Ниже представлено описание элементов диалогового окна "Встроить трещину в модель" (рисунок 12.2).

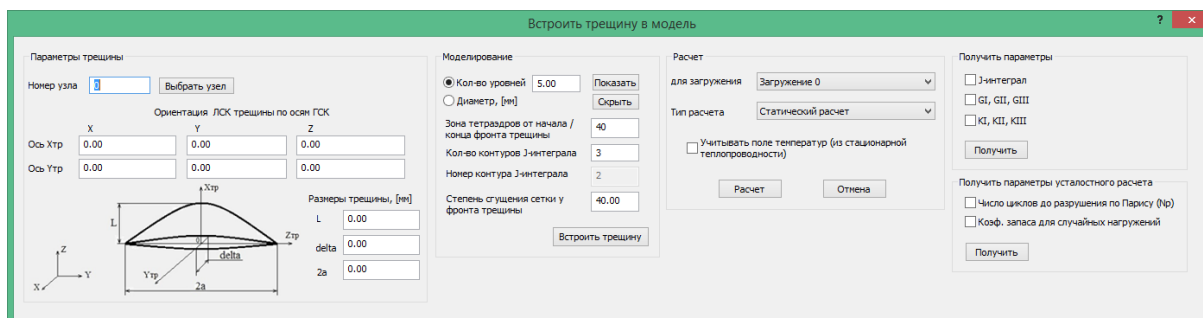


Рисунок 12.2 – Диалоговое окно "Встроить трещину в модель"

### 1) Блок Параметры трещины

1.1) Номер узла. Пользователь должен ввести номер узла КЭ-модели или нажать кнопку Выбрать узел и выбрать узел с помощью курсора мыши.

1.2) Ориентация ЛСК трещины по осям ГСК. Задается ЛСК трещины относительно ГСК (рисунок 12.3 а).

1.2.1) Ось Хтр. Задаёт вектор распространения трещины.

1.2.2) Ось Yтр. Задаёт вектор, перпендикулярный плоскости раскрытия трещины.

Угол между векторами Ось Хтр и Ось Yтр должен быть 90 градусов.

Ось Zтр ЛСК трещины вычисляется автоматически.

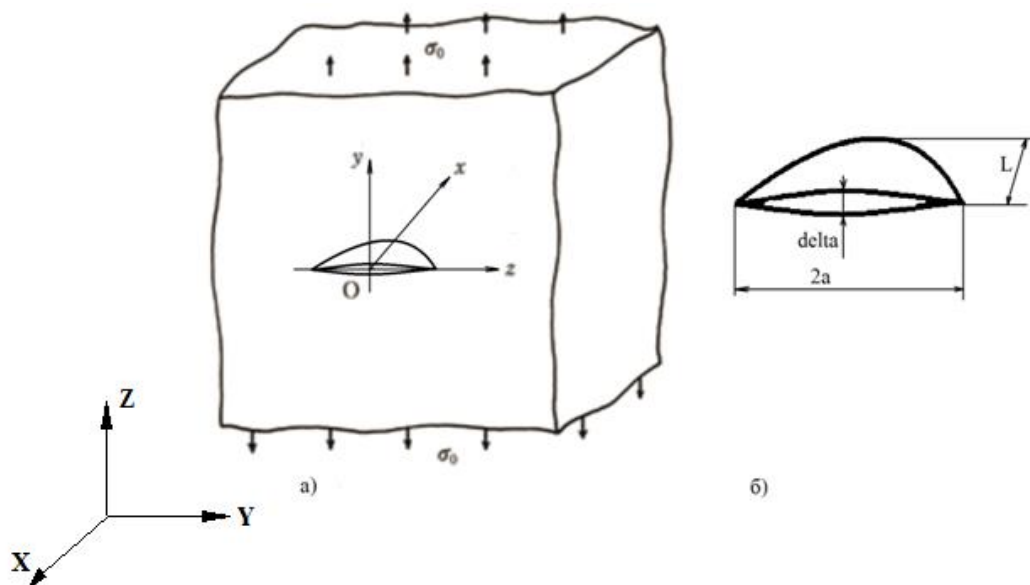


Рисунок 12.3 – Модель с трещиной. а) ЛСК трещины, б) обозначение размеров трещины

1.3) Размеры трещины, мм (рисунок 12.3 б).

1.3.1) Параметр L. Характеризует длину трещины.

1.3.2) Параметр delta. Характеризует раскрытие трещины.

1.3.3) Параметр 2a. Характеризует расширение трещины.

Размеры трещины не должны выходить за пределы области встраивания.

## 2) Блок Моделирование

2.1) Кол-во уровней. Количество уровней КЭ образуют область, которая будет использоваться для встраивания трещины. Каждый уровень включает в себя свою группу КЭ. Область должна быть намного больше габаритных размеров трещины, чтобы процедура встраивания трещины прошла успешно.

2.2) Диаметр, мм. Диаметр формирует область, которая будет использоваться для встраивания трещины. Область должна быть намного больше габаритных размеров трещины, чтобы процедура встраивания трещины прошла успешно.

Значения параметров Кол-во уровней и Диаметр, мм должны исходить из того, что в области с характерным размером порядка длины трещины размеры КЭ должны плавно возрастать.

Кнопки Показать и Скрыть используются для просмотра и скрытия выделенной области.

2.3) Зона тетраэдров от начала/конца фронта трещины. Отвечает за генерацию 4-узловых тетраэдров в области, ограниченной внешней и внутренней торцевой частью фронта трещины. Данной области две: 1-я расположена в начале фронта трещины, 2-я – в конце. Может принимать значения в диапазоне [4;50] (для поверхностей сложной геометрической формы рекомендуется значение не менее 40). Оставшуюся часть фронта трещины будут занимать правильно сгенерированные 6-узловые треугольные призмы и 8-узловые гексаэдры. Такой подход способствует к получению достоверных значений параметров ЛУМР.

2.4) Кол-во контуров J-интеграла. Используется для построения области вокруг фронта трещины. Кол-во контуров должно находиться в диапазоне [3;10]. Чем больше кол-во контуров, тем выше точность распределения полей напряжений и перемещений у вершины трещины (рекомендуемое значение – не меньше 6).

2.5) Номер контура J-интеграла. На заданном контуре J-интеграла производится вычисление параметров ЛУМР. В связи с применением у фронта трещины КЭ первого порядка, точность полей напряжений и перемещений может быть низкой, поэтому 1-й контур использовать не рекомендуется. Практика показывает, что достоверные параметры ЛУМР получаются на 2-м контуре интегрирования (используется по умолчанию без возможности изменения).

2.6) Степень сгущения сетки у фронта трещины. Показатель отвечает за сгущение сетки у фронта трещины. Может принимать значения в диапазоне [20; 200]. Размер КЭ у фронта трещины зависит от отношения длины трещины ( $L$ ) к показателю сгущения. Для

КЭ первого порядка оптимальный характерный размер рекомендуют брать от 1/200 длины трещины. Для данного диапазона выполняются условия:

- соотношение сторон элемента не превышает 4 к 1;
- вдоль линии фронта содержится более одного элемента на  $15^\circ - 30^\circ$  дуги.

Практика показывает, что достаточно использовать степень сгущения сетки 40 (оно принято по умолчанию).

Кнопка Встроить трещину позволяет встроить трещину с заданными размерами в КЭ-модель. В процессе встраивания трещины могут быть нарушены начальные и (или) граничные условия. Поэтому, перед встраиванием трещины выходит сообщение с предупреждением, показанное на рисунке 12.4. Используемая область для встраивания трещины перемещается в отдельный слой Трещина.

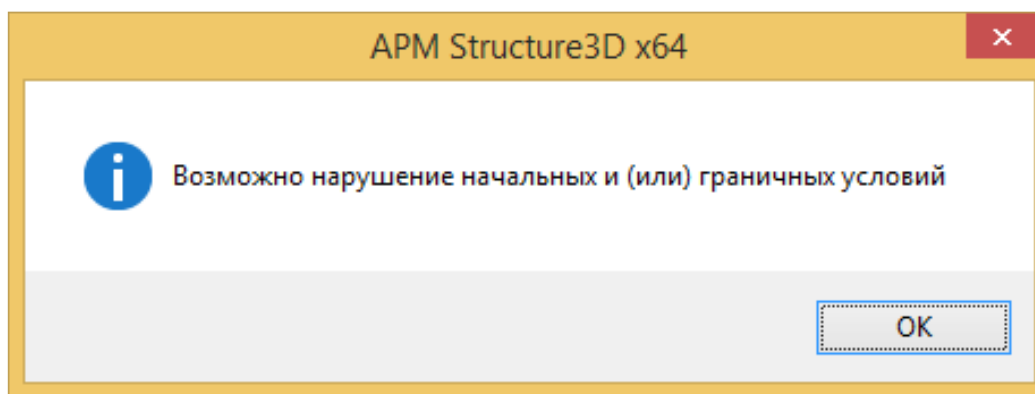


Рисунок 12.4 – Предупреждение перед встраиванием трещины в КЭ-модель

### 3) Блок Расчет

#### 3.1) для загрузки

Выбор загрузки или комбинации загрузок для проведения расчета.

#### 3.2) Тип расчета

Выбор типа расчета, в который входит: физическая нелинейность (т. течения), геометрическая нелинейность и общая нелинейность (т. течения).

#### 3.3) Учитывать поле температур (из стационарной теплопроводности)

Учет температурного влияния при решении задачи на трещиностойкость

### 4) Блок Вычислить параметры

#### 4.1) J-интеграл

J-интеграл характеризует кол-во энергии, накапливаемой у фронта трещины. Кол-во контуров задается в поле напротив Кол-во контуров J-интеграла. Энергия вычисляется на каждом контуре и является независимой.

4.2) GI, GII, GIII. Вычисление интенсивности выделения энергий для трех типов трещин (рисунок 12.1).



Для трещины 1-го типа

$$G_I = \frac{F_y \Delta V}{2A}$$

Для трещины 2-го типа

$$G_{II} = \frac{F_x \Delta U}{2A}$$

Для трещины 3-го типа

$$G_{III} = \frac{F_z \Delta W}{2A}$$

где:  $F_y, F_x, F_z$  – силы вдоль осей  $y, x, z$  в ЛСК трещины,

$\Delta V, \Delta U, \Delta W$  – разница перемещений вдоль осей  $y, x, z$  в ЛСК трещины,

$A$  – площадь грани КЭ.

4.3) KI, KII, KIII. Вычисление коэффициентов интенсивности напряжений для трех типов трещин (рисунок 12.1) для случая ПДС.

Для трещины 1-го типа:

$$K_I = \sqrt{2\pi} \frac{2G\Delta V}{(1+\nu)\sqrt{r}}$$

Для трещины 2-го типа:

$$K_{II} = \sqrt{2\pi} \frac{2G\Delta U}{(1+\nu)\sqrt{r}}$$

Для трещины 3-го типа:

$$K_{III} = \sqrt{2\pi} \frac{2G\Delta W}{\sqrt{r}}$$

где:  $G$  – модуль сдвига,  $r$  – длина ребра грани КЭ.

5) Блок Вычислить параметры усталостного расчета

5.1) Число циклов до разрушения по Парису ( $N_p$ )

Используется в случае простейшего многоциклового усталостного расчета (характер изменения нагрузки повторно-переменный). Расчет ведется с использованием формулы для трещин 1-го типа:

$$\frac{dl}{dN_p} = C(\Delta K)^n$$

где:  $C$  и  $n$  – свойства материала,

$dl$  – разница между начальной длиной  $l_0$  трещины и критической  $l_c$ ,

$\Delta K$  – размах коэффициента интенсивности напряжений.

Коэффициент  $n$  принимает значение от 2 до 7 (чаще равен 4). Данные коэффициенты можно найти в наших и зарубежных справочниках (например, в электронной базе данных материалов Total Materia).

Параметры усталостного расчета задаются в окне "Параметры усталостного расчета", показанном на рисунке 12.5. Команда меню Расчеты | Параметры усталостного расчета.

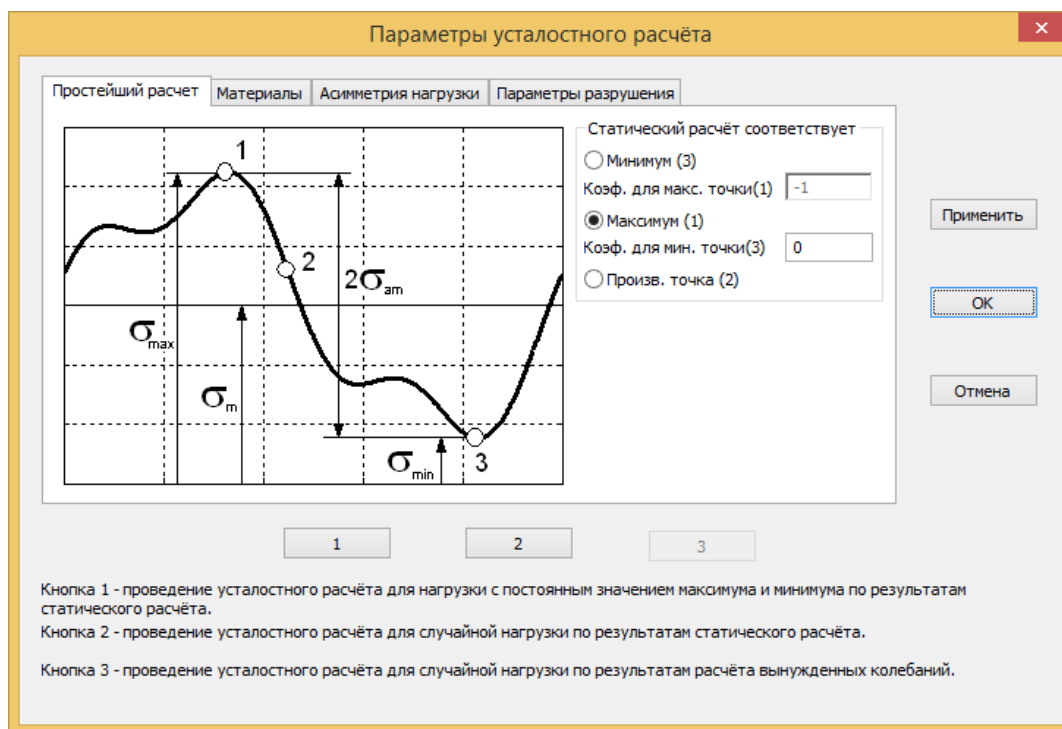


Рисунок 12.5 – Диалоговое окно "Параметры усталостного расчета"

## 5.2) Коэф. запаса для случайных нагружений

Используется в случае случайного (стохастического) многоциклового усталостного расчета. На первом этапе вычисляется фактор повреждаемости по формуле:

$$DF = \sum_{i=1}^I \frac{0,5m}{N_{pi}}$$

где: 0,5 – полуцикл,  $N_{pi}$  – число циклов до разрушения по Парису,  $I$  – общее количество полуциклов,  $m$  – коэффициент запаса по усталостной прочности.

Коэффициент запаса по усталостной прочности выводится из формулы выше при  $DF = 1$  (происходит разрушение конструкций)

$$m = \frac{1}{\sum_{i=1}^I \frac{0,5}{N_{pi}}}$$

Параметры случайного усталостного расчета задаются в окне "Случайная усталостная нагрузка для загрузений" (рисунок 12.6). Команда меню Нагрузки | Случайные нагружения.

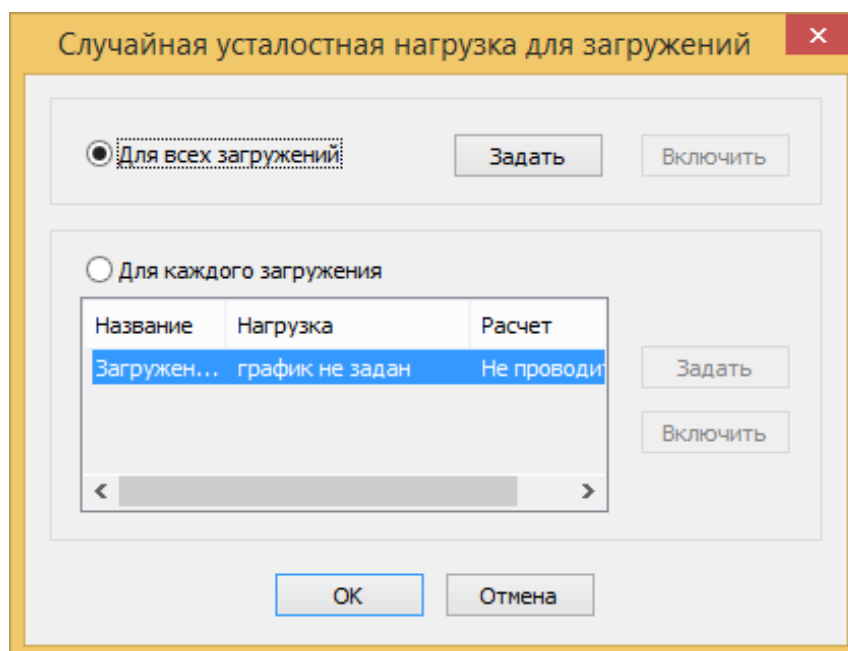


Рисунок 12.6 – Диалоговое окно "Случайная усталостная нагрузка для загрузений"

Кнопка Вычислить, в зависимости от блока, позволяет вычислить и сохранить выбранные параметры ЛУМР на диске ПК в виде текстового файла (рисунок 12.7). По умолчанию имя сохраняемого файла совпадает с именем исходного файла КЭ-модели. Аббревиатура LEFM, используемая при сохранении файла результатов, расшифровывается как "Linear Elastic Fracture Mechanics" – линейная упругая механика разрушения.

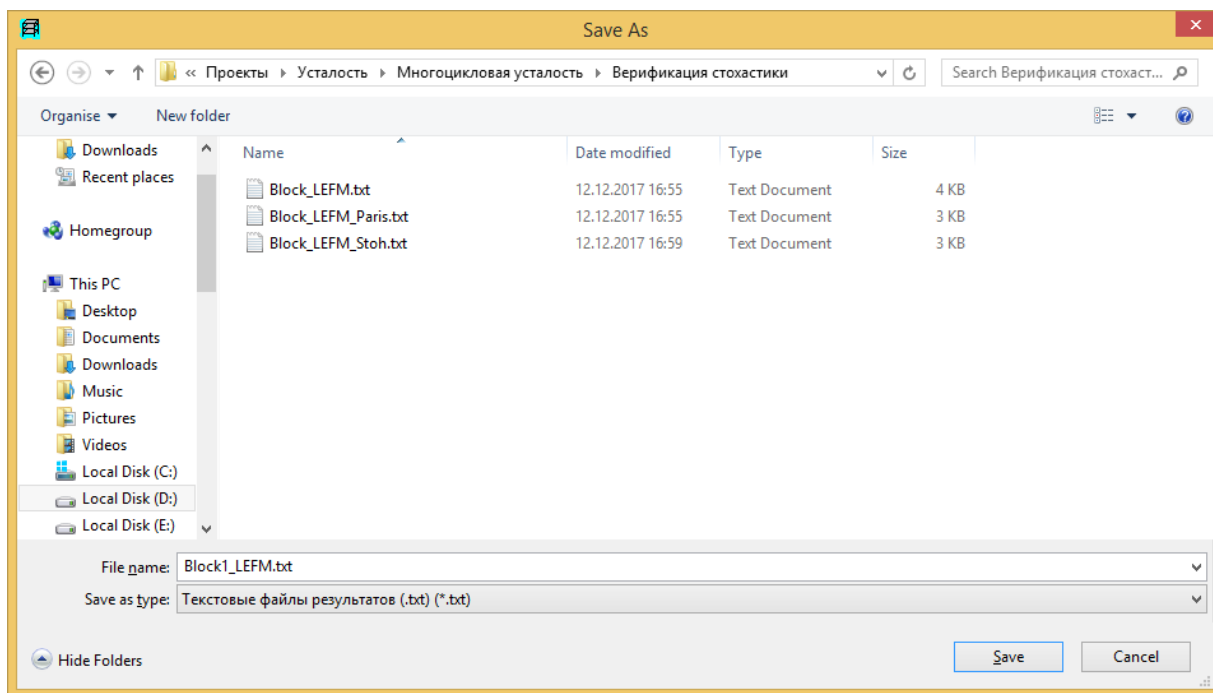


Рисунок 12.7 – Сохранение результатов

Об успешном выполнении операции вычисления и записи выбранных параметров ЛУМР свидетельствует окно с сообщением, показанное на рисунке 12.8.

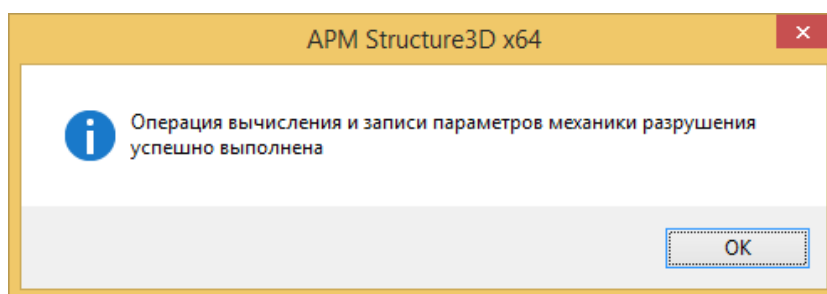


Рисунок 12.8 – Сообщение об успешном завершении операций

Фрагмент файла результатов, полученных значениями КИН в каждом узле фронта трещины показан на рисунке 12.9.

Параметры моделирования:

-----  
Кол-во уровней: 7  
Зона тетраэдров от начала/конца фронта трещины: 40  
Кол-во контуров J-интеграла: 4  
Степень сгущения сетки у фронта трещины: 25  
=====

Коэффициент интенсивности напряжений (КИН), МПа\*м<sup>1/2</sup>

Номер узла	KI	KII	KIII
130316	471.228	2.70261	-2.71578
130313	498.854	2.65917	-1.38644
130310	524.265	2.24343	-0.455226
130312	545.701	2.1756	-0.480493
130302	562.304	1.94895	-0.796295
130315	574.404	1.12966	-0.756914
...	...	...	...
130398	1619.43	-1.06862	-0.0466521
130420	1625.51	-1.0618	-0.075077
130439	1630.75	-1.19971	0.0505017
130410	1634.58	-1.46132	0.0548582
130445	1637.06	-1.29701	-0.00782679
130392	1638.35	-1.01574	0.00191277
130402	1638.62	-0.810204	0.00829156
130440	1637.93	-0.532395	0.024574
130427	1636.17	-0.36821	0.0930438
130412	1633.34	-0.180017	0.120362
130441	1629.49	-0.0231308	0.24975
130423	1624.31	0.146089	0.233639
130442	1618.01	0.38321	0.297013
...	...	...	...
130567	568.572	-4.57923	-0.553104
130544	552.576	-4.40903	-1.08851
130528	536.073	-3.63198	-1.57612
130525	516.834	-1.86977	-1.66034
130542	496.185	0.015037	-1.56594
130576	474.483	0.996608	-1.15773

Максимальное значение, KI<sub>max</sub>: 1638.62 в узле номер: 130402

Максимальное значение, KII<sub>max</sub>: 2.70261 в узле номер: 130316

Максимальное значение, KIII<sub>max</sub>: 2.47948 в узле номер: 130552

\*\*\*\*\*  
\*\*\* Вывод \*\*\*

Критическое значение коэффициента интенсивности напряжений, KI<sub>c</sub>: 142.5 МПа\*м<sup>1/2</sup>

KI<sub>c</sub> <= KI<sub>max</sub> - эксплуатация конструкций с трещиной при заданных условиях нагружения считается опасной

Рисунок 12.9 – Фрагмент файла результатов значения КИН в каждом узле фронта трещины

## Глава 13. Вспомогательные инструменты ввода исходных данных: редакторы функций, таблиц, выражений

### Редактор функций

Редактор функций APM\_FNED предназначен для задания и редактирования кусочно-непрерывных функций. Редактор позволяет как графическое, так и аналитическое задание функции. В данной главе представлен справочник команд редактора функций, а также методику графического и аналитического задания фрагментов функции.

График нагрузки задается в виде зависимости коэффициента пропорциональности нагрузки от времени.

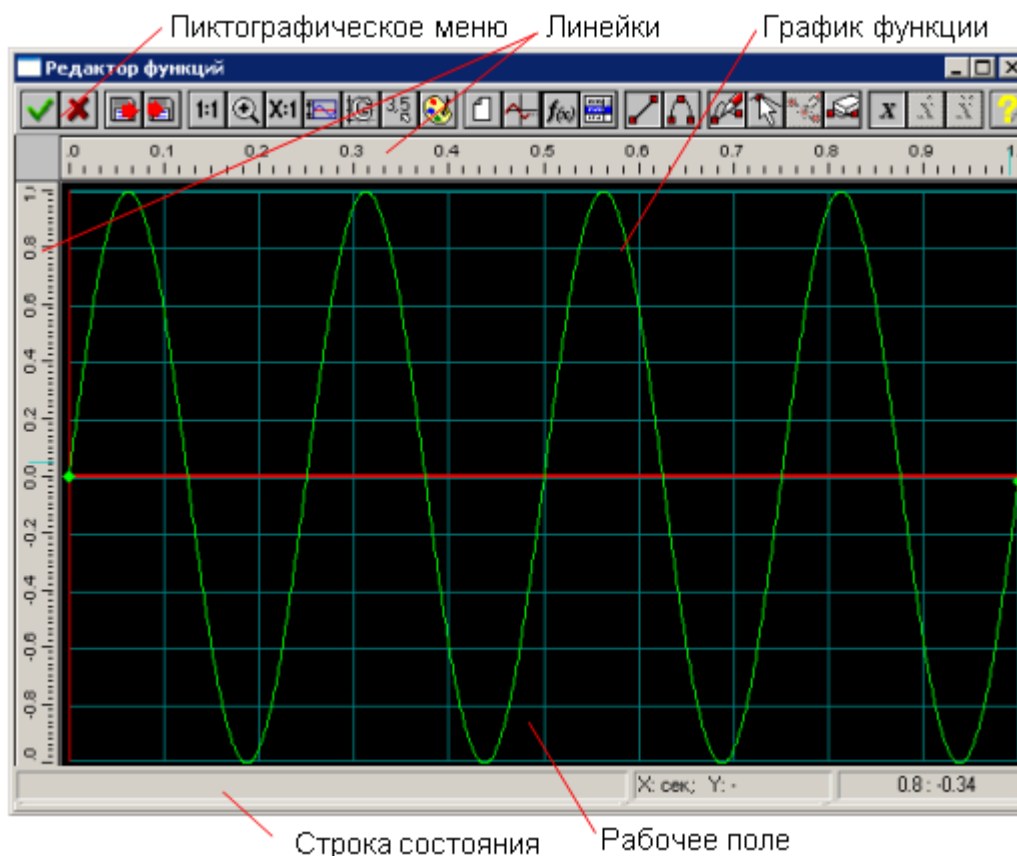


Рисунок 13.1 – Общий вид редактора функций








В строке состояния отображается справочная информация по текущей команде, размерность координат (X и Y) и текущие координаты курсора мыши.

### Справочник команд редактора функций

Управлять командами редактора можете с помощью пиктографического меню.

Таблица – Команды редактора функций.

	Название команды	Описание команды
	Ок	Завершение редактирования функции и возврат в основную программу, с сохранением всех изменений.
	Отмена	Выход в основную программу без сохранения изменений.
	Открыть	Открыть функцию в формате *.fnd или файл данных с разделителями, созданный в текстовом редакторе или в MS Excel.
	Сохранить	Сохранить функцию в формате *.fnd или файл данных с разделителями для вставки, например в таблицу Excel.
	Масштаб 1:1	Установка масштаба 1:1, например после команды Увеличить.
	Увеличить	Увеличить фрагмента графика прямоугольной областью до окна.
	Масштаб	Задание масштаба графика по вертикали в диалоговом окне.
	Пределы	Задание пределов изменения графика по оси X и Y.
	Сетка	Задание шага сетки по оси X и Y и типа сетки в диалоговом окне.
	Шаг курсора	Задание шага курсора по оси X и Y в диалоговом окне.
	Палитра	Настройка цветов отдельных элементов редактора и графика.
	Новая функция	Удаление существующего графика и создание нового.
	Продлить функцию	Продлить функцию до правого предела добавлением горизонтальной линии.
	Аналитическое задание функции	Аналитическое задание функции вида $Y = f(X)$ в определенном диапазоне аргумента X в диалоговом окне.
	Таблица	Задание точек графика по координатам.
	Линия	Выбор объекта Линия для добавления или встраивания.
	Сплайн	Выбор объекта Сплайн для добавления или встраивания.
	Добавить объект	Режим добавления нового объекта (линия или сплайн).

	Название команды	Описание команды
	Редактировать функцию	Режим редактирования; позволяет изменять положение начальных и конечных точек линии, сплайна и аналитической функции.
	Вставить объект	Встроить новый объект (линия или сплайн) между двумя уже существующими.
	Удалить объект	Режим удаления объектов.
	Функция	Режим задания функции.
	Первая производная	Режим задания первой производной функции, в APM Structure3D не используется.
	Вторая производная	Режим задания второй производной функции, в APM Structure3D не используется.
	Справка	Вызов содержания справки по графическому редактору функций.

### Настройки редактора

Для удобства работы с редактором функций предусмотрено изменение пользовательских настроек. Для изменения настроек используются следующие команды: Масштаб, Пределы, Сетка, Шаг курсора, Палитра. При этом следует отметить, что настройки «по умолчанию» является достаточно удобными для построения наиболее распространенных графиков функций.

#### *Масштаб*

Команда Масштаб вызывает диалоговое окно, в котором вы можете задать масштаб графика по вертикали. Это может быть удобно в случае, когда установленные вертикальные пределы больше, чем это нужно. Для отображения какого-либо фрагмента графика в рабочем окне можно воспользоваться командой Увеличить. Для этого необходимо после активации команды просто выделить фрагмент графика рамкой. Для отображения графика в масштабе 1:1 удобно использовать команду Масштаб 1:1.

#### *Пределы*

Для отображения необходимого фрагмента графика в окне редактора функций служат пределы по X и по Y. Команда Пределы вызывает диалоговое окно, в котором вы можете задать горизонтальные (по X) и вертикальные (по Y) пределы для графика.



### ***Сетка***

Для лучшего визуального контроля при задании графика функции в поле редактора может выводиться вспомогательная прямоугольная сетка. Команда Сетка вызывает диалоговое окно, в котором вы можете задать шаг сетки по X и по Y, а также тип сетки.

### ***Шаг курсора***

При работе с редактором имеется возможность регулировать точность задания точек графика функций. По умолчанию используется точность равная 0,1 единиц. Это значит, что все координаты точек графика будут округляться до 0,1 единиц. Команда Шаг курсора вызывает диалоговое окно, в котором вы можете задать шаг курсора по X и по Y.

### ***Палитра***

Палитрой называется совокупность цветов фона, линий вспомогательной сетки, осей, графика. Для настройки и выбора схемы палитры используется команда Палитра. В диалоговом окне настройки палитры выбор элемента интерфейса для настройки осуществляется из списка «Элемент». Для задания цвета выбранного элемента нажмите на кнопку «Определить...». Изменения настроек цветов отображаются в верхней части диалогового окна. Пользователь может сохранить схему палитры, нажав кнопку «Сохранить...» и затем ввести имя новой схемы палитры. В дальнейшем переключение между схемами осуществляется посредством выбора нужной схемы из списка «Палитра». Для удаления схемы палитры воспользуйтесь кнопкой «Удалить».

### **Задание графика функции**

График функции может быть задан разными способами:

1. По координатам точек, если точно известны численные данные.
2. Функцией  $Y = f(X)$ , если известно аналитическое выражение для функции.
3. По объектам (участкам графика): линия, сплайн, аналитическая функция.  
Каждый объект задается отдельно аналитически или графически (кроме аналитической функции).

Рассмотрим каждый из способов задания подробнее.

### ***Задание графика по координатам точек***

Если известны численные данные, то для задания функции удобно использовать команду Открыть, которая вызывает диалоговое окно загрузки данных в следующих форматах. Форматы (\*.prn) и (\*.csv) могут быть созданы в табличном редакторе, например MS Excel.

### ***Задание графика аналитически $Y = f(X)$***

Кнопка Аналитическое задание функции вызывает диалоговое окно, в котором можно задать аналитическую функцию в определенном диапазоне аргумента  $X$ . В поле ввода « $f(x)=$ » этого диалога нужно задать функциональную зависимость. Диапазон значений аргумента (в мм) указывается в поле ввода «До точки». В поле ввода «От точки» (левая граница диапазона изменений аргумента) в начале сеанса работы с рассматриваемым редактором по умолчанию стоит ноль. После завершения ввода текущего участка функциональной зависимости и переходе к следующему участку в поле «От точки» появится значение правой границы координаты  $X$  уже введенного участка. Затем нужно задать диапазон изменения аргумента для этого участка (в поле «До точки»), и т. д.

В процессе добавления нового участка функциональной зависимости поле ввода «От точки» будет неактивным, активным оно станет в случае редактирования данного участка функции.

Для задания стандартной функциональной зависимости достаточно щелкнуть правой кнопкой мыши при нахождении указателя мыши в поле ввода функциональной зависимости. При этом открывается контекстное меню, в котором можно выбрать стандартную функцию и записать ее в поле ввода. Такую операцию можно проводить несколько раз, а затем записанные функциональные зависимости можно уточнить и отредактировать.

При включении опции Конвертировать в сплайн, при нажатии кнопки ОК, аналитическая функция будет конвертирована в сплайн с указанным шагом дискретизации. Так как для сплайна существует ограничение по количеству точек, при задании слишком мелкого шага, будет выводиться соответствующее предупреждение. При конвертации в сплайн будут сняты ограничения, которые вводятся при наличии аналитической функции, но при этом потеряется точность.

### ***Синтаксис аналитических выражений***

Приоритет операций обычный: 1) функции; 2) арифметические операции (в порядке перечисления).

В аналитическом выражении Вы можете использовать следующие операторы и функции (аргументом функции может быть любое выражение в скобках).

**Функции округления:**

ceil(x) – округление к минимальному целому, большему чем аргумент;

floor(x) – округление к максимальному целому, меньшему чем аргумент;

abs(x) – получение абсолютной величины.

**Тригонометрические функции:**

(аргумент x должен быть в радианах)

sin(x) – синус;

cos(x) – косинус;

tan(x) – тангенс;

atan(x) – арктангенс;

acos(x) – арккосинус;

asin(x) – арксинус.

**Операции:**

\*\* – возвести в степень;

\* – умножение;

/ – деление;

% – получение остатка;

+ – сложение;

- – вычитание.

**Другие функции:**

sqrt(x) – корень квадратный.

**Функции преобразования:**

rad(x) – значение аргумента в радианах;

grad(x) – значение аргумента в градусах.

**Гиперболические функции:**

sinh(x) – гиперболический синус;

cosh(x) – гиперболический косинус;

tanh(x) – гиперболический тангенс;

**Логарифмические функции:**

log(x) или ln(x) – натуральный логарифм;

log10(x) или lg(x) – десятичный логарифм;

log2(x) – логарифм по основанию 2.

**Предопределенные константы:**

M\_PI – число  $\pi = 3.142$ ;

M\_EXP – число  $e = 2.718$ .

**Примеры выражений:**

$f(x) = x^{**2} + 6.56 * x - 3.12$

$f(x) = \sin(x)$

$f(x) = \sin(\text{rad}(x))$

$f(x) = \sin(x * M\_PI / 180)$

***Аналитическое задание объектов функции***

График функции может быть задан по объектам (участкам графика): линия, сплайн, аналитическая функция. Рассмотрим аналитическое задание объектов функции.

Нажатие кнопки Таблица приводит к открытию диалогового окна Функция. В этом диалоговом окне перечислены заданные объекты с указанием граничных координат. В отличие от обычных диалоговых окон оно является немодальным, т.е. пользователь одновременно может работать и с диалоговым окном, вводя в него данные в табличном виде (аналитическое задание), которые будут одновременно отображаться в поле редактора функции, и наоборот, добавлять объект в поле редактора (графическое задание), данные о котором будут помещены в таблицу диалогового окна Функция.

Кнопка **Добавить...** в диалоговом окне **Функция** позволяет добавить новый объект в **КОНЕЦ** уже созданной функции, т. е. поместить его после последнего существующего объекта функции. Добавить можно любой объект (линию, сплайн или аналитическую функцию) из списка, который появляется в контекстном меню при нажатии на кнопку **«Добавить...»**. При выборе одного из предложенных в меню объектов открывается соответствующее диалоговое окно для ввода значений добавляемого объекта.

При добавлении линии будет открыто диалоговое окно **Линия**. Для задания линии достаточно ввести координаты двух точек. Поскольку новая линия будет присоединена к предыдущему объекту, то необходимо ввести только координаты конечной точки в полях ввода **«До»**. После нажатия кнопки **«ОК»** добавляемый отрезок отрисовывается в поле редактора функции, а сведения о нем будут добавлены в таблицу окна **Функция**.

При добавлении сплайна открывается соответствующее диалоговое окно. Сплайн задается по точкам. Чтобы создать сплайн минимальной длины, требуется задать не менее четырех точек. Поскольку сплайн добавляется в конец уже определенной функциональной зависимости, то координаты последней точки функции становятся первой точкой сплайна, и это поле ввода неактивно — его изменение недоступно. Нажатие кнопки **«Добавить»** в окне **Сплайн** открывает дополнительное диалоговое окно для ввода координат новой точки. После ввода координат нужно нажать на клавиатуре клавишу **«Enter»**, а для выхода из этого режима — клавишу **«Esc»**.

Введенные координаты точек сплайна можно изменять. Для этого выделите подлежащую изменению строку таблицы с координатами точки, нажмите кнопку **«Изменить»** и в открывшемся диалоговом окне откорректируйте значения координат.

Кнопка **«Вставить»** в том же окне **Сплайн** позволяет вставить новую точку сплайна **ПЕРЕД** выделенной (за исключением первой точки сплайна, перед которой вставить новую точку нельзя). При нажатии на кнопку **«Вставить»** откроется диалоговое окно для ввода координат новой точки. После ввода координат нужно нажать на клавиатуре клавишу **«Enter»**, а для выхода из этого режима — клавишу **«Esc»**. Нажатие кнопки **«Удалить»** в том же окне **Сплайн** приведет к удалению выделенной точки из сплайна. Для завершения ввода сплайна нажмите кнопку **«ОК»** в окне **Сплайн**.

Добавление аналитической функции осуществляется при выборе соответствующего пункта из контекстного меню по такой же схеме, которая была приведена в разделе **Задание графика функцией  $Y = f(X)$** .

Кнопка Вставить... в диалоговом окне Функция позволяет вставить новый объект ПЕРЕД текущим объектом (выделенным полосой). Аналитическую функцию нельзя вставить. При наличии аналитической функции объекты вставлять нельзя.

При вставке нового объекта между двумя существующими за первую точку нового объекта берется конечная точка предыдущего (она записывается в неактивное первое поле введения), а координата  $Y$  последующего объекта изменяется таким образом, чтобы соединиться с концом добавляемого участка. Это обеспечивает непрерывность задаваемой функции. Кроме того, уже введенные участки функции, которые будут находиться после добавляемого участка, сдвинутся по координате  $X$  на величину вновь вводимого участка. Если будет предпринята попытка ввода слишком протяженного участка (такого, что уже имеющиеся участки выйдут за определенные границы функции), пользователю будет выдано сообщение о невозможности этого действия. Процесс встраивания новых объектов аналогичен добавлению, описанному выше.

Кнопка Изменить... в диалоговом окне Функция позволяет редактировать текущий объект. При наличии в графике аналитической функции существуют некоторые ограничения по редактированию объектов.

Кнопка Удалить в диалоговом окне Функция позволяет удалить текущий объект. Перед удалением редактор запросит подтверждение на проведение этого действия). В процессе удаления объекта начало последующего (за удаляемым) объекта получит координату  $Y$ , равную соответствующей координате конца предыдущего объекта, и вся последующая часть функции сдвинется по координате  $X$  влево на величину удаляемого объекта.

### ***Графическое задание объектов функции***

Графически могут быть задана линия или сплайн. Графическое задание аналитических функций невозможно. Выбор объекта для добавления или встраивания осуществляется с помощью кнопок Линия и Сплайн.

Далее необходимо выбрать, что Вы хотите сделать с новым объектом: ДОБАВИТЬ в конец или ВСТАВИТЬ между уже созданными. Кнопка Добавить служит для добавления новых объектов (линии или сплайна). В зависимости от того, какая именно из кнопок выбора объекта в данный момент нажата, будет добавляться либо линия, либо сплайн.

С помощью этого же режима можно начинать построение функциональной зависимости. Рассмотрим более подробно, как происходит создание первого объекта функциональной зависимости или добавление линии к уже существующей функции.

а) Создание начального объекта. Первая точка встраиваемого объекта (линии или сплайна) должна иметь нулевую координату по  $X$ , в отличие от значения координаты  $Y$ .

Для того чтобы упростить ввод начальной точки отрезка или сплайна, щелкните левой кнопкой мыши на точке, имеющей координату  $Y$ , совпадающую с соответствующей координатой начальной точки объекта, но ненулевую координату  $X$ . Одновременно в той точке, где находился указатель мыши, появится вторая точка, которая, в отличие от первой, будет подвижной до тех, пока нажата левая кнопка мыши. Отпустив эту кнопку, мы зафиксируем или вторую точку отрезка, или вторую точку сплайна.

В том случае, если начальным объектом служит сплайн, то первым нажатием левой кнопки мыши вводим первую точку сплайна с координатой  $X = 0$ , а отпуская кнопку мыши уточняем положение второй точки (здесь действует то же правило, что и для линии). Затем следующим щелчком мыши вводим третью точку, и т. д. (не менее четырех точек), а для завершения ввода сплайна следует нажать «ПРОБЕЛ» на клавиатуре.

б) Добавление объекта к уже имеющемуся объекту. Порядок работы аналогичен созданию нового объекта: нажатием левой кнопки мыши новый объект присоединяется к концу предыдущего объекта, а отпуская кнопку мыши мы фиксируем вторую точку добавляемого объекта.

в) Редактирование объектов. Кнопка Редактировать функцию позволяет изменять положение начальных или конечных точек введенных отрезков, а также сплайна и аналитической функции. Для редактирования узлов между объектами следует подвести курсор мыши к выбранному узлу, щелкнуть на нем левой кнопкой мыши и, держа ее нажатой, перемещать данный узел. Если требуется отменить редактирование положения узла, то, не отпуская левую кнопку мыши, нажмите правую кнопку, тем самым редактирование будет отменено. Отпустив левую кнопку, установите узел в новом положении.

На этом заканчивается редактирование узлов между отрезками. В том случае, когда хотя бы одним из объектов, между которыми нужно отредактировать узлы, является сплайн, после смещения общей точки оба объекта остаются выделенными

(синими в окне редактора) и могут быть отредактированы. Окончание редактирования (снятие выделения) производится нажатием кнопки «ПРОБЕЛ» на клавиатуре.

Собственно редактирование сплайна происходит следующим образом. Прежде всего необходимо подвести курсор мыши к сплайну и щелкнуть на нем. Сплайн, как объект функции, выделится. Далее, щелкнув на какой-либо точке сплайна левой кнопкой мыши, можно создать новую точку на сплайне, а ее дальнейшее перемещение осуществлять смещением указателя мыши при нажатой левой кнопке. Сплайн будет отображаться с учетом введения этой новой точки. Отпустив левую кнопку мыши, зафиксируем положение точки. Для завершения редактирования сплайна нажмите клавишу «ПРОБЕЛ» на клавиатуре. Удаление точки на сплайне происходит после щелка на ней правой кнопкой мыши.

Для отмены создания новой точки на сплайне нажмите правую кнопку мыши, не отпуская левую, при этом произойдет возврат в исходное состояние. Если новая точка на сплайне уже создана (была отпущена левая кнопка мыши), то для возврата в исходное состояние нужно одновременно нажать кнопку «Ctrl» на клавиатуре и правую кнопку мыши.

При редактировании аналитической функции сначала выделите этот объект, щелкнув по нему указателем мыши, а потом в открывшемся диалоговом окне Аналитическая функция внесите необходимые изменения в заданную ранее аналитическую зависимость.

г) Вставка нового объекта между двумя существующими. Кнопка Вставить объект позволяет встроить новый объект между двумя уже существующими. Такая возможность имеется только в том случае, если уже созданная функциональная зависимость не заполнила весь временной интервал, границы которого заданы пользователем. Если функциональная зависимость определена для всего интервала времени, то возможности вставки нового объекта нет, и кнопка Вставить объект становится неактивной. Для того чтобы иметь возможность встроить новый объект, необходимо предварительно удалить какого-либо старый объект.

У пользователя есть возможность вставить между двух объектов или линию, или сплайн, но не аналитическую функцию. Для встраивания нового объекта нужно выбрать тип встраиваемого объекта (линия или сплайн) и после нажатия кнопки Вставить объект щелкнуть левой кнопкой мыши на точке, являющейся границей объектов, между которыми следует вставить линию или сплайн. После нажатия левой кнопки мыши

созданная ранее функциональная зависимость разорвется. Величина разрыва по оси X будет равна величине интервала времени, на котором функция была не задана.

Чтобы встроить линию в образовавшийся разрыв, нажмите левую кнопку мыши в точке, определяющей конец этой линии. Начало отрезка автоматически присоединится к концу предыдущего участка функциональной зависимости, а конец можно смещать. При отпускании левой кнопки мыши положение конца линии фиксируется, и к нему автоматически присоединяется начало следующего участка функциональной зависимости. Причем у начальной точки следующего участка изменяется координата Y. Изменение координаты будет иметь место и для сплайна, и для линии.

Встраивание сплайна в разрыв функции происходит с помощью задания не менее четырех точек. Для удаления уже созданных в процессе ввода сплайна точек (точки сплайна отрисованы как динамический объект синего цвета) и возврата в исходное состояние следует одновременно нажать кнопку «Ctrl» на клавиатуре и правую кнопку мыши.

Ввод сплайна завершается нажатием клавиши «ПРОБЕЛ» на клавиатуре. В этом случае первая точка последующего объекта присоединится к последней точке встраиваемого сплайна или линии.

Замечание. Если размеры встроенного объекта меньше свободного интервала, то после завершения операции встраивания останется некоторый интервал времени, для которого функциональная зависимость не определена. В этом интервале времени можно сохранить последнее значение функции, добавив горизонтальный отрезок нажатием кнопки «Продлить функцию».

д) Удаление объектов. Кнопка Удалить объект позволяет удалить один из введенных объектов функциональной зависимости. Выбранный объект (линия, аналитическая функция или сплайн) после щелчка по нему левой кнопки мыши удаляется, и первая точка линии или сплайна, следующая за удаляемым объектом, присоединяется к последней точке того объекта, который предшествует удаляемому. Если последующим объектом является аналитическая функция, то происходит ее смещение влево по горизонтальной оси, а разрыв по вертикальной оси дополняется вертикальным отрезком.

### ***Сочетание графического и аналитического задания функции***

Сочетание графического и аналитического задания функции позволяет использовать удобство и простоту графического задания и точность аналитического.



Если при графическом задании функции нажатием кнопки Таблица вызвать диалоговое окно Функция, то вновь создаваемые и добавляемые объекты будут отображаться в этом окне.

Пользователь одновременно может работать и с диалоговым окном, вводя в него данные в табличном виде (аналитическое задание), которые будут одновременно отображаться в поле редактора функции, и наоборот, добавлять объект в поле редактора (графическое задание)

С помощью этого же окна можно отредактировать координаты точек отрезка или сплайна. Для этого нужно выделить строку с объектом и нажать кнопку «Изменить» или сделать двойной щелчок на строке, а затем в полях открывшегося окна отредактировать координаты точек.

### **Сохранение графика функции**

После того, как график функции задан его удобно сохранить для дальнейшей работы. Для этого служит команда Сохранить. В появившемся диалоговом окне вы должны указать путь сохранения, имя и тип файла. Система позволяет сохранить данные в следующих форматах.

### **Редактор таблиц**

Некоторые виды нагрузок (например, тепловые и др.) могут быть заданы с помощью функции нескольких переменных, заданной в виде таблицы. При задании нагрузки необходимо выбрать Таблица и нажать кнопку Редактировать. В появившемся диалоговом окне можно создать новую таблицу или открыть существующую.

При создании таблицы необходимо указать количество измерений от 1 до 4 (т.е. количество независимых переменных) и задать количество значений по каждому измерению. Количество значений должно быть больше двух для каждого измерения. В результате будет создана таблица с указанными параметрами. Если указано одно измерение, то будет создан вектор-столбец с указанным количеством строк.

При выборе двух измерений будет создана прямоугольная матрица. Так на рисунке выше приведен пример создания матрицы из 2-х строк и 5-ти столбцов.

При количестве измерений равным 3 создается трехмерная матрица, содержащая в каждой плоскости прямоугольную матрицу заданных размеров.

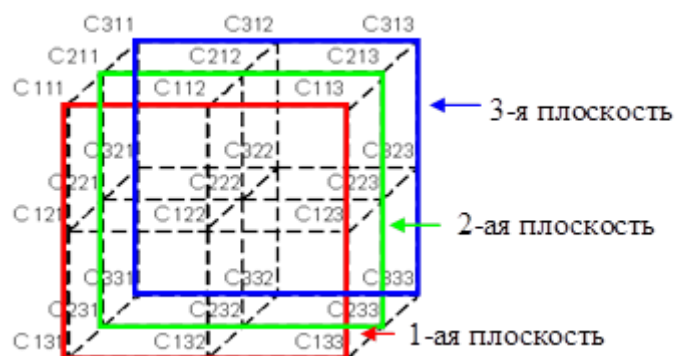


Рисунок 13.2 – Трехмерная матрица

Нумерация каждого элемента 3-D матрицы начинается с указания номера плоскости, затем номер строки и номер столбца. Четыре измерения позволяют создать 4-х мерную матрицу, состоящую из блоков, каждый из которых содержит трехмерную матрицу.

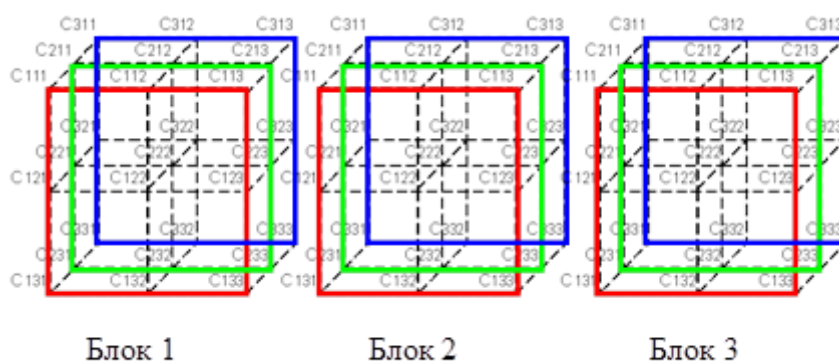


Рисунок 13.3 – Четырехмерная матрица, состоящая из трех блоков

Нумерации элементов четырехмерной матрицы аналогична: сначала указывается номер блока, затем плоскость, строка и столбец. При создании таблицы количество элементов по каждому измерению должно быть не меньше 2.

После создания таблицы ее необходимо заполнить.

### Заполнение и редактирование таблицы

В выпадающем списке для каждого измерения (строки, столбцы и т.д.) необходимо выбрать независимую переменную из списка доступных. После выбора независимой переменной в ячейках будут отображаться единицы измерения для каждой величины. Далее ввести значения независимых переменных (по строкам и столбцам) в соответствующие ячейки таблицы (выделены цветом). В случае плоскостей и блоков дважды щелкнуть по элементу или нажать на кнопку «Изменить» и ввести его значение в появившемся окне.

После ввода значений независимых переменных необходимо заполнить значения функции (белые клетки в таблице). Редактируемая ячейка выделяется рамкой, а также выделены заголовки строки и столбца, в котором находится ячейка.

В случае необходимости можно изменить единицы измерения переменных – кнопка «Настроить». Откроется новый диалог, в котором для каждой величины можно выбрать необходимые единицы измерения. Далее выбрать вариант пересчитывать введенные данные в новые единицы измерения или оставить данные без изменения, а поменять только единицы.

Предусмотрена возможность выбрать систему координат, в которой задаются значения переменных. При изменении системы координат, если переменная имеет в ней другие единицы измерения появится предупреждение, а затем единицы измерения автоматически поменяются.

Кнопка «Сохранить» позволяет сохранить созданную таблицу в файл с расширением \*.bctbl. По умолчанию будет предложено имя файла, совпадающее с названием таблицы.

Кнопка «Открыть сессию» и кнопка «Открыть» загружают из файла сохраненную ранее таблицу, но делают это по-разному.

Кнопка «Открыть сессию» открывает произвольную таблицу из файла на диске, т.е. фактически она создает новую таблицу с такими же параметрами и данными, как в сохраненном файле.

Кнопка «Открыть» загрузит таблицу из файла только в том случае, если количество измерений в сохраненной таблице совпадает с количеством измерений в создаваемой, в противном случае на экран выдается сообщение.

В APM Studio при открытии таблицы, если функция в ней задана в пользовательской системе координат и такая система отсутствует в текущем проекте, то необходимая система координат будет создана.

В APM Structure3D при открытии таблицы пользовательская система координат не создается, а будет использована глобальная система координат того же типа.

Также пользователь может не создавать новую таблицу, а использовать в качестве шаблона ранее созданные таблицы, которые доступны на вкладке «Существующая таблица».

### **Добавление и удаление ячеек**

Если на этапе создания таблицы неправильно указаны количество строк, столбцов и т.д., то можно добавить или удалить необходимое количество ячеек по каждому измерению. Для этого доступные кнопки «Добавить» и «Удалить».

Для добавления строки или столбца необходимо выделить произвольную ячейку, и строка или столбец добавятся после текущих столбца или строки. Если же нет выделенного столбца или строки, то добавление происходит на первую позицию. Для того чтобы снять выделение, необходимо нажать ESC или же щелкнуть по серым клеткам в левом верхнем углу таблицы.

Добавление плоскостей и блоков происходит аналогичным образом: элемент добавляется после выделенного. Для добавления элемента на первое место необходимо снять выделение нажав ESC.

В целом процедура удаления элементов для каждого измерения аналогична добавлению. Необходимо выделить нужный элемент в измерении и нажать соответствующую кнопку «Удалить». При наличии в измерении 2 элементов удаление невозможно, о чем появится соответствующее сообщение.

После ввода данных в таблицу ее можно отсортировать (кнопка «Сортировка»). Таблица сортируется по возрастанию данных в заголовках строк, столбцов и т.д.

Кнопка «Очистить» удаляет значения функции из таблицы, оставляя значения независимых переменных.

## **Редактор выражений**

### **Диалог задания выражения**

Редактор аналитических выражений предназначен для задания исходных данных в параметрическом виде. В выражении могут использоваться независимые переменные (параметры), распространенные математические функции и операции, условный оператор для определения функции заданной разными выражениями при разных значениях независимой переменной.

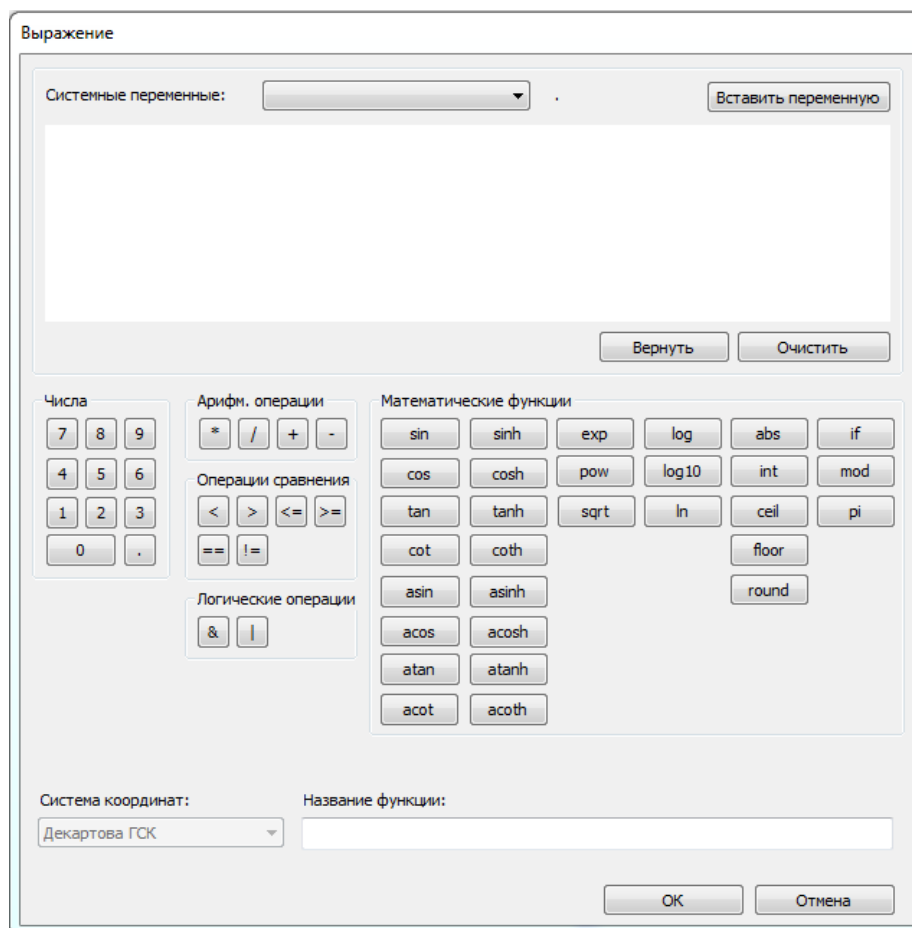


Рисунок 13.4 – Диалоговое окно редактора аналитических выражений

В представленном диалоговом окне **Выражение** большое белое поле в верхней части Поле задания выражения, здесь пользователь должен ввести математическое выражение функции, используя инструментарий, который описан ниже.

Выпадающий список **Системные переменные** содержит независимые переменные, которые могут быть использованы в данной функции. При нажатии на кнопку **Вставить переменную** в Поле задания выражения, в текущее положение курсора будет вставлена переменная выбранная в выпадающем списке **Системные переменные**.

Кнопка **Вернуть** позволяет вернуться к начальному содержимому Поля задания выражения (при создании новой функции Поле задания выражения будет очищено)

Кнопка **Очистить** очищает Поле задания выражения.

Группы кнопок **Числа**, **Арифм. операции**, **Операции сравнения**, **Логические операции** и **Математические функции** позволяют вставить в текущую позицию курсора Поля задания выражения соответствующие математические функции или символы.

Выпадающий список **Система координат**, позволяет выбрать систему координат в которой описывается функция. Если в выражении используются пространственные

координаты «x», «y», «z», то пользователю предоставляется возможность выбрать систему координат, в которой будет посчитано значение выражения.

В текстовое поле Название функции, пользователь должен ввести имя функции.

В Поле задания выражения невозможно использовать символы «{», «}», «[», «]», так как они используются только для шаблонов при работе с единицами измерения и отображаются автоматически по мере необходимости. Также невозможно удалить части шаблонов. Таким образом, выражение вне скобок «{», «}» изменить каким-либо образом невозможно. Для изменения выражения в этом случае необходимо использовать кнопку «Очистить». Также невозможно изменить каким-либо образом выражение внутри скобок «[», «]». Для удаления переменной вместе с шаблоном в этом случае необходимо выделить весь шаблон вместе со скобками «[», «]» и стереть его клавишами «Delete» или «Backspace» на клавиатуре.

Также при работе с функциями необходимо учитывать правила, которые описаны ниже.

### **Синтаксис выражений**

#### ***Математические операторы***

Математические операторы в соответствии с их приоритетом представлены в таблице ниже.

Таблица – Математические операторы

<b>Обозначение</b>	<b>Название</b>	<b>Приоритет</b>
-	Унарный минус	1
%	Остаток от деления	2
^	Возведение в степень	3
*	Арифметическое умножение	4
/	Арифметическое деление	4
+	Арифметическое сложение	5
-	Арифметическое вычитание	5
&	Логическое умножение («и»)	6

Обозначение	Название	Приоритет
	Логическое сложение («или»)	6
>	Больше (сравнение)	7
<	Меньше (сравнение)	7
>=	Больше или равно (сравнение)	7
<=	Меньше или равно (сравнение)	7
!=	Не равно (сравнение)	7
==	Равно (сравнение)	7

Унарный минус может использоваться для логических выражений. Для этого выражение необходимо взять в скобки. Пример: «(x > 10 | - (y > 0 & y < 10))».

### ***Условный оператор***

В выражении может использоваться условный оператор «if», который имеет три параметра: условие, выражение в случае выполнения условия и выражение в случае невыполнения условия.

Условный оператор имеет следующий синтаксис: if («условие», «выражение, когда условие выполняется», «выражение, когда условие не выполняется»).

Приоритет условного оператора следует считать, как группировку со скобками.

### ***Скобки***

Части выражения можно группировать скобками «(», «)».

Замечание. В поле ввода выражение невозможно использовать символы «{», «}», «[», «]», так как они используются для шаблонов при работе с единицами измерения.

### ***Функции***

В выражении можно использовать распространенные математические функции, представленные в таблице ниже.

Таблица – Математические функции

Обозначение	Описание	Обозначение	Описание
sin()	Синус	acoth()	Гиперболический арккотангенс
cos()	Косинус	exp()	Экспонента в степени аргумента
tan()	Тангенс	pow( , )	Первый аргумент в степени второго
cot()	Котангенс	sqrt()	Квадратный корень
asin()	Арксинус	log( , )	Логарифм первого аргумента по второму
acos()	Арккосинус	log10()	Десятичный логарифм
atan()	Арктангенс	ln()	Натуральный логарифм
acot()	Арккотангенс	abs()	Модуль числа
sinh()	Гиперболический синус	int()	Целая часть числа
cosh()	Гиперболический косинус	ceil()	Округление в большую сторону
tanh()	Гиперболический тангенс	floor()	Округление в меньшую сторону
coth()	Гиперболический котангенс	round()	Округление
asinh()	Гиперболический арксинус	if( , , )	Условный оператор (описан выше)
acosh()	Гиперболический арккосинус	mod( , )	Остаток от деления первого аргумента по второй
atanh()	Гиперболический арктангенс	pi()	Число «пи» без аргументов

### Примеры выражений

1)  $\text{ctg}(x + 10) + \sin(\text{if}(y < 0, -1, \text{if}(y > 10, 10, y * 2)))$

В данном выражении вычисляется котангенс суммы независимой переменной  $x$  и 10, а также сумма этого выражения и синуса кусочной функции. Кусочная функция



принимает значение -1 на отрезке  $(-\infty, 0)$ , на отрезке  $(10, +\infty)$  принимает значение 10, на отрезке  $(0, 10)$  принимает значение  $y * 2$ .

2) if (  $x > 0 \ \& \ x < 10, 5, \exp(x)$  )

Данный пример отличается от предыдущего тем, что здесь используется составное условие условного оператора. Кусочная функция принимает значение 5 на отрезке  $(0, 10)$  и значение  $\exp(x)$  при других значениях независимой переменной  $x$ .

3) if (  $(x > -10 \ \& \ x < 0) \ | \ (x > 0 \ \& \ x < 10)$  , x, if (  $x == 0, 100, \sin(x)$  ) )

В этом примере кусочная функция принимает значение  $x$  на отрезках  $(-10, 0)$  и  $(0, 10)$ , в точке 0 принимает значение 100 и  $\sin(x)$  при других значениях  $x$ .

### **Единицы измерения**

В системе APM Structure3D используются настраиваемые единицы измерения. При изменении единиц измерения, выражение автоматически преобразуется так, чтобы получилось тождественное с учетом новых единиц измерения.

Для перевода единиц измерения используются «коэффициент перевода» и «дельта» (используется для температуры).

В поле выражение при отображается шаблон вида: «коэффициент» \* {«выражение»} - «дельта», для переменной отображается шаблон вида: [«коэффициент» \* («переменная» + «дельта»)].

В случае, когда при изменении единиц измерения коэффициент равен «1.0» или дельта равна «0.0» - они не появляются в выражении и шаблон может не использоваться.

Замечание.

Невозможно удалить части шаблонов. Таким образом, выражение вне скобок «{», «}» изменить каким-либо образом невозможно. Для изменения выражения в этом случае необходимо использовать кнопку «Очистить».

Невозможно изменить каким-либо образом выражение внутри скобок «[», «]». Для удаление переменной вместе с шаблоном в этом случае необходимо выделить весь шаблон вместе со скобками «[», «]» и стереть его клавишами «Delete» или «Backspace».

### **Проверка на ошибки**

Если пользователь задал неверное выражение, он будет оповещен сообщением с описанием ошибки, а курсор в поле ввода будет помещен на позицию ошибки.

## Работа с деревом расчетной модели

### **Материалы**

В дереве проекта APM Structure3D узел «Материалы» содержит список материалов, которые доступны в данный момент. Из контекстного меню можно вызвать стандартный диалог Материалы или диалог выбора типа материала.

Для каждого материала, кроме типа «Кладка», при выделении его в дереве отобразятся соответствующие ему общие характеристики, а также имя и цвет в модели.

Для материала «Кладка» будет доступна только кнопка «Редактировать», которая вызывает диалог задания параметров кладки.

Все общие характеристики материалов, кроме предела текучести по сжатию, задаются в виде постоянного значения. Предел текучести по сжатию можно задать в виде постоянного значения, графика, таблицы и функции.

В контекстном меню материала можно его переименовать или удалить, задать всем элементам модели или только выделенным. Также можно его отредактировать, вызвав диалог «Выбор свойств материала», где можно задать материалу дополнительные свойства, которые будут учитываться при расчетах. Например, удельная электрическая проводимость, относительная магнитная проницаемость, термический материал и т.д.

Для большинства свойств значения можно задать не только в виде константы, но и в виде таблицы, графика или функции. Любое свойство материала можно удалить, используя контекстное меню, кроме свойств изотропный/анизотропный материал.

### **Нагрузки**

С помощью узла дерева «Нагрузки» можно задать или удалить различные виды нагрузок: тепловые, электрические, магнитные и высокочастотные. Каждому типу нагрузок соответствует свой узел дерева.

С помощью контекстного меню каждого типа нагрузок можно добавить конкретную нагрузку этого типа в модель, а также удалить все нагрузки данного типа, скрыть или отобразить их на модели.

После добавления нагрузки соответствующий узел появится в дереве, а в окне свойств отобразятся параметры этой нагрузки. Условно все нагрузки можно разделить на два типа «скалярные» (задаются одним значением) и «векторные» (задаются компонентами вектора по трем осям).

Для некоторых векторных нагрузок можно задавать отдельные компоненты, не задавая все три, при этом в соответствующем поле «Значение», для используемой

компоненты надо поставить переключатель в положение включено, а для не используемой в положение «выключено».

Для каждой нагрузки можно задать значение одним из 4-х способов: постоянное значение, график, таблица и функция. Для этого предназначен выпадающий список в поле «Значение». Также для каждой нагрузки необходимо указать из списка тип элементов, на которые она будет приложена. Далее нажать кнопку Установить, выделить соответствующие элементы в модели и нажать кнопку Применить. В поле «Количество» отобразится количество элементов, к которым приложена нагрузка.

Для «векторных» нагрузок можно исключить какую-либо составляющую вектора с помощью переключателя в поле «Значения».

По умолчанию все нагрузки не отображаются на видовом экране. Для визуализации нагрузки можно воспользоваться пунктом контекстного меню Показать или Показать все, для нагрузки или типа нагрузок соответственно.

#### ***Последовательность задания нагрузки на элементы:***

1. Пользователь выбирает нагрузку с помощью контекстного меню (ПКМ на соответствующем типе нагрузки), которую планирует задать.

2. В панели Свойства пользователь в строке Тип элемента выбирает элементы (узлы, стержни, пластины объемные элементы) на которые будет задаваться нагрузка в комбобоксе. Для каждой нагрузки доступны лишь определенные типы элементов.

3. После этого в строке Элементы появляются две кнопки Установить и Очистить.

Кнопка Установить – это режим выделения элементов, согласно типу указанному в строке Тип элемента, на которые будет применена данная нагрузка. Если в нагрузке уже имелись элементы, на которые она была применена, то эти элементы выделяются и подсвечиваются автоматически. Соответственно к ним уже добавляются элементы, которые выделил пользователь.

Внимание: Режим выделения элементов:

– работает с помощью нажатия и перемещения удерживаемой левой кнопки мыши (ЛКМ) в процессе выделения;

– нажатие на правую кнопки мыши (ПКМ) переключает режимы выделения/"развыделения";

– нажатие на SHIFT+ПКМ режим выделения/"развыделения" рамкой переключается на режим выделения/"развыделения" окружностью и наоборот.

При нажатии кнопки Установить в строке Элементы появляются кнопки Применить и Отмена.

Кнопка Применить заканчивает режим выделения элементов и применяет данную нагрузку на выделенные элементы. После ее нажатия в строке Количество будет указано на какое количество элементов применена нагрузка. А в строке Элементы снова появляются две кнопки Установить и Очистить.

Кнопка Отмена заканчивает режим выделения элементов без применения данной нагрузки на выделенные элементы. После ее нажатия в строке Количество будет указано, то количество элементов, которое было до режима выделения нагрузки (по умолчанию "0"). А в строке Элементы обратно появляются две кнопки Установить и Очистить.

Кнопка Очистить очищает список элементов, на которые была применена нагрузка и возвращает строку Количество к значению по умолчанию – 0.

***Последовательность задания поверхностной нагрузки на элементы:***

Первые три пункта задания поверхностной нагрузки соответствуют пунктам задания нагрузки на элементы (см. выше). Далее:

4. В строке Номер поверхности указывается номер поверхности элемента, на который будет применена данная нагрузка. По умолчанию Номер поверхности имеет значение Не определен.

Внимание: При задании поверхностной нагрузки через данную строку можно выделить только одну поверхность одного элемента, соответствующую номеру поверхности указанному в поле Значения.

5 С помощью строки Узлы можно задать нагрузку на несколько поверхностей одного элемента, на которые будет применена нагрузка. Данная строка содержит кнопки Установить и Очистить.

Кнопка Установить, переходит в режим выделения узлов выделенных ранее элементов. Данные узлы определяют поверхности элементов, на которые будет применена нагрузка (рисунки 13.5 и 13.6). На видовом экране отображаются только элементы и их узлы, которые были ранее внесены в данную нагрузку с помощью строки Элементы. Остальная часть конструкции в этом режиме не отображается.

При нажатии кнопки Установить в строке Узлы появляются кнопки Применить и Отмена.

Кнопка Применить заканчивает режим выделения узлов элементов и применяет данную нагрузку на выделенные поверхности элементов. После ее нажатия в строке Узлы снова появляются две кнопки Установить и Очистить.

Кнопка Отмена заканчивает режим выделения узлов элементов без применения данной нагрузки на выделенные поверхности элементов. После ее нажатия в строке Узлы снова появляются две кнопки Установить и Очистить.

Кнопка Очистить очищает список поверхностей элементов, на которые была применена нагрузка.

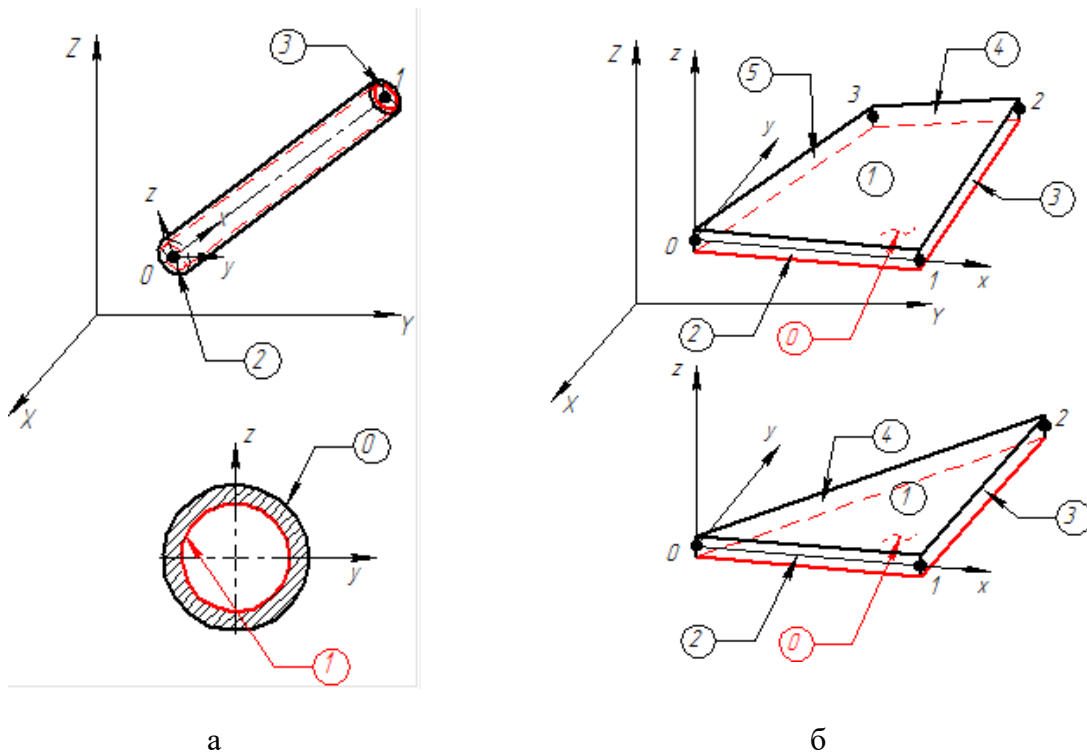


Рисунок 13.5 – Нумерация поверхностей  
а – стержневого элемента, б – пластинчатого элемента

Объемные элементы:

– Для задания поверхности объемного элемента необходимо выделить все узлы, принадлежащие данной поверхности. То есть для элементов высокого порядка это не только угловые, но промежуточные узлы.

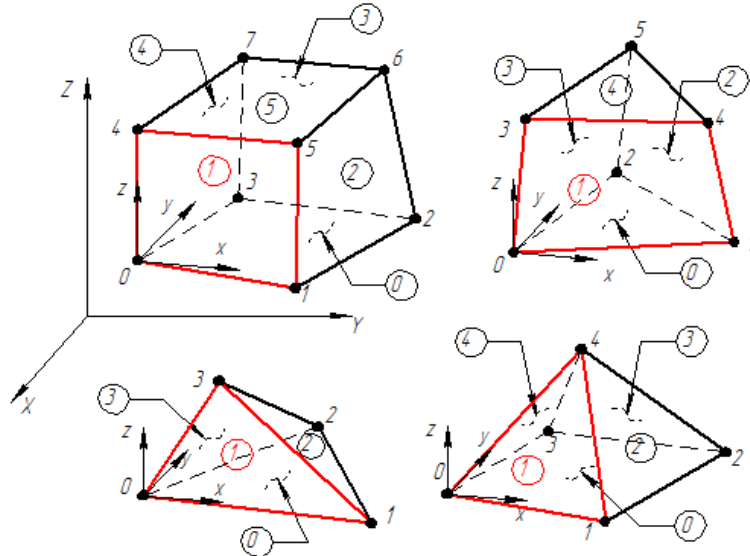


Рисунок 13.6 – Нумерация поверхностей объемных элементов

### Системы координат

В дереве проекта APM Structure3D есть узел «Системы координат», который содержит два дочерних узла: «Глобальные СК» и «Пользовательские СК».

Пользователю доступны 5 глобальных систем координат (рисунок 13.7): декартова (а), цилиндрическая с осью Z (б), цилиндрическая с осью X (в), цилиндрическая с осью Y (г) и сферическая (д). Для глобальных систем координат пользователю не доступно изменение параметров. Глобальные СК можно отобразить или скрыть с помощью соответствующего контекстного меню.

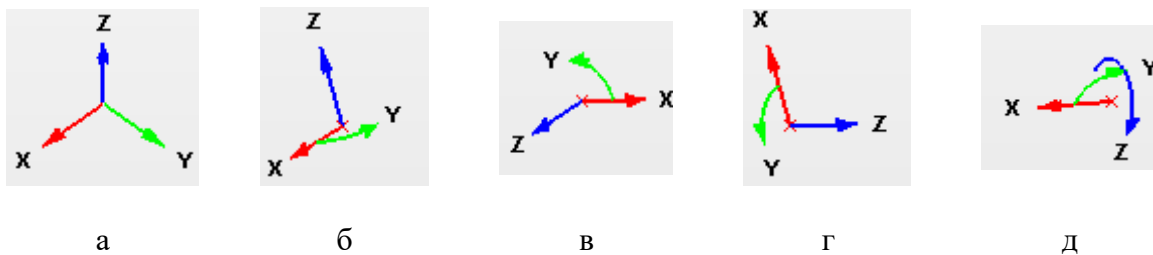


Рисунок 13.7 – Типы глобальных систем координат

Также пользователю доступно создание собственных систем координат на базе глобальных, но с заданными смещением относительно осей и углами поворота. Для этого в контекстном меню узла «Пользовательские СК» выбрать пункт «Добавить». По умолчанию создается декартова система координат в точке (0,0,0) с нулевыми углами поворота. В окне свойства перечислены параметры системы, которые может изменить пользователь.

Кроме задания смещения системы координат вручную, есть возможность задать смещение системы, используя координаты узла в модели. Для этого необходимо нажать

на кнопку «Укажите узел» в окне свойств, а затем указать нужный узел в модели. Далее нажать кнопку «Применить».

Пользовательские системы координат можно редактировать с помощью окна свойств, а также удалить с помощью соответствующего пункта контекстного меню.

### **Результаты**

После выполнения расчета в узле дерева «Результаты» появится дочерний узел, соответствующий результатам проведенного анализа. Расчеты, для которых результаты доступны в дереве:

1. Нестационарные электромагнитный расчет.
2. Магнитостатический расчет.
3. Электростатический расчет.
4. Расчет постоянных токов.
5. Высокочастотный модальный анализ.
6. Расчет нестационарной теплопроводности.

Условно все результаты можно разделить на «контурные» и «векторные». Для каждого типа результатов в окне «Свойства» представлены различные настройки. Общими для всех результатов являются следующие параметры:

**ОБЪЕМНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ** – компоненты вектора в локальной и глобальной системе координат, а также суммарный вектор.

**КОЛИЧЕСТВО ИЗОУРОВНЕЙ** – количество цветов, используемых при отображении результата.

**ОТОБРАЖАТЬ КЭ СЕТКУ** – показывает или скрывает конечно-элементную сетку на карте результатов.

**ДИАПАЗОН ЗНАЧЕНИЙ** – задает минимальное и максимальное значение на карте результатов. Кнопка Сбросить возвращает значения по умолчанию.

Для «скалярных» результатов также доступны свойства:

1. **КОНТУРНАЯ КАРТА** – отображает результаты либо в виде изообластей, либо в виде максимального значения в элементе.

2. **УСРЕДНЯТЬ** – усредняет показанные результаты по узлам модели.

Для «векторных» результатов дополнительно доступны следующие свойства:

**МАСШТАБ** – устанавливает размер, отображаемых векторов.

**ТИП ВЕКТОРОВ** – внешний вид векторов: линии, 2D векторы, 3D векторы.

**ОДИНАКОВЫЙ РАЗМЕР** – устанавливает одинаковый размер для векторов, независимо от их величины.

Для нестационарных расчетов (модального анализа) пользователь может выбрать конкретный момент времени (частоту), для которого (которой) будут построены результаты.

Для нестационарных расчетов также посмотреть динамику развития процесса, используя свойство «Анимация». В анимации доступны следующие параметры:

**ПЕРИОД АНИМАЦИИ** – промежуток времени, за который будет показан проведенный расчет.

**НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ** – время, с которого начнется анимация.

**КОНЕЧНЫЙ МОМЕНТ** – время, когда закончится анимация.

**ЗАПИСАТЬ В ФАЙЛ** – создание файла в формате «.avi» с анимацией процесса.

**СТАРТ/ПАУЗА/СТОП** – кнопки управления показом анимации.

### Работа с инструментом «Таблица»

В АРМ Structure3D некоторые виды нагрузок и свойства материала, могут быть заданы с помощью функции нескольких переменных, заданной в виде таблицы. При задании (редактировании) нагрузки (свойства материала) в диалоге или панели свойства в соответствующем выпадающем списке необходимо выбрать пункт Таблица.



## Глава 14. Краткие теоретические сведения

### О методе конечных элементов

Основная идея метода заключается в том, что конструкция моделируется путем разбиения ее на области (конечные элементы), в каждой из которых поведение конструкции описывается с помощью отдельного набора выбранных функций, представляющих напряжения и перемещения в указанной области. В основу реализации метода для расчета напряженно-деформированного состояния конструкции положен метод перемещений. Таким образом внутри конечного элемента перемещения в произвольной точке описываются набором определенных функций, обычно полиномы от координат точки. Подстановка в эти функции координат узловых точек конечного элемента позволяет записать перемещения  $u(x)$  произвольной точки элемента через неизвестные перемещения его узловых точек:

$$u(x) = \sum_{i=1}^n N_i(x)u_i \quad \text{или} \quad u(x) = N(x)U$$

где  $N_i(x)$  – функция формы элемента,  $u_i$  – вектор перемещения  $i$ -го узла элемента,  $N(x)$  – матрица функций форм элемента,  $U$  – вектор всех узловых перемещений элемента.

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние конечного элемента

Уравнение  $\sigma = D\varepsilon$  описывает связь напряжений  $\sigma(x)$  с деформациями  $\varepsilon(x)$  для линейного поведения материала, где  $D$  – матрица упругости закона Гука.

Деформация может быть выражена через узловые перемещения элемента:

$$\varepsilon = Bu$$

Полная потенциальная энергия элемента определяется выражением:

$$\Pi^{(e)} = \frac{1}{2} \int_V \varepsilon^T D \varepsilon dV - \int_V u^T p dV - \int_S u^T q dS$$

где  $p$  и  $q$  – векторы объемных и поверхностных сил соответственно.

Подставляя вектор деформации через узловые перемещения:

$$\Pi^{(e)} = \left( \frac{1}{2} U^T \int_V (BN)^T DBN dV \right) U - \left( \int_V p^T N dV + \int_S q^T N dS \right) U$$

Выражение для потенциальной энергии можно записать как:

$$\Pi^{(e)} = \frac{1}{2} U^T K U - f^T U$$

где  $K$  – матрица жесткости элемента,  $f^T$  – вектор приведенных узловых сил:

$$K = \int_V (BN)^T DBN dV, \quad f^T = \int_V p^T N dV + \int_S q^T N dS$$

Полная потенциальная энергия системы получается суммированием по всем ее элементам:

$$\Pi = \sum_e \Pi^{(e)}$$

Минимизация функционала потенциальной энергии дает систему уравнений МКЭ:

$$KU = F$$

где  $K$  – глобальная матрица жесткости и  $F$  – вектор узловых сил, полученные путем суммирования соответствующих членов матриц жесткости  $K^{(e)}$  и векторов  $f$  отдельных конечных элементов.

### Основные типы конечных элементов (КЭ)

Стержневые КЭ:

- Балка;
- Ферма;
- Канат;
- Элемент трубопровода;
- Изогнутый элемент трубопровода;

Пластинчатые КЭ:

- 4-х угольная пластина;
- 3-х угольная пластина;

Объемные КЭ:

- 4-узловой тетраэдр;
- 5-узловая пирамида;
- 6-узловая призма;
- 8-узловой гексаэдр;
- 10-узловой тетраэдр;
- 13-узловая пирамида;
- 15-узловая призма;
- 20 узловой гексаэдр.

## Системы координат

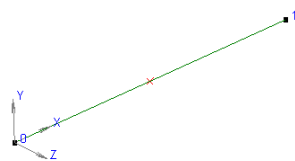
Каждый элемент конструкции имеет собственную локальную систему координат (ЛСК). Для удобства все системы координат правосторонние. Ориентация локальных систем координат для различных элементов показана на рисунке ниже.

Систему координат в узле можно ориентировать произвольным образом, поворачивая ее в пространстве. По умолчанию она совпадает с глобальной системой координат. В локальной системе координат задаются следующие атрибуты узла: закрепления степеней свободы, упругие закрепления, перемещения в направлении фиксированных степеней свободы.

Система координат стержня ориентирована всегда таким образом, что ось  $X$  направлена вдоль его оси. Эту систему координат можно вращать вокруг оси стержня. Ориентация сечения стержня жестко привязана к его системе координат. Кроме этого, нагрузки на стержень также задаются в локальной системе координат стержня.

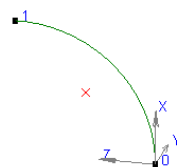
Система координат пластины ориентирована таким образом, что ось  $Z$  направлена по нормали к плоскости пластины, ось  $X$  параллельна одной из сторон пластины, а ось  $Y$  дополняет систему векторов до правосторонней. Локальную систему координат пластины можно инвертировать, т.е. изменять направление нормали (оси  $Z$ ) на противоположное. В локальной системе также задается нормальная распределенная нагрузка на пластину.

Система координат объёмного элемента совпадает с глобальной системой координат.

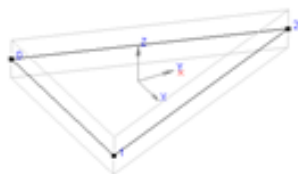


Балка, ферма, канат, элемент трубопровода

Стержневые КЭ

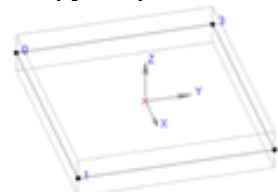


Изогнутый элемент трубопровода

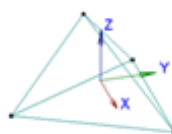


3-х угольная пластина

Пластинчатые КЭ

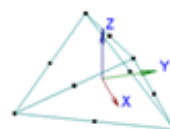


4-х угольная пластина

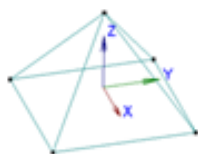


4-узловой

Тетраэдр

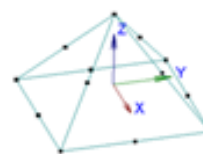


10-узловой

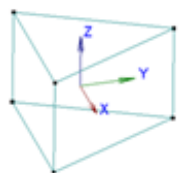


5-узловая

Пирамида

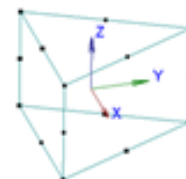


13-узловая

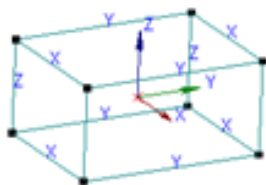


6-узловая

Призма

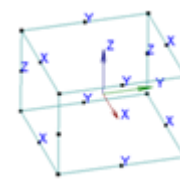


15-узловая



8-узловой

Гексаэдр



20-узловой

Рисунок 14.1 – Основные типы конечных элементов

### Степени свободы

Узел в общем случае имеет шесть степеней свобод: три поступательных и три вращательных. Опоры уменьшают количество степеней свобод узла.

Количество степеней свобод КЭ в общем случае зависит от количества узлов принадлежащих ему. При этом количество степеней свобод узла, принадлежащего КЭ, могут уменьшаться в зависимости от типа КЭ. Степени свободы основных типов конечных элементов представлены ниже.

Тип КЭ	Количество степеней свободы элемента	Примечание
<b>Стержневой КЭ</b>		
Балка, элемент трубопровода, изогнутый элемент трубопровода	12	Все степени свободы узлов доступны
Ферма, канат	6	Отсутствуют вращательные степени свободы узлов
<b>Пластинчатый КЭ</b>		
3-х узловая пластина	18	Все степени свободы узлов доступны
4-х узловая пластина	24	Все степени свободы узлов доступны
<b>Объемный КЭ</b>		
4-х/10-ти узловой тетраэдр	12/30	Отсутствуют вращательные степени свободы узлов
5-ти/13-ти узловая пирамида	15/39	
6-ти/15-ти узловая призма	18/45	
8-ми/ 20-ти узловой гексаэдр	24/60	

Для построения матриц жесткости и массы, а также геометрической матрицы элемента используются функции формы, позволяющие представить перемещения любой точки в элементе через перемещение его узлов. Процедуры получения функций форм из образующих полиномов описаны во многих книгах по методу конечных элементов. Приведем лишь образующие полиномы для разных элементов.

#### **Стержневой КЭ**

Для поперечных перемещений стержневого элемента в одной плоскости - неполный полином третьей степени:

$$(1 \quad x \quad x^2 \quad x^3)$$

Для осевых и крутильных перемещений - полином первой степени:

$$(1 \quad x)$$

### 3-х угольная пластина

Для поперечных перемещений треугольного плоского элемента используем неполный кубический полином третьей степени в L-координатах с 9 неизвестными коэффициентами:

$$\left[ L_1 \quad L_2 \quad L_3 \quad \left( L_1 \cdot L_2^2 + \frac{L_1 \cdot L_2 \cdot L_3}{2} \right) \quad \left( L_3 \cdot L_2^2 + \frac{L_1 \cdot L_2 \cdot L_3}{2} \right) \quad \left( L_1 \cdot L_3^2 + \frac{L_1 \cdot L_2 \cdot L_3}{2} \right) \right. \\ \left. \left( L_2 \cdot L_3^2 + \frac{L_1 \cdot L_2 \cdot L_3}{2} \right) \quad \left( L_2 \cdot L_1^2 + \frac{L_1 \cdot L_2 \cdot L_3}{2} \right) \quad \left( L_3 \cdot L_1^2 + \frac{L_1 \cdot L_2 \cdot L_3}{2} \right) \right]$$

Для перемещений в плоскости элемента – полином первой степени:

$$(1 \quad x \quad y)$$

### 4-х угольная пластина

Для поперечных перемещений четырехугольного плоского элемента - неполный полином четвертой степени с 12 неизвестными коэффициентами:

$$[1 \quad x \quad y \quad x^2 \quad x \cdot y \quad y^2 \quad x^3 \quad x^2 \cdot y \quad x \cdot y^2 \quad y^3 \quad x^3 \cdot y \quad x \cdot y^3]$$

Для перемещений в плоскости элемента - неполный полином второй степени:

$$(1 \quad x \quad y \quad x \cdot y)$$

### Объемный элемент

Перемещения в объёмном элементе считаются линейными относительно локальных нормированных координат:

$$(s \cdot t \cdot r \quad s \cdot t \quad t \cdot r \quad s \quad t \quad r \quad l)$$

### Специальные элементы

- Сосредоточенная масса
- Трубопроводная арматура
- Совместные перемещения
- Упругие связи
- Контактные/целевые элементы

Элемент сосредоточенная масса определяется одним узлом, имеющим в общем случае 6 степеней свобод: перемещение и вращение вокруг осей X, Y и Z узловой системы координат. Каждому направлению присваиваются различные значения масс для перемещения и моментов инерции для вращения.

Элемент трубопроводная арматура, как и сосредоточенная масса, определяется одним узлом, имеющим в общем случае 6 степеней свобод: перемещение и вращение вокруг осей X, Y и Z узловой системы координат. Данный элемент применяется для учета массово-инерционных характеристик при расчете трубопроводных систем. В

отличие от сосредоточенной массы, которая учитывается только для динамических нагрузок и расчета собственных частот, трубопроводная арматура учитывается и для статических расчетов.

Элемент совместные перемещения устанавливает взаимосвязь между соответствующими степенями свободы группы узлов. Данная взаимосвязь реализуется в равенстве соответствующих степеней свободы для всех узлов группы.

Элемент упругие связи определяется двумя узлами, между которыми устанавливает взаимосвязь на соответствующие степени свободы узлов: перемещение и вращение вокруг осей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  локальной системы координат. Данный элемент применяется для учета жесткости между узлами.

Контактный элемент имеет пять или четыре узла с тремя степенями свободы в каждом: перемещения в узловых направлениях  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Контакт происходит, когда контактный узел проходит целевую поверхность.

## Ограничения на форму конечных элементов

Рекомендуемые ограничения:

- углы пластинчатых элементов не менее 30 и не более 150 градусов (относится и к граням объёмных элементов)
- отношение длин сторон не более 20.
- в случае, когда вершины четырехугольного элемента не лежат в одной плоскости предпочтительнее использование двух треугольных элементов.

Обязательные ограничения:

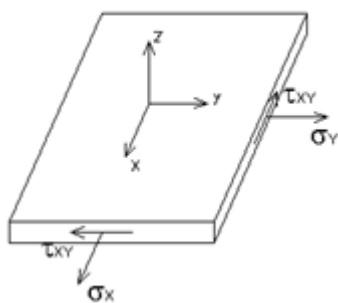
- четырехугольный пластинчатый элемент не должен иметь самопересечений
- четырехугольный пластинчатый элемент должен быть выпуклым
- грани объёмных элементов должны подчиняться 1-му и 2-му ограничениям.

Расчет пластин выполняется по теории тонких пластин, которая предполагает, что прямолинейные отрезки, перпендикулярные срединной поверхности пластины до деформации, сохраняют свою длину и остаются перпендикулярными изогнутой срединной поверхности после деформации.

## Напряжения

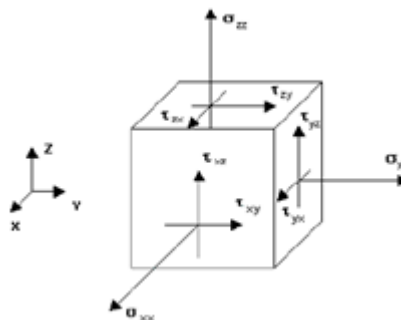
Считаем, что выполняется гипотеза Кирхгофа о неизменности нормали к срединной поверхности. Присутствуют только напряжения в плоскости пластины. Учитывается также неравномерность распределения напряжений по толщине пластины.

Пластинчатые элементы



Напряжения в пластинчатом /оболочечном конечном элементе.

Объёмные элементы



Напряжения в объёмном элементе.

## Список литературы по методу конечных элементов

1. Бате К. Вильсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. М. Стройиздат, 1982.
2. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. М. Мир, 1984.
3. Дарков А.В., Шапошников Н.Н. Строительная механика. М. Высшая школа 1986.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М. Мир, 1975.
5. Смирнов А. Ф. Методы расчета стержневых систем, пластин и оболочек с использованием ЭВМ. М. Стройиздат, 1976.
6. Сеницин А.П. Метод конечных элементов в динамике сооружений. М. Стройиздат, 1978.
7. Агапов В.П. Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости пространственных тонкостенных подкрепленных конструкций. М. АСВ 2000.
8. Иванов Б. Э. Решение задач динамики и устойчивости строительных конструкций методом конечных элементов. М. МИСИ 1990.
9. Хечумов Р.А. Применение метода конечных элементов к расчету конструкций. М. АСВ, 1994.



10. Clough R. Penzien J. Dynamics of Structure, New-York, McGraw-Hill Book Co.,  
1975

11. ANSYS, Inc. Theory, Release 5.7, Edited by Peter Kohnke, Ph.D.