



Начинаем работать



Модуль анализа динамической нагруженности и усталостной долговечности

Это руководство поможет вам понять принципы, заложенные в модуле анализа эксплуатационной нагруженности и усталостной долговечности программного комплекса «Универсальный механизм», а также получить навыки практического использования модуля

Начинаем работать в программном комплексе «Универсальный механизм»: анализ эксплуатационной нагруженности и усталостной долговечности

Это руководство поможет вам понять принципы, заложенные в модуле анализа эксплуатационной нагруженности и усталостной долговечности (**UM Durability**) программного комплекса (ПК) «Универсальный механизм», а также получить навыки практического использования модуля.

Предполагается, что вы уже изучили раздел, посвященный введению в моделирование в ПК УМ, который находится в файле **gs_UM.pdf**¹, и умеете выполнять в УМ простые действия: создать новую модель, добавлять тела и шарниры, синтезировать уравнения движения (**UM Input**) и работать в программе моделирования движения (**UM Simulation**). А также прошли урок, посвященный моделированию упругих тел, который находится в файле **gs_UM_FEM.pdf**².

В этом руководстве мы шаг за шагом рассмотрим процесс оценки нагруженности и усталостной долговечности на учебном примере вибростенда. Используя возможности модуля моделирования динамики упругих тел (**UM FEM**), мы выполним численный эксперимент. Далее, используя полученные результаты, в модуле **UM Durability** выявим ресурсоограничивающие зоны и оценим срок службы рамы вибростенда по методике расчета многоциклового усталости.

Совместимость

Для проверки наличия модуля расчета долговечности в вашей конфигурации ПК «Универсальный механизм» запустите программу **UM Input** или **UM Simulation**, выберите пункт меню **Помощь | О программе...** В появившемся окне в разделе **Конфигурация** вы увидите список доступных модулей.

Ответственность и авторские права

Данное руководство может изменяться время от времени. Авторы не несут никакой ответственности за любые ошибки и несоответствия, которые могут иметь место в данном документе.

ООО «Вычислительная механика». Все права защищены ©, 2024.

Все товарные знаки принадлежат их законным владельцам.

¹ www.universalmechanism.com/download/90/rus/gs_um.pdf

² www.universalmechanism.com/download/90/rus/gs_um_fem.pdf

Оглавление

НАЧИНАЕМ РАБОТАТЬ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ»: АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАГРУЖЕННОСТИ И УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ		2
1. ВВЕДЕНИЕ		4
2. ВИБРОСТЕНД		6
2.1. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ		6
2.2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАБОТЫ		7
2.3. АНАЛИЗ ДИНАМИКИ		7
2.4. АНАЛИЗ НАГРУЖЕННОСТИ		9
2.4.1. Описание режимов нагружения.....		10
2.4.2. Описание групп датчиков		15
2.4.3. Настройки расчета нагруженности		17
2.4.4. Сохранение проекта в файл.....		19
2.4.5. Расчет нагруженности		20
2.4.6. Анализ результатов расчета нагруженности		20
2.4.7. Сохранение проекта в файл.....		26
2.5. АНАЛИЗ ДОЛГОВЕЧНОСТИ.....		27
2.5.1. Настройка параметров расчета долговечности		27
2.5.2. Выбор контрольных зон		29
2.5.3. Описание контрольных зон и свойств сопротивления усталости		29
2.5.4. Сохранение проекта в файл.....		35
2.5.5. Расчет долговечности		35
2.5.6. Анализ результатов расчета долговечности		36
2.5.7. Сохранение проекта в файл.....		39

1. Введение

Оценка долговременной прочности элементов конструкции является одной из основных задач, возникающих при разработке новых машин и механизмов. Основным фактором, определяющим долговечность большинства деталей машин, является механическое нагружение.

Существующие методики позволяют производить оценку усталостной прочности и долговечности при наличии исходных данных о свойствах сопротивления усталости детали, определяемых конструкционными, технологическими и эксплуатационными факторами, а также подробного и достоверного описания условий нагружения – нагруженности детали. Формат исходных данных о свойствах сопротивления усталости определяется выбранной методикой расчета; наиболее полные данные о нагруженности содержатся в записях процесса изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) детали в процессе эксплуатации.

В настоящем руководстве рассматривается методика оценки динамической нагруженности и усталостной долговечности элементов конструкции машин и механизмов в программном комплексе «Универсальный механизм» (ПК УМ), основанная на использовании результатов моделирования динамики механических систем с учетом реальных условий эксплуатации.

Моделирование динамики в ПК УМ позволяет исследовать как динамические характеристики механической системы, так и процессы упругого деформирования отдельных ее элементов.

Упругие свойства деталей учитываются путем рассмотрения их конечно-элементных (КЭ) моделей. В основе учета упругости деталей лежит модальный подход, представляющий упругие деформации тела суперпозицией собственных форм, взятых с определенными масштабными коэффициентами – модальными координатами. При адекватном выборе набора форм их комбинация моделирует упругие свойства тела точно и эффективно, позволяя не только учесть его динамику, но и рассчитать историю изменения НДС.

Возможности модуля исследования динамики упругих тел (UM FEM) позволяют получать величины напряжений и деформаций в узлах конечно-элементной модели тела в процессе моделирования, а также восстанавливать процессы их изменения по сохраненным записям модальных координат. Эта возможность использована в модуле UM Durability для исследования эксплуатационной нагруженности упругих тел по сохраненным результатам моделирования динамики упругих тел.

Реализованная в ПК УМ методика получения исходных данных об эксплуатационной нагруженности элементов конструкции машин и механизмов представлена на схеме.



Рис. 1.1. Методика анализа эксплуатационной нагруженности и усталостной долговечности, реализованная в ПК УМ.

Перечислим основные этапы исследования эксплуатационной нагруженности и усталостной долговечности элементов механических систем в ПК УМ.

Анализ условий эксплуатации механизма за планируемый срок службы, выделение частных режимов эксплуатации.

Подготовка гибридной модели или моделей механизма, соответствующих выделенным режимам эксплуатации и включающих исследуемые на прочность детали в виде упругих тел, средствами модуля UM FEM.

Моделирование работы механизма для выделенных режимов эксплуатации. В ходе выполнения численных экспериментов, истории изменения модальных координат упругих тел сохраняются в отдельные файлы. При использовании модуля многовариантных расчетов UM Experiments отдельные эксперименты могут объединяться в серии, результаты выполнения которых сохраняются автоматически. Полученные результаты передаются в модуль UM Durability.

Последующий анализ эксплуатационной нагруженности и усталостной долговечности проводится средствами модуля UM Durability. Если механическая система включает несколько упругих тел, исследование проводится для каждого упругого тела в отдельности.

Анализ эксплуатационной нагруженности тела в UM Durability начинается с описания частных режимов работы. Режимы описываются полученными ранее записями модаль-

ных координат, расположение файлов которых указывается пользователем. При использовании результатов многовариантных расчетов список режимов формируется автоматически на основании списка альтернатив. Далее описываются группы датчиков – узлов конечноэлементной модели исследуемого тела. По записям процессов изменения модальных координат тела рассчитываются истории изменения НДС в датчиках для каждого из режимов эксплуатации. Полученные процессы схематизируются для дальнейшего использования в алгоритмах оценки усталостной прочности и долговечности; статистические характеристики процессов применяются для анализа нагруженности упругого тела и предварительного выявления ресурсоограничивающих зон.

Оценка усталостной долговечности. Производится выбор и задание параметров методики расчета, задание относительных долей режимов нагружения за единицу срока службы и описание свойств сопротивления усталости для каждой из ресурсоограничивающих зон. Усталостная долговечность и накопленные повреждения оцениваются для каждой зоны при работе механизма, как в отдельном режиме, так и для нагружения, заданного комбинацией частных режимов.

В настоящее время в модуле UM Durability реализованы алгоритмы расчета усталостной долговечности при многоцикловой усталости, регламентированные нормативными документами локомотивостроения и вагоностроения, а также их модификации.

Оценка эксплуатационной нагруженности и усталостной долговечности проводится обычно после исследования динамических характеристик механической системы в рамках твердотельного моделирования. С другой стороны оценка статической прочности подразумевает разработку КЭ моделей исследуемых деталей. Вследствие этого создание гибридной модели на базе твердотельной не требует существенных затрат времени, что позволяет легко переходить к решению задачи оценки усталостной прочности конструкции.

2. Вибростенд

Модель состоит из электродвигателя, установленного на упругой раме. Вопросы создания рассматриваемой в настоящем руководстве гибридной модели вибростенда в ПК «Универсальный механизм» обсуждается в п. 3 главы **gs_UM_FEM.pdf**³ руководства пользователя УМ. В настоящем примере рассматриваются только вопросы оценки долговечности. Скачайте и распакуйте архив с готовой для дальнейшего анализа моделью вибростенда по адресу www.universalmecanichism.com/download/90/rus/vibrostand.zip (35 Мб).

2.1. Описание модели

Объект исследования в данном примере – упругая рама, на которой установлен электродвигатель. Цель исследования – определить уровень напряжений в материале рамы и далее, основываясь на этих данных, оценить ее долговечность.

Модель состоит из упругой рамы и электродвигателя с валом, на котором установлен эксцентрик. Электродвигатель состоит из корпуса, вала и эксцентрика, жестко установ-

³ По сравнению с моделью, описанной в п. 3 **gs_UM_FEM.pdf**, настоящая модель имеет улучшенную конечно-элементную сетку для более точной оценки долговечности

ленного на валу. Корпус имеет 6 степеней свободы, вращение вала относительно корпуса задано явной функцией времени.

Конечноэлементная модель упругой рамы включает 3456 пластинчатых элементов типа SHELL63. Упругое тело описано с помощью 24 статических и 10 собственных форм колебаний.

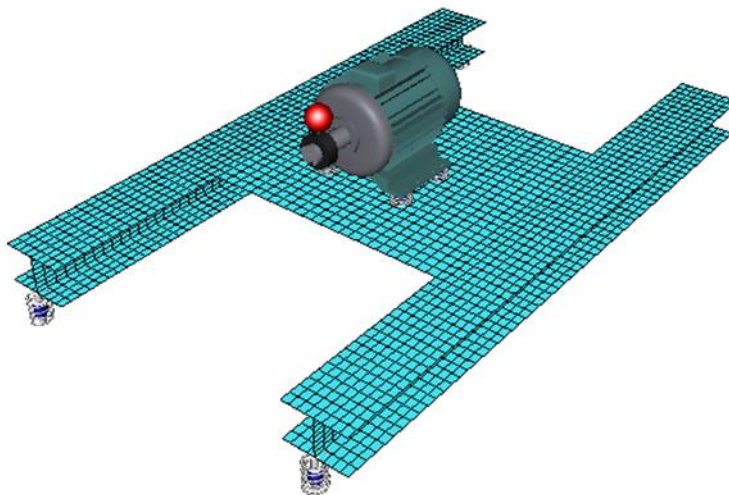


Рис. 2.1. Модель вибростенда

2.2. Последовательность работы

Имея полностью подготовленную гибридную модель для дальнейшего анализа, в соответствии со схемой работы, представленной на рис. 1.1, нам необходимо провести численный эксперимент, моделирующий работу механизма в реальных условиях и затем, основываясь на полученных данных, оценить срок службы рамы до разрушения.

2.3. Анализ динамики

Чтобы получить реализации напряжений в раме для дальнейшего расчета долговечности необходимо сначала провести численные эксперименты по моделированию динамики рассматриваемой механической системы.

Через кнопку **Пуск** или ярлык на рабочем столе запустите программу **UM Simulation** и загрузите модель **Vibrostand**, которая находится в архиве, который вы только что скачали.

Угловая скорость ротора в модели меняется по закону, представленному на рис. 2.2, включает разгон, рабочий режим и остановку. Длительность каждого режима определяется параметрами модели, которые даны в табл. 1.

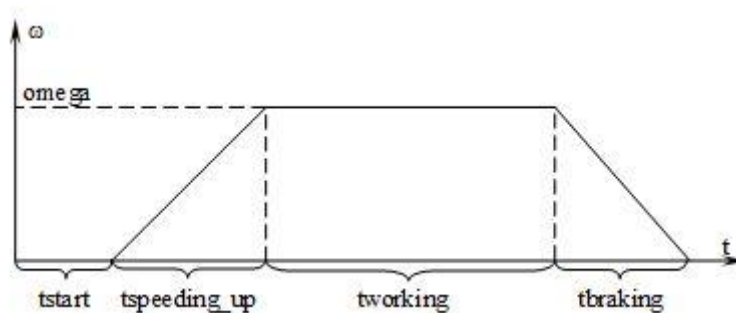


Рис. 2.2. Угловая скорость ротора

Таблица 1

Основные параметры модели

Модель	Комментарий	Значение
Nu	Номинальная угловая скорость ротора, об/мин	1620
omega	Номинальная угловая скорость ротора, rad/sec	169.6
tstart	Время до начала разгона, с	0.5
tspeeding_up	Время разгона, с	2
tworking	Время работы с постоянной угловой скоростью, с	3
tbraking	Время торможения до остановки, с	4

Сейчас мы выполним один численный эксперимент и сохраним рассчитанные в процессе моделирования модальные координаты, необходимые для дальнейшего расчета напряжений и прогноза долговечности.

Загрузите файл конфигурации модели Vibrostand-configuration.icf (Файл -> загрузить конфигурацию).

Выберите вкладку **Подсистемы МКЭ | Моделирование | Настройки**, поставьте галочку в поле **Сохранять значения модальных координат** и выберите расположение файлов хранения результатов (.tmc и .itc файлы). По умолчанию, выбирается директория задачи и имя упругой подсистемы (*Платформа.tmc* и *Платформа.itc*).

Таким образом, мы настроили начальные условия и параметры модели, а также установили запись в файл модальных координат упругой рамы.

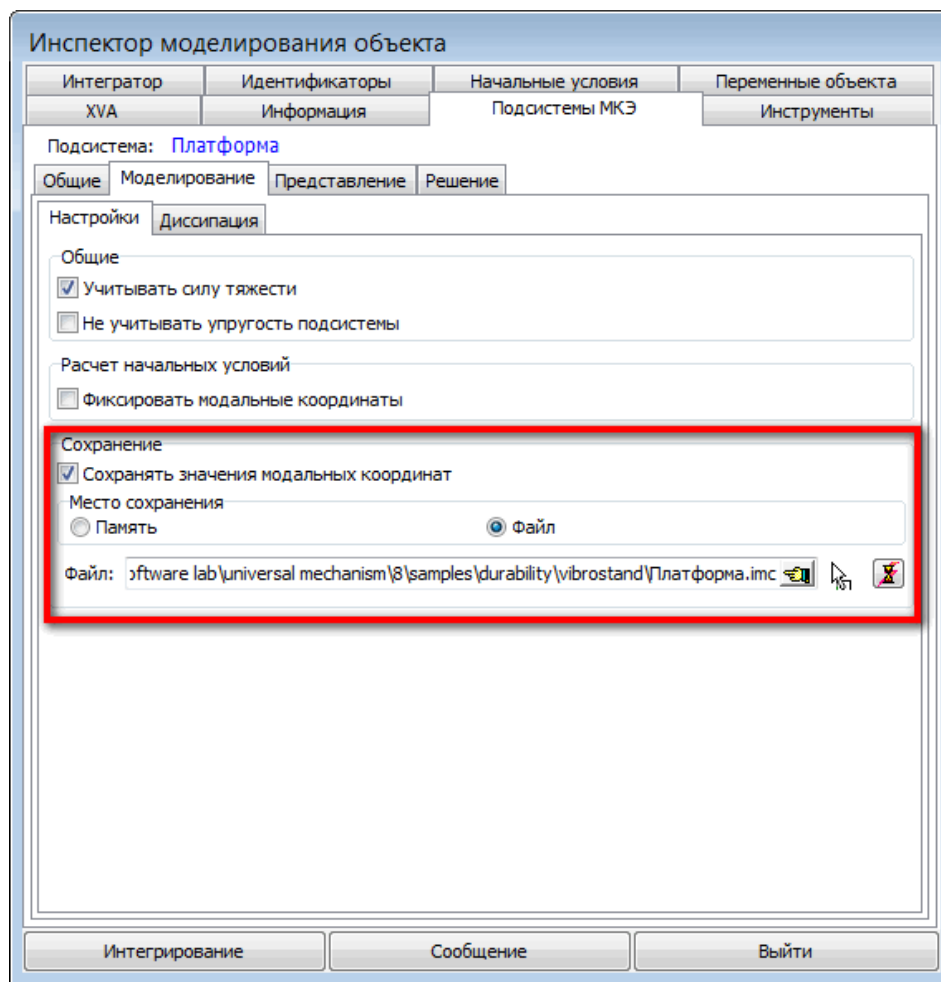


Рис. 2.3. Сохранение истории изменения модальных координат

3. Для запуска численного моделирования нажмите кнопку **Интегрирование**. Для ускорения выполнения теста можно свернуть или закрыть анимационное окно. Это позволит сэкономить время на изображение движения системы.

4. После окончания процесса моделирования в окне **Инспектора** паузы процесса моделирования нажмите кнопку **Прервать**, а затем в окне **Инспектора моделирования объекта** кнопку **Выйти**. Анимационное окно можно закрыть.

2.4. Анализ нагруженности

Выберите пункт главного меню **Инструменты | Долговечность...** Появится окно **Мастера расчета долговечности**. При открытии окна автоматически создастся пустой проект расчета.

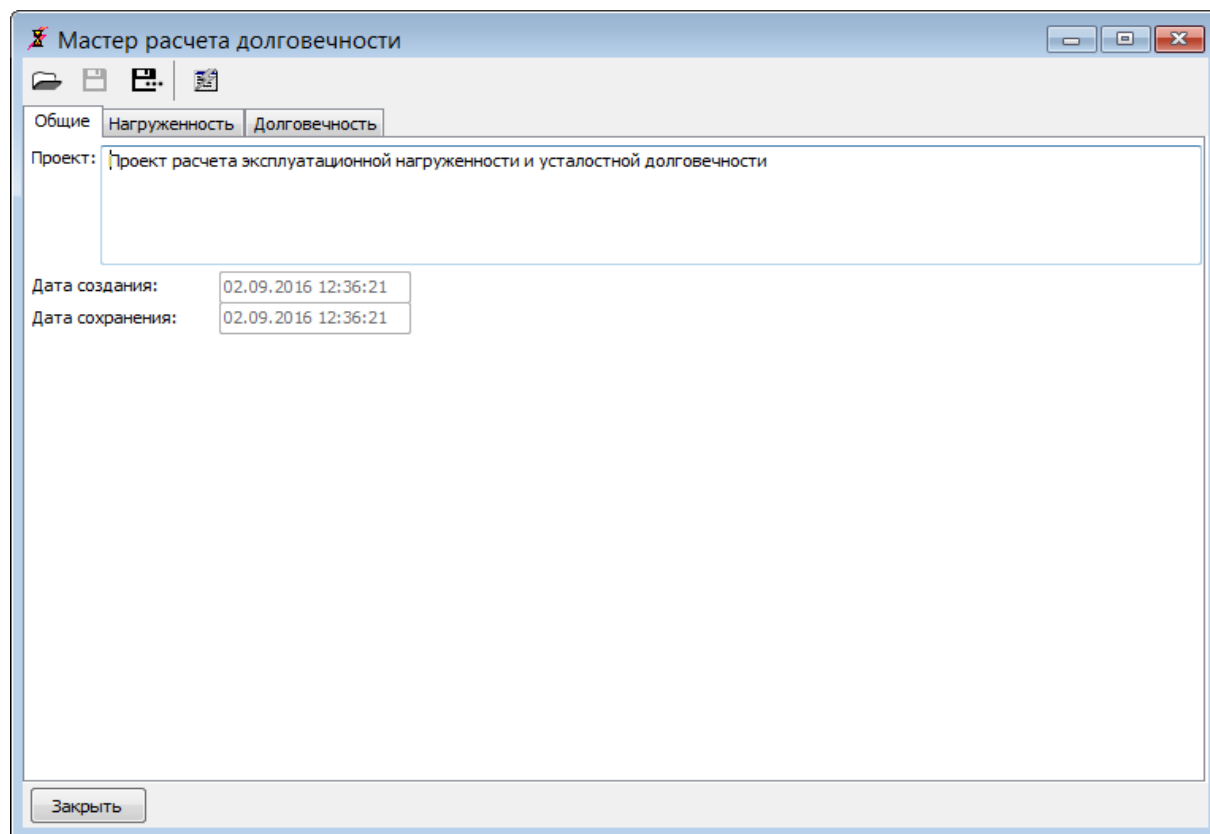



Рис. 2.4. Окно Мастера расчета долговечности

2.4.1. Описание режимов нагружения

Условия эксплуатации механизма можно описать тремя режимами: разгон, рабочий режим и торможение. Все три режима работы присутствуют в выполненном ранее эксперименте.

В окне **Мастера расчета долговечности** выберите вкладку **Нагруженность | Исходные данные | Режимы нагружения**.

С помощью кнопки  три раза добавьте к списку режимов нагружения ранее сохраненный файл результатов *Платформа.tmc*, см. рис. 2.5. окно описания режимов нагружения Первая загрузка файла займет большее время, т.к. при добавлении остальных данные упругой подсистемы не загружаются, а только проверяются на соответствие с первой загруженной.

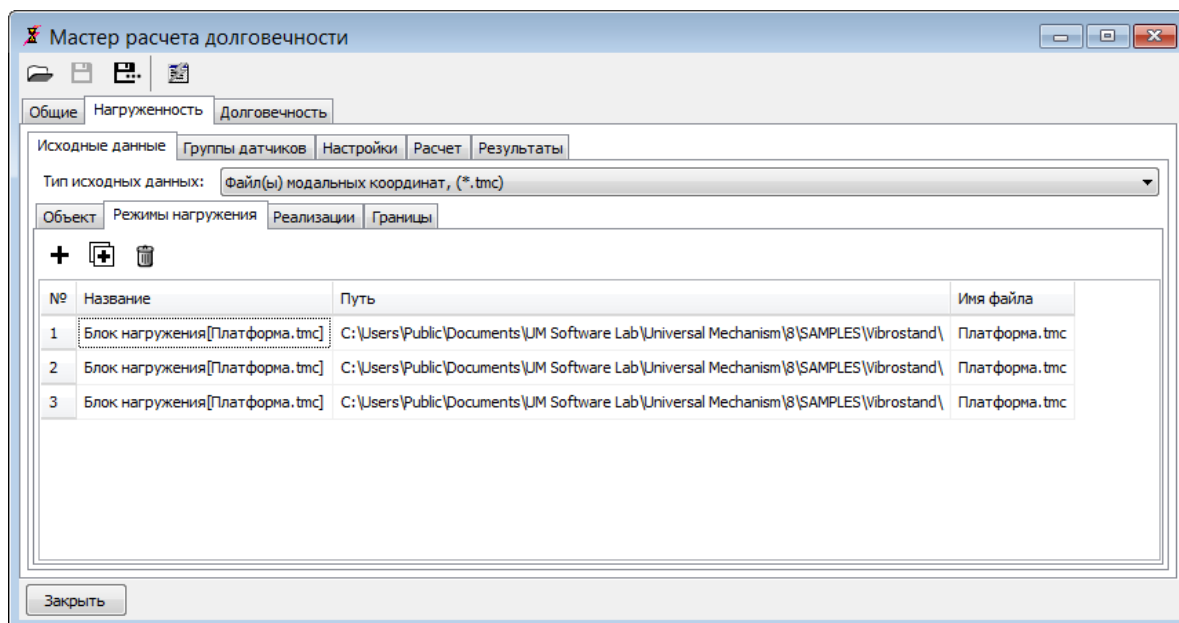


Рис. 2.5. Окно описания режимов нагружения

Так как в поставленном численном эксперименте, результаты которого мы загрузили, присутствуют все три выделенных нами ранее режима работы машины, мы можем выделить каждый из них по временной шкале, что и сделаем ниже.

Редактирование названий режимов нагружения

Давайте дадим режимам нагружения понятные названия – это упростит дальнейшую работу с режимами нагружения и анализ полученных результатов.

Отредактируйте вручную названия режимов нагружения так, как показано на рис. 2.6 или загрузите названия из заранее подготовленного текстового файла *Названия режимов нагружения.lcc* с помощью контекстного меню, см. рис. 2.6

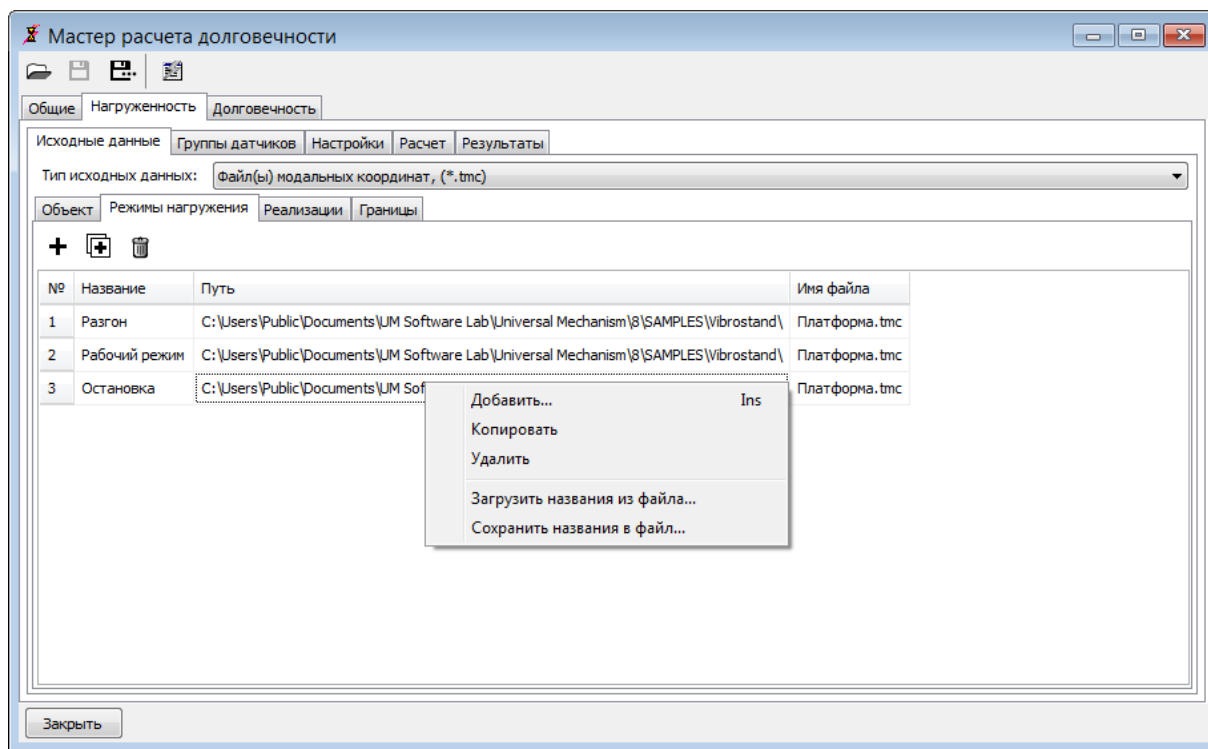


Рис. 2.6. Режимы нагружения: изменение названий режимов

Визуализация упругой подсистемы

Как только вы добавили первый режим нагружения на вкладке **Нагруженность** | **Исходные данные** появляется вкладка **Объект**. Перейдите на эту вкладку и еще раз посмотрите на исследуемый объект, см. рис. 2.7.

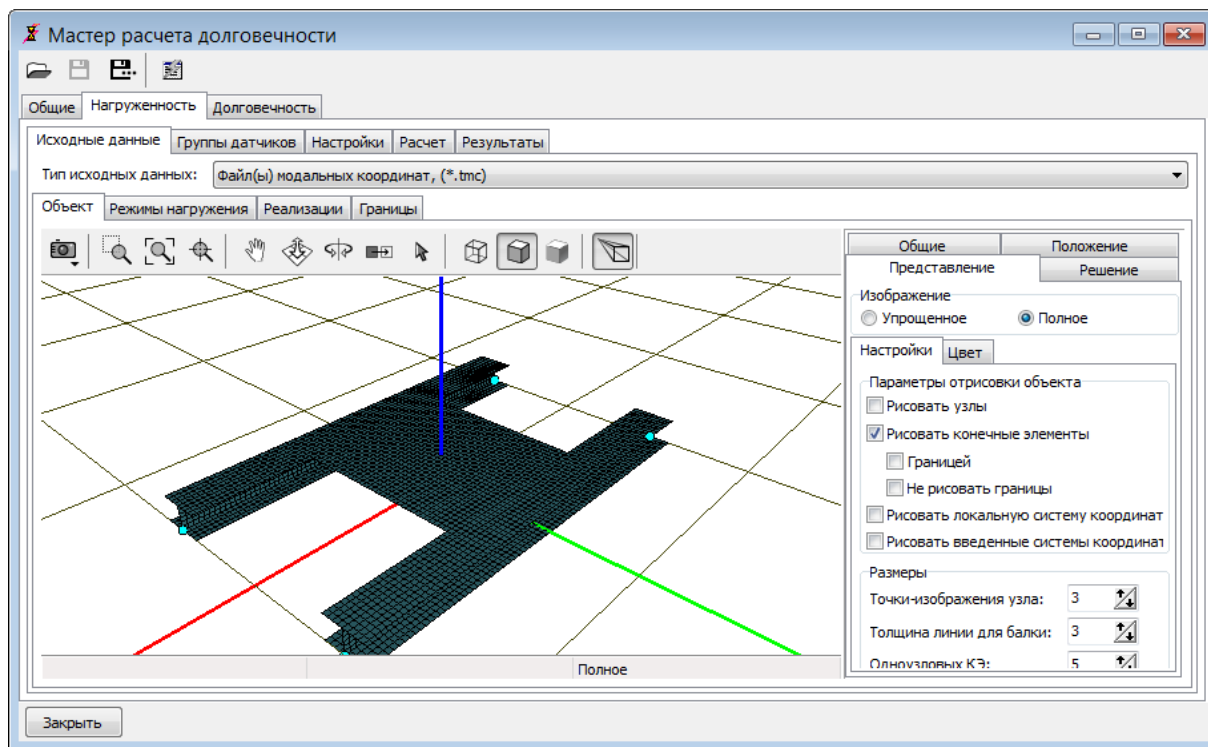



Рис. 2.7. Упругая подсистема

Построение графиков реализаций напряжений в узлах

Давайте проанализируем график изменения напряжения во времени для двух датчиков, расположенных в узлах с номерами **3773** и **259** конечноэлементной модели рамы вибростенда⁴.

1. Перейдите на вкладку **Нагруженность | Исходные данные | Реализации**.
2. Выберите **Эквивалентное фон Мизеса по главным напряжениям** в левой части окна.
3. В поле **Номер датчика** введите **3773** и нажмите кнопку **Рассчитать**.
4. Поле со значком  станет доступно. Далее перетащите это поле в графическое окно.
5. Повторите действия 3-4 для датчика **259**.

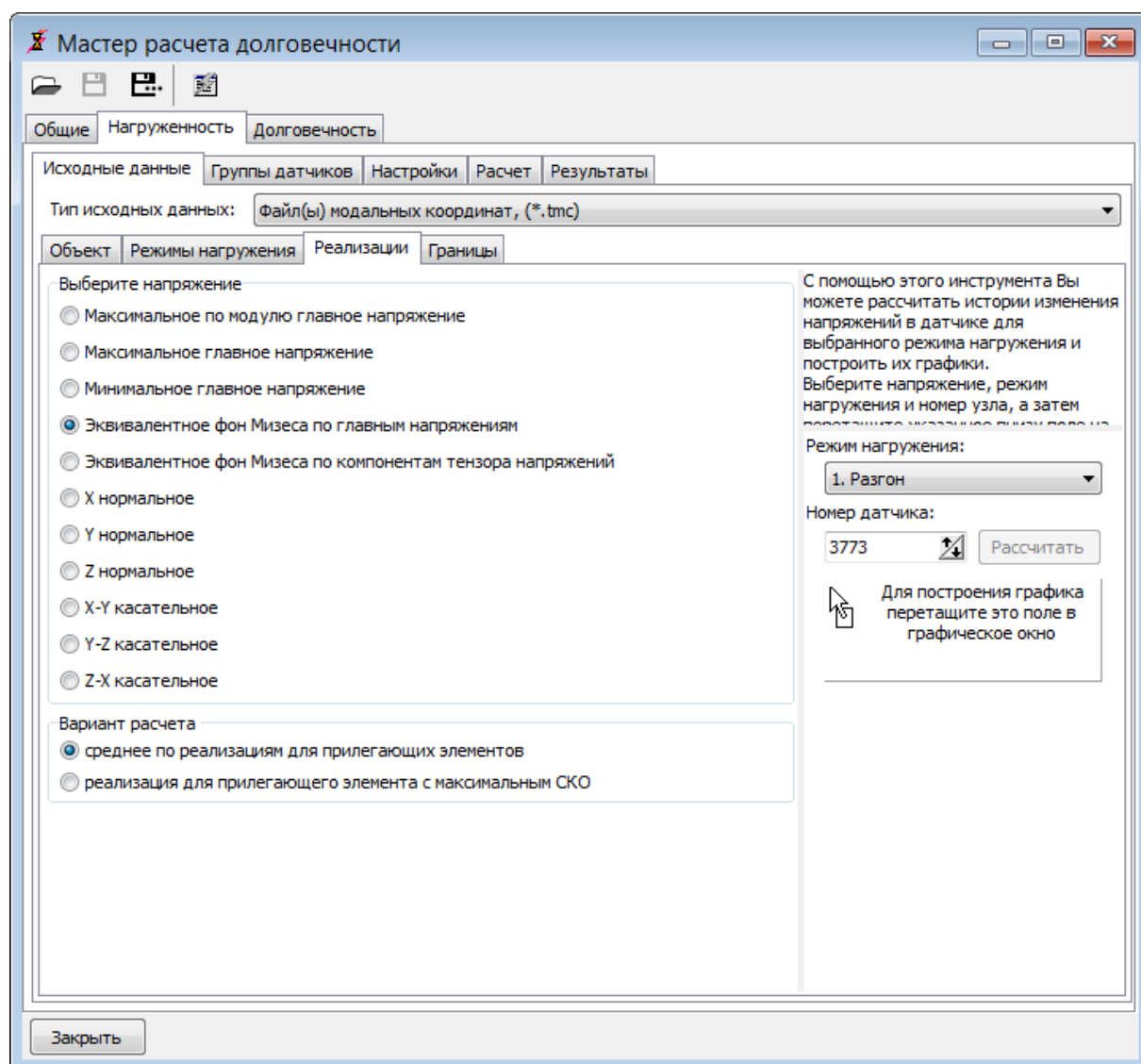


Рис. 2.8. Построение реализаций напряжений в узле 3773 конечноэлементной модели рамы

⁴ Позже мы увидим, что узлы 3773 и 259 располагаются в наиболее нагруженных зонах рамы платформы, но пока мы этого еще не знаем и идем дальше по уроку...

В графическом окне будут построены графики переменных – напряжений в выбранных узлах, см. рис. 2.9. На рисунке четко видны этапы разгона, рабочего режима и остановки.

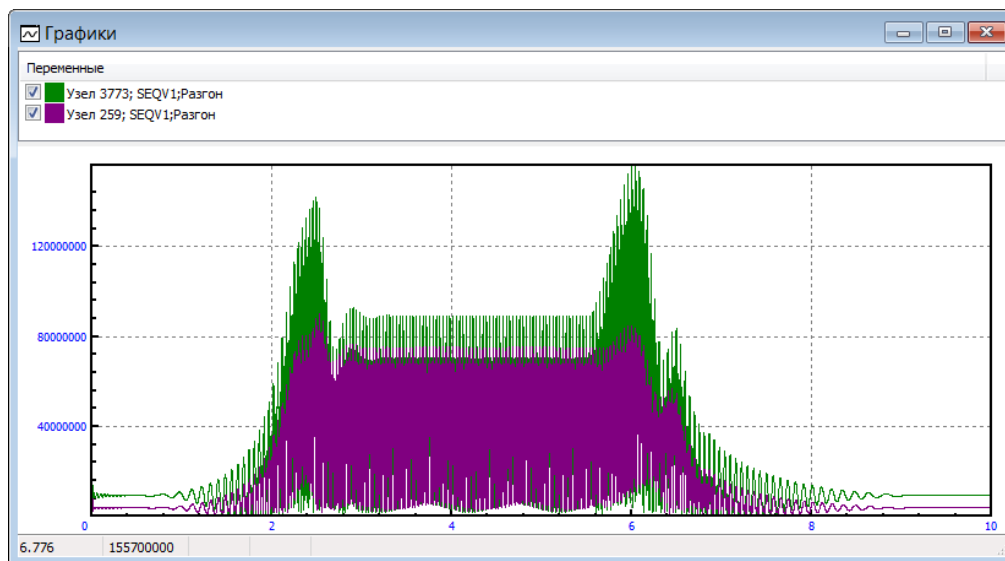


Рис. 2.9. Реализация напряжений в узлах 3773 и 259

Настройка интервалов времени для режимов нагружения

В соответствии с графиком реализации напряжений, представленном на рис. 2.9. определим интервалы времени для каждого из режимов нагружения.

Перейдите на вкладку **Нагруженность | Исходные данные | Границы**.

Введите вручную значения левой и правой границ интервалов, как показано на рис. 2.10. или загрузите значения из текстового файла *Интервалы времени.int*.

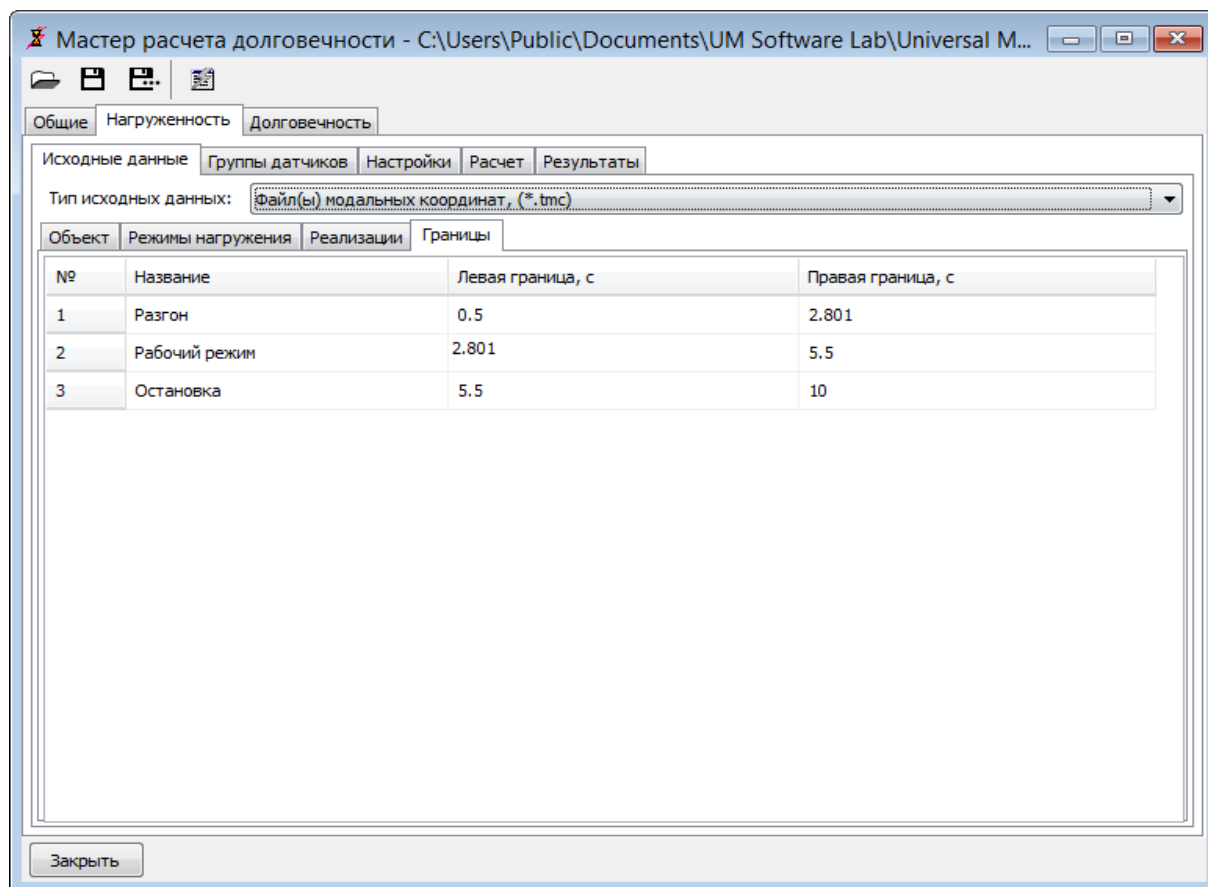


Рис. 2.10. Границы режимов нагружения

2.4.2. Описание групп датчиков

Поскольку количество узлов конечно-элементной (КЭ) модели рамы вибростенда относительно невелико, проведем анализ нагруженности для всех узлов. Для этого создадим датчики напряжений во всех узлах КЭ схемы.

По умолчанию при добавлении первого режима нагружения создается группа узлов **Вся деталь**, куда включаются все узлы, см. вкладку **Нагруженность | Группы датчиков**.

Выберите вкладку **Нагруженность | Группы датчиков**, см. рис. 2.11.

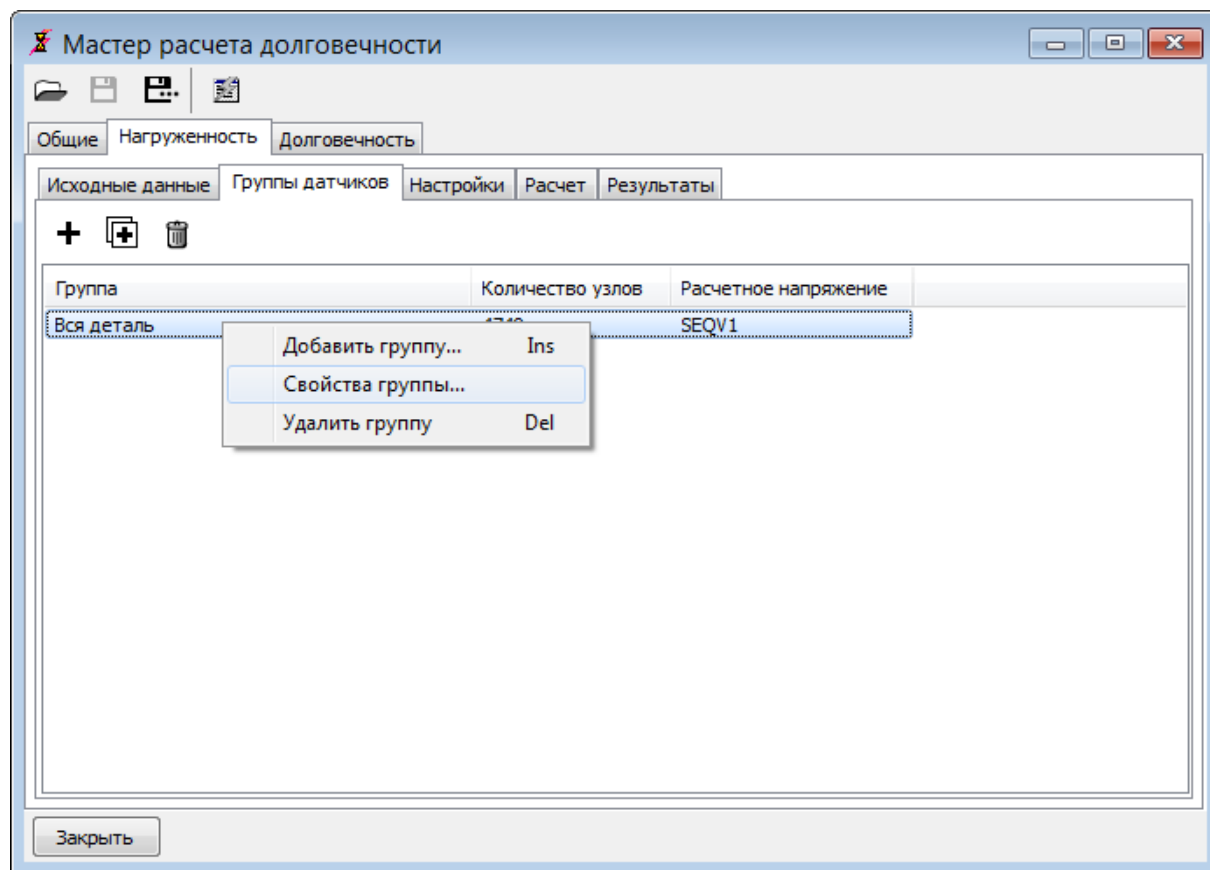


Рис. 2.11. Задание групп датчиков

Дважды щелкните левой кнопкой мыши на имени группы **Вся деталь** либо выберите **Свойства группы...** из контекстного меню группы, см. рис. 2.11.

В открывшемся окне выберите вкладку **Список узлов**, чтобы отобразить список узлов КЭ схемы рамы, входящих в группу, см. рис. 2.12.

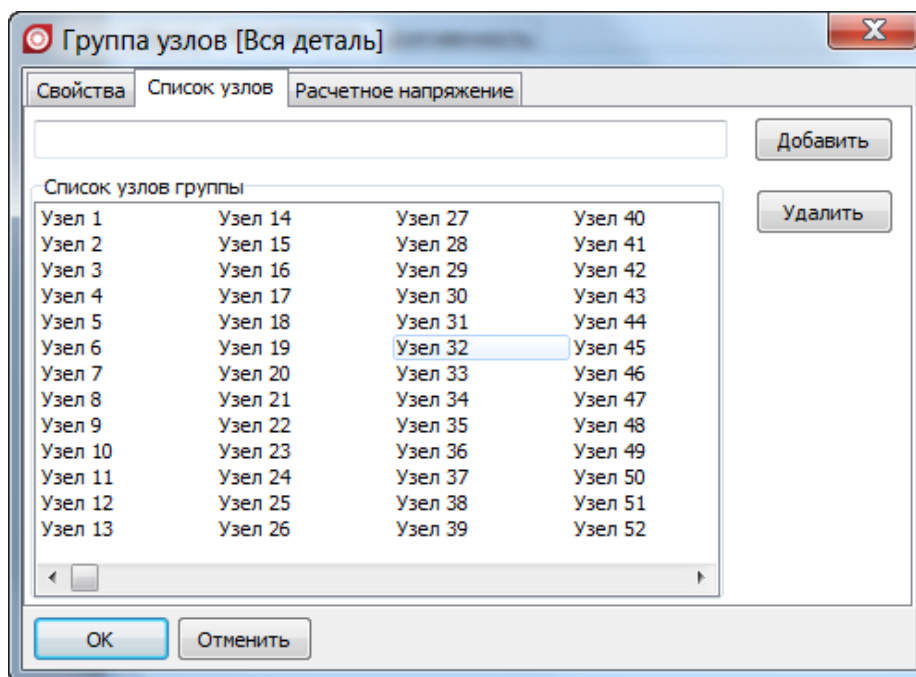


Рис. 2.12. Список датчиков – узлов КЭ модели группы

Выбор расчетных напряжений для групп датчиков

Выберите вкладку **Расчетное напряжение**, см. рис. 2.13.

Поле **Выберите расчетные напряжения** установите в **Эквивалентное фон Мизеса по главным напряжениям**⁵.

В поле **Вариант расчета** выберите **среднее по реализациям для прилегающих элементов**⁶.

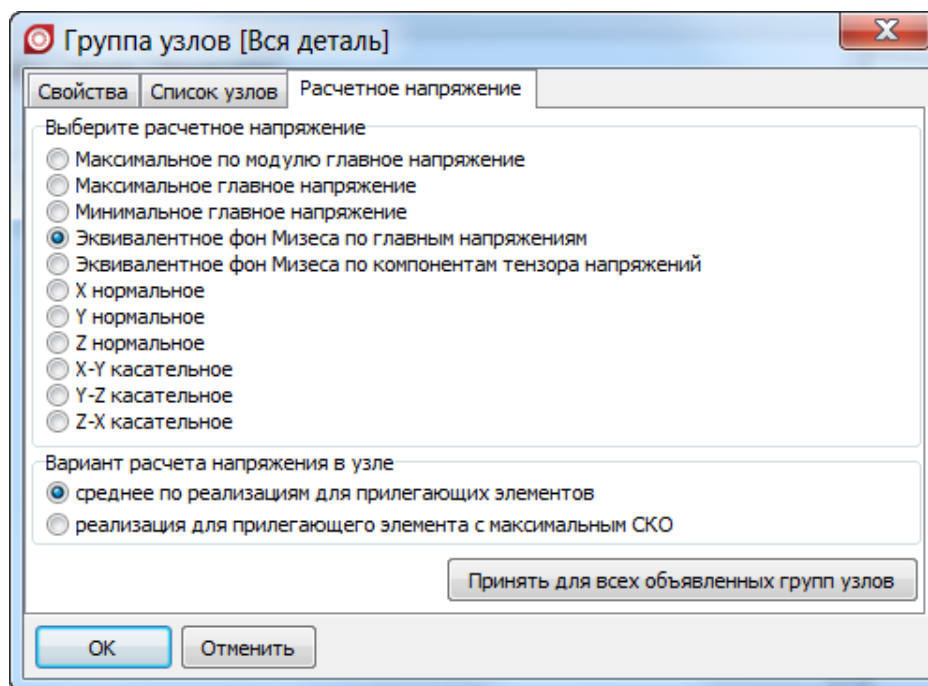


Рис. 2.13. Выбор расчетных напряжений для группы Вся деталь

Нажмите **ОК** для того чтобы сохранить изменения и закрыть окно описания свойств группы.

2.4.3. Настройки расчета нагруженности

1. Перейдите на вкладку **Нагруженность | Настройки** и выполните настройки расчета нагруженности так, как показано на, см. рис. 2.14.

⁵ Эквивалентные напряжения применяются в качестве расчетных в том случае, если в материале детали в процессе эксплуатации реализуется сложное напряженное состояние, и компоненты тензора напряжений изменяются синхронно.

⁶ Каждый узел конечно-элементной сетки может принадлежать нескольким конечным элементам (КЭ). В этом случае расчетное напряжение в одном и том же узле может отличаться в зависимости от того, для какого КЭ производится расчет. Поле **Вариант расчета** позволяет выбрать схему, по которой будут рассчитываться напряжения в этом случае.

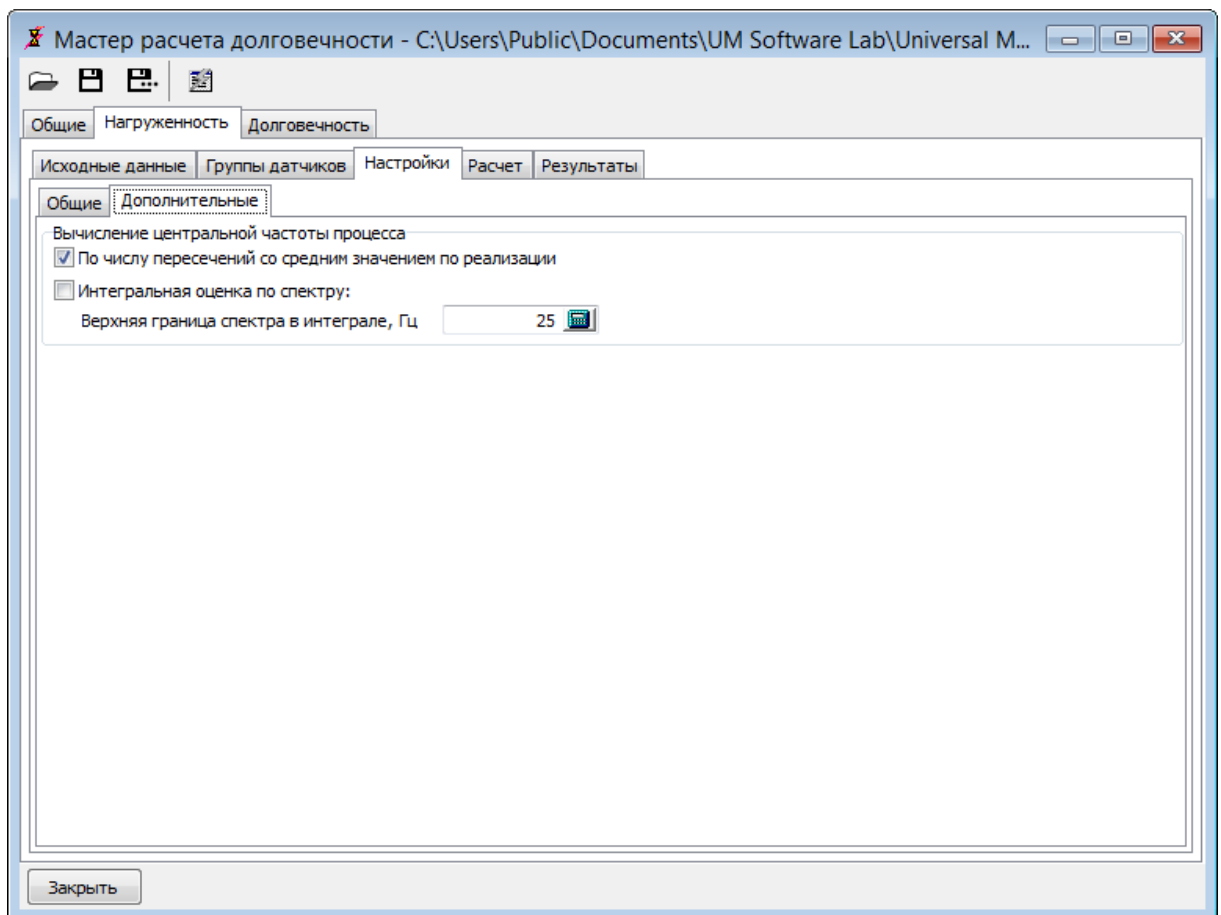
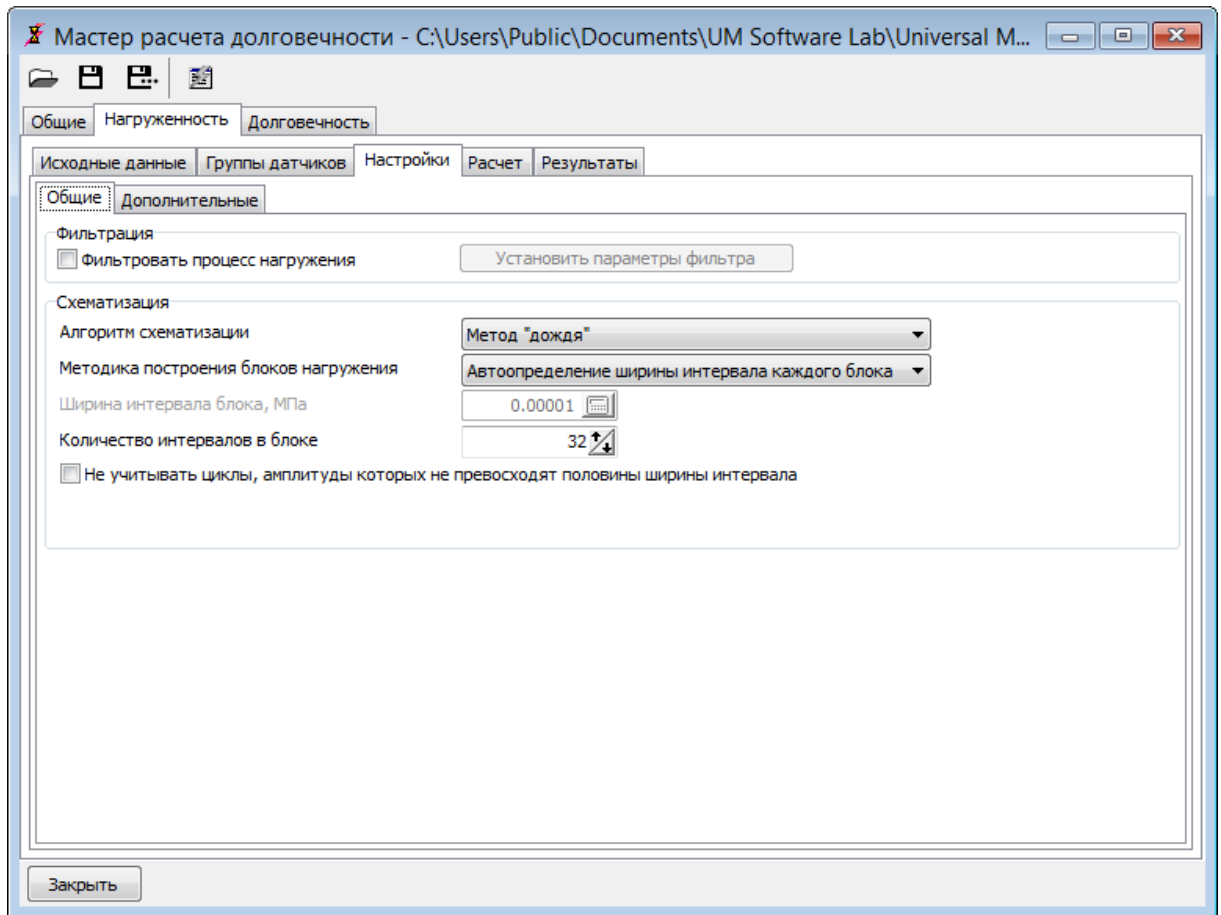



Рис. 2.14. Параметры расчета нагруженности


2.4.4. Сохранение проекта в файл

1. Щелкните кнопку  в верхнем левом углу окна **Мастера расчета нагруженности и долговечности** и сохраните проект в файл.

2.4.5. Расчет нагруженности

1. Выберите вкладку **Нагруженность** | **Расчет**.
2. Нажмите кнопку **Рассчитать**.

Перед началом расчета автоматически запустится проверка корректности и полноты исходных данных и далее начнется выполнение расчета нагруженности, см. рис. 2.15. Расчет нагруженности займет некоторое время, ориентировочно от 10 до 30 минут в зависимости от производительности Вашего компьютера.

Индикатор выполнения позволяет оценить стадию расчета. С помощью кнопки , расположенной справа от основного индикатора, можно отобразить дополнительные индикаторы, отражающие выполнение расчета напряжений в узлах и обработки и последующей рассчитанных реализаций.

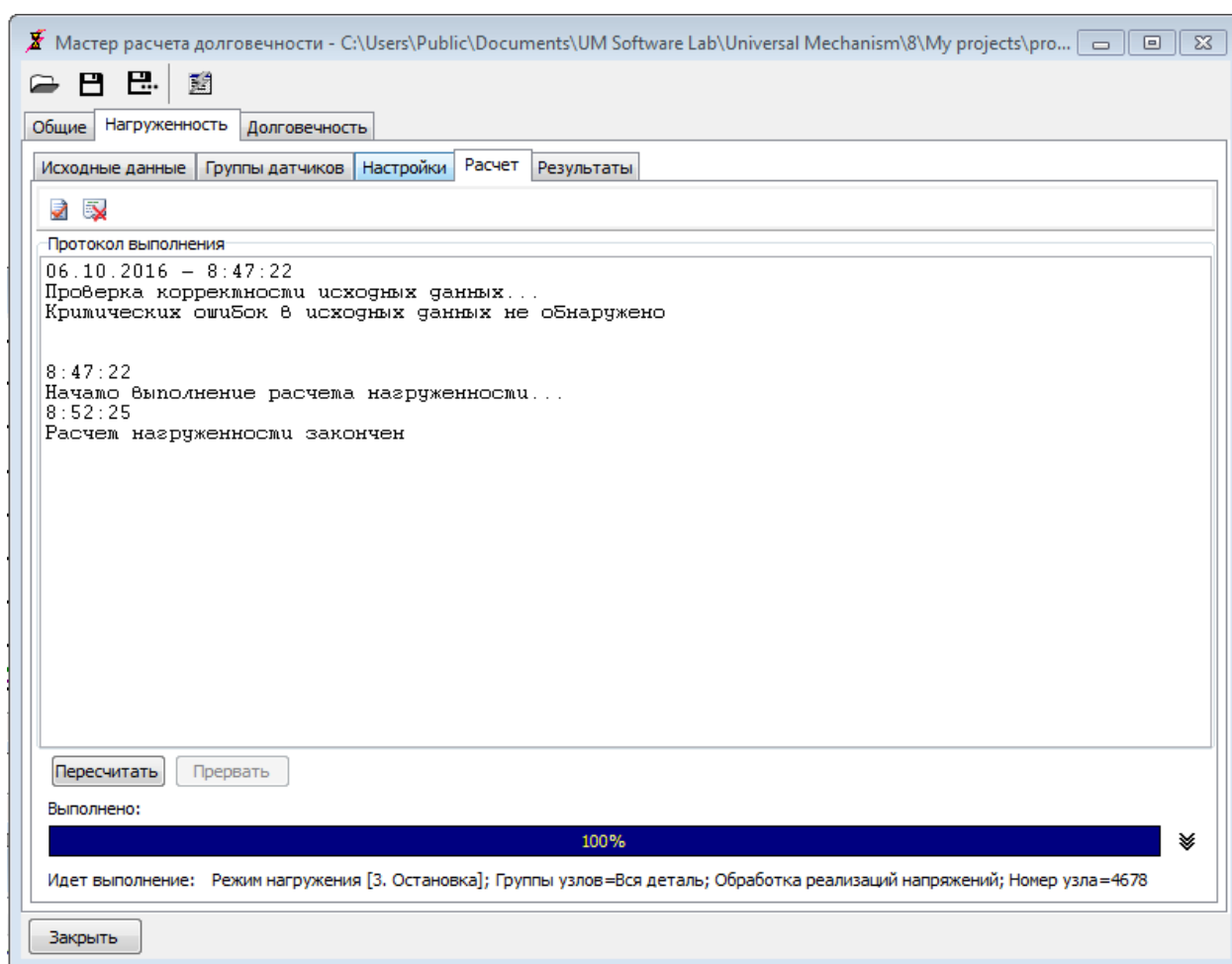


Рис. 2.15. Выполнение расчета нагруженности

2.4.6. Анализ результатов расчета нагруженности

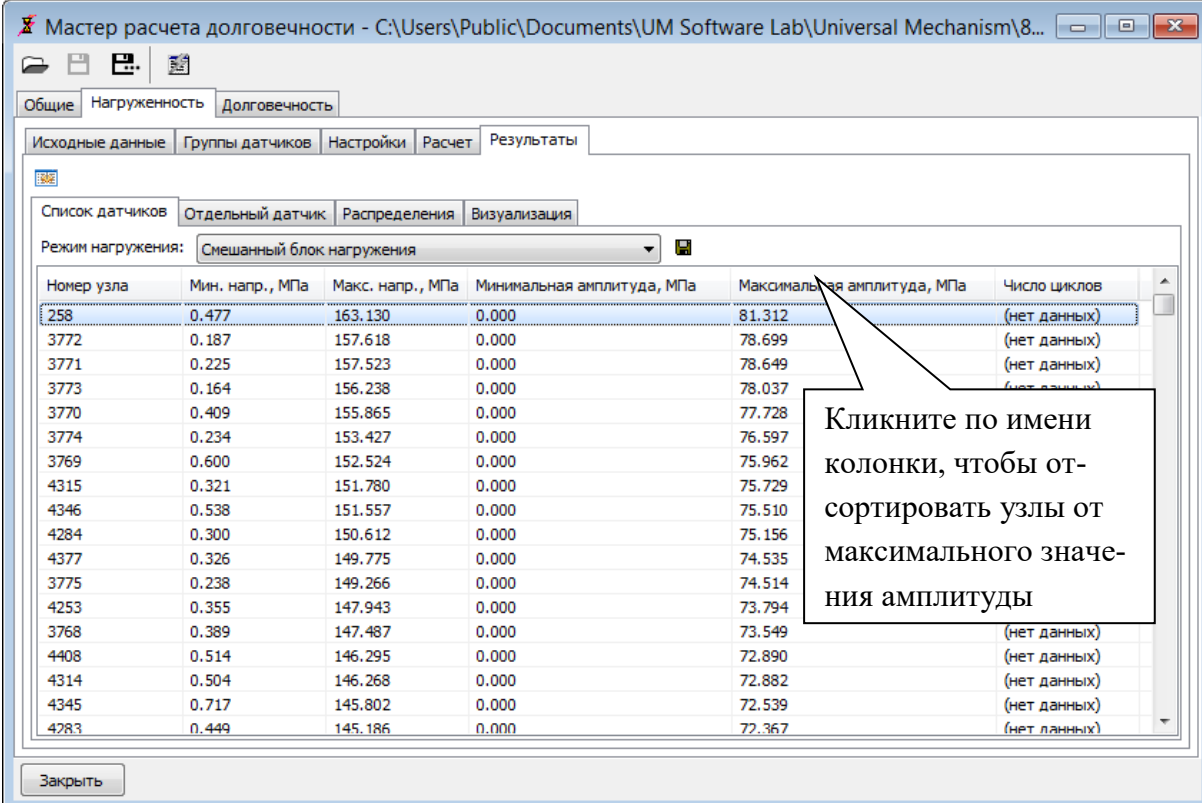
1. Выберите вкладку **Нагруженность** | **Результаты** | **Список датчиков**.
2. В выпадающем списке **Режим нагружения** выберите **Смешанный блок нагружения**.

3. Отсортируйте узлы по убыванию максимальной амплитуды циклов нагружения, см. рис. 2.16. Для этого щелкните один раз левой клавишей мыши на заголовке соответствующего столбца.

Включить/выключить столбцы данных можно с помощью пункта контекстного меню

Настройка отображения или кнопки . По умолчанию включены все столбцы.

Поскольку выбран **Смешанный блок нагружения** отображаемые показатели соответствуют результатам оценки всей совокупности частных режимов – полным реализациям напряжений в датчиках.



Мастер расчета долговечности - C:\Users\Public\Documents\UM Software Lab\Universal Mechanism\8...

Общие Нагруженность Долговечность

Исходные данные Группы датчиков Настройки Расчет Результаты

Список датчиков Отдельный датчик Распределения Визуализация

Режим нагружения: Смешанный блок нагружения

Номер узла	Мин. напр., МПа	Макс. напр., МПа	Минимальная амплитуда, МПа	Максимальная амплитуда, МПа	Число циклов
258	0.477	163.130	0.000	81.312	(нет данных)
3772	0.187	157.618	0.000	78.699	(нет данных)
3771	0.225	157.523	0.000	78.649	(нет данных)
3773	0.164	156.238	0.000	78.037	(нет данных)
3770	0.409	155.865	0.000	77.728	
3774	0.234	153.427	0.000	76.597	
3769	0.600	152.524	0.000	75.962	
4315	0.321	151.780	0.000	75.729	
4346	0.538	151.557	0.000	75.510	
4284	0.300	150.612	0.000	75.156	
4377	0.326	149.775	0.000	74.535	
3775	0.238	149.266	0.000	74.514	
4253	0.355	147.943	0.000	73.794	
3768	0.389	147.487	0.000	73.549	(нет данных)
4408	0.514	146.295	0.000	72.890	(нет данных)
4314	0.504	146.268	0.000	72.882	(нет данных)
4345	0.717	145.802	0.000	72.539	(нет данных)
4283	0.449	145.186	0.000	72.367	(нет данных)

Кликните по имени колонки, чтобы отсортировать узлы от максимального значения амплитуды

Заккрыть

Рис. 2.16. Результаты: список узлов

Максимальные амплитуды циклов напряжения, оказывающих определяющее влияние на усталостную долговечность материала, обнаруживаются в узлах 258, 3772, 3771, 3773.

4. Повторите действия 1-3 для отдельных режимов и убедитесь, что максимальные амплитуды напряжений возникают в следующих узлах:

Режим **Разгон** – узлы **258, 3770, 3771, 3769**.

Режим **Рабочий режим** – узлы **258, 542, 3769, 3770**.

Режим **Остановка** – узлы **258, 3772, 3771, 3773**.

Отыщем положение данных узлов в модели и посмотрим общее распределение показателей нагруженности в раме.

5. Перейдите на вкладку **Нагруженность | Результаты | Визуализация**.
6. В поле **Режим нагружения** выберите **Смешанный блок нагружения**.
7. В поле **Данные для визуализации** выберите **Максимальные амплитуды циклов нагружения**, см. рис. 2.17.

8. Нажмите кнопку **Показать**, появится окно с распределением максимальных амплитуд циклов, рис. 2.18.

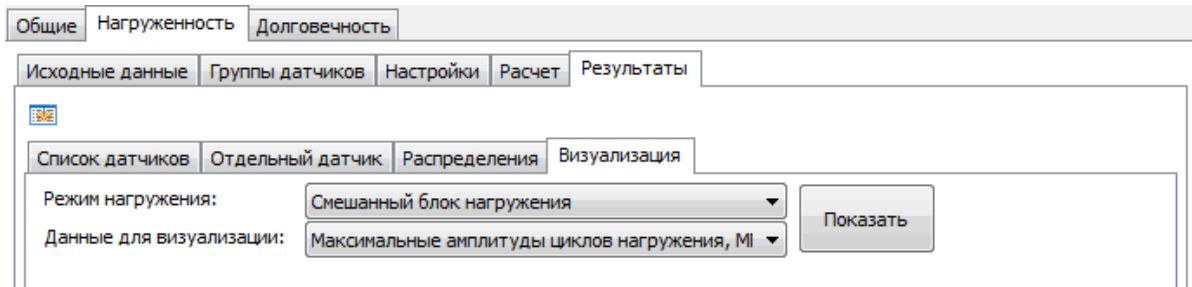


Рис. 2.17. Результаты: визуализация

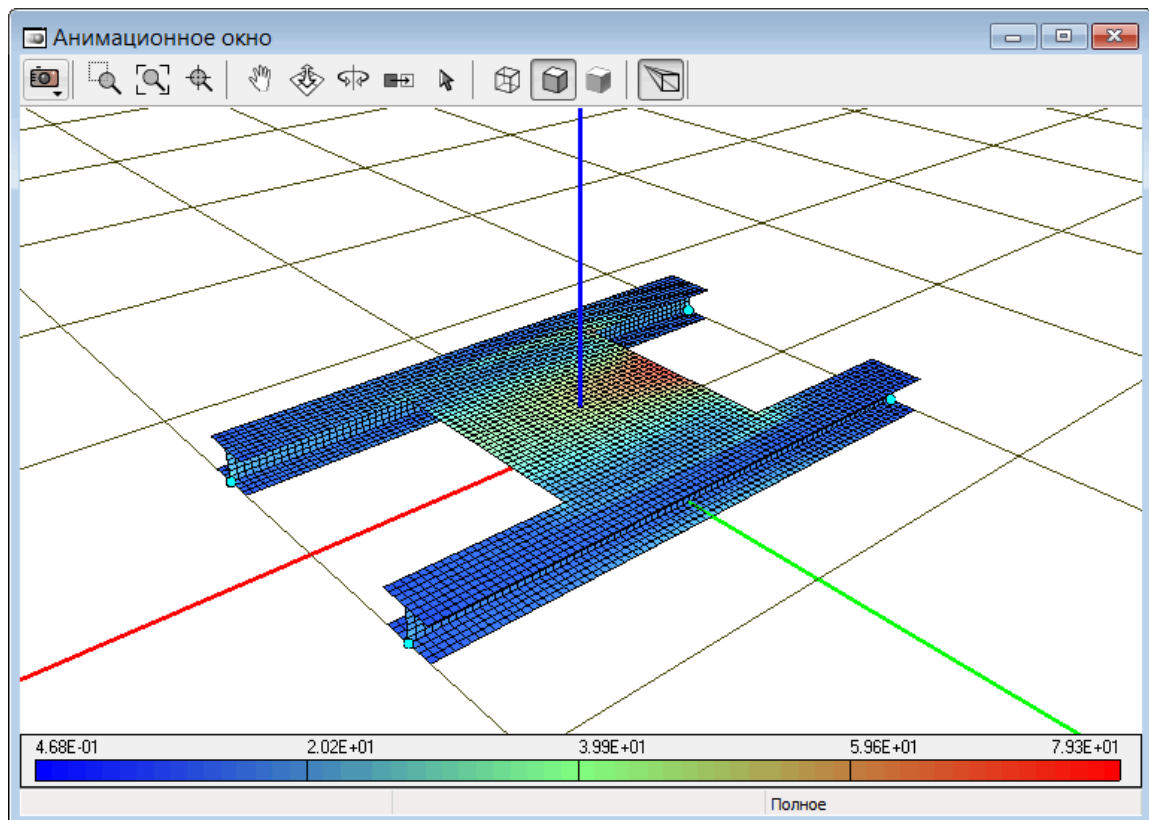


Рис. 2.18. Распределение максимальных амплитуд циклов нагружения

9. В контекстном меню окна выберите команду **Выделить конечно-элементные узлы**. Появится диалоговое окно выбора узлов.
10. В поле **Поиск узла** выберите опцию **по номеру**, а в поле N введите номер **258**, как показано на рис. 2.19.

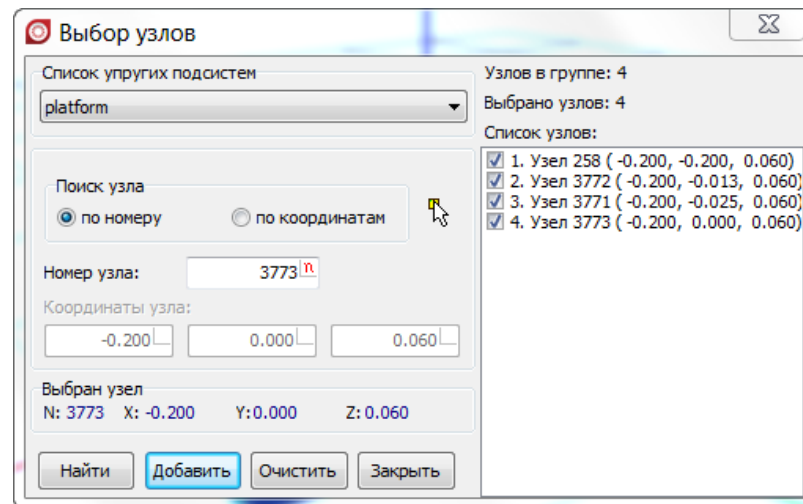


Рис. 2.19. Выбор узлов для выделения

11. Затем нажмите кнопку **Найти и Добавить**. Узел **258** будет добавлен к списку выделенных и отразится в списке в правой части окна, рис. 2.19.
12. Повторите действия 10-11 для узлов с номерами **3772, 3771, 3773**.
13. Нажмите кнопку **Заккрыть**. Выбранные узлы будут выделены на конечно-элементной модели рамы зелеными точками, см. рис. 2.20. Наведите курсор на точку – в нижнем поле окна отобразится номер и координаты узла.

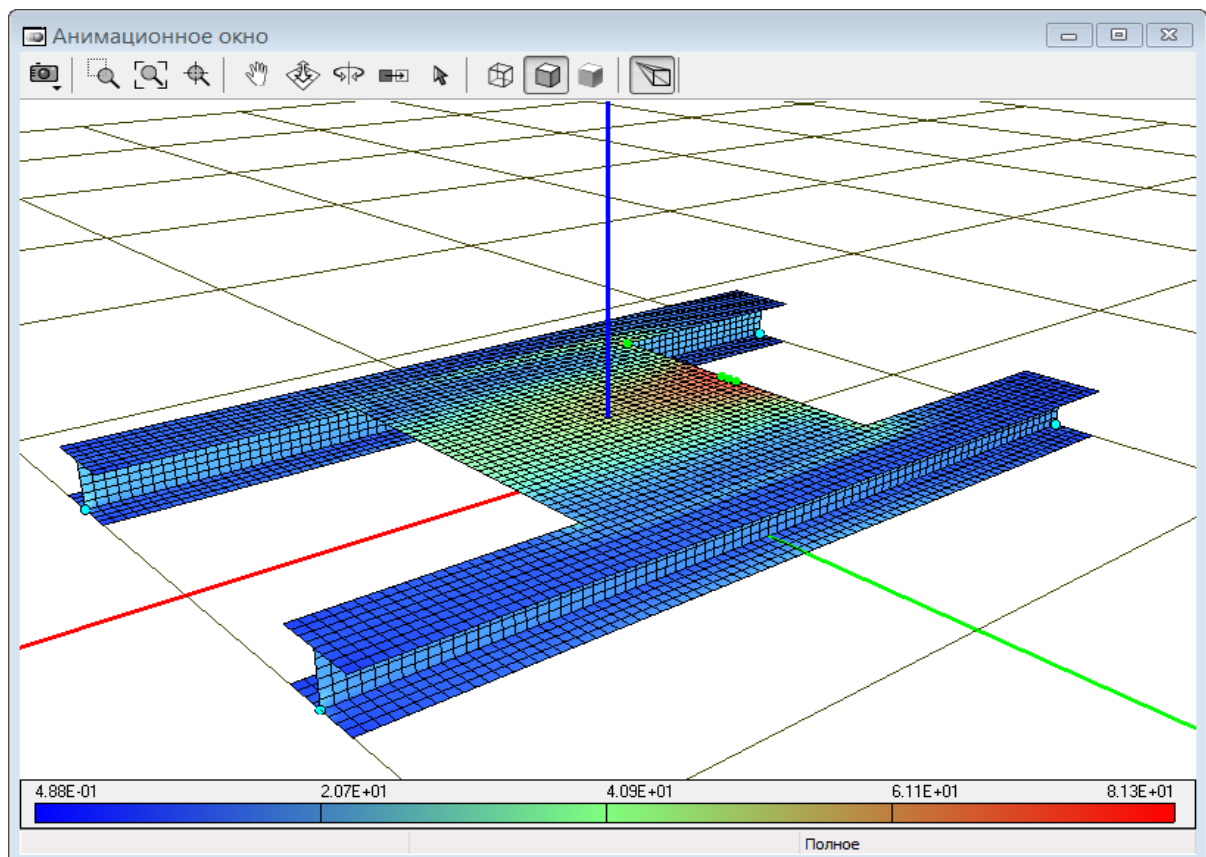

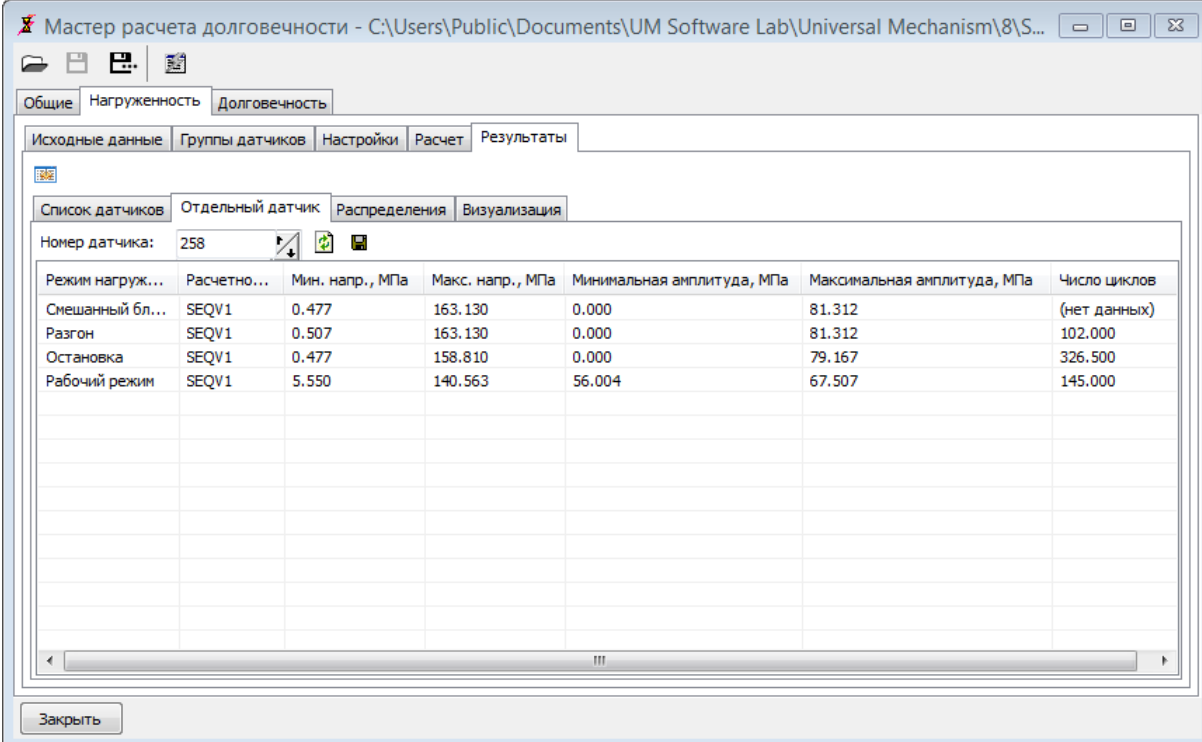


Рис. 2.20. Отображение выделенных узлов на КЭ схеме рамы

Далее проанализируем, какой из режимов нагружения является самым опасным с точки зрения возникновения высоких амплитуд напряжений в узле **258**.



14. Перейдите на вкладку **Нагруженность** | **Результаты** | **Отдельный датчик**, в поле **Номер узла** введите **258**, затем нажмите **Enter** или кнопку  для обновления данных в таблице, см. рис. 2.21.

Анализ данных в таблице на рис. 2.21. показывает, что максимальные напряжения и амплитуды циклов напряжений наблюдаются на режимах **Разгон** и **Остановка** – их величины превышают аналогичные показатели для **Рабочего режима**.



Режим нагруж...	Расчетно...	Мин. напр., МПа	Макс. напр., МПа	Минимальная амплитуда, МПа	Максимальная амплитуда, МПа	Число циклов
Смешанный бл...	SEQV1	0.477	163.130	0.000	81.312	(нет данных)
Разгон	SEQV1	0.507	163.130	0.000	81.312	102.000
Остановка	SEQV1	0.477	158.810	0.000	79.167	326.500
Рабочий режим	SEQV1	5.550	140.563	56.004	67.507	145.000

Рис. 2.21. Результаты: отдельный датчик

15. Для анализа распределения показателей нагруженности перейдите на вкладку **Нагруженность** | **Результаты** | **Распределения** | **Двухпараметрическое распределение**⁷, см. рис. 2.22.
16. В поле **Номер узла** введите **258** и нажмите **Enter** или кнопку  для обновления данных в таблице, см. рис. 2.22.
17. Для графического отображения распределения нажмите кнопку , см. рис. 2.22.

⁷ Двухпараметрическое распределение – это распределение по амплитудам и средним значениям циклов нагружения

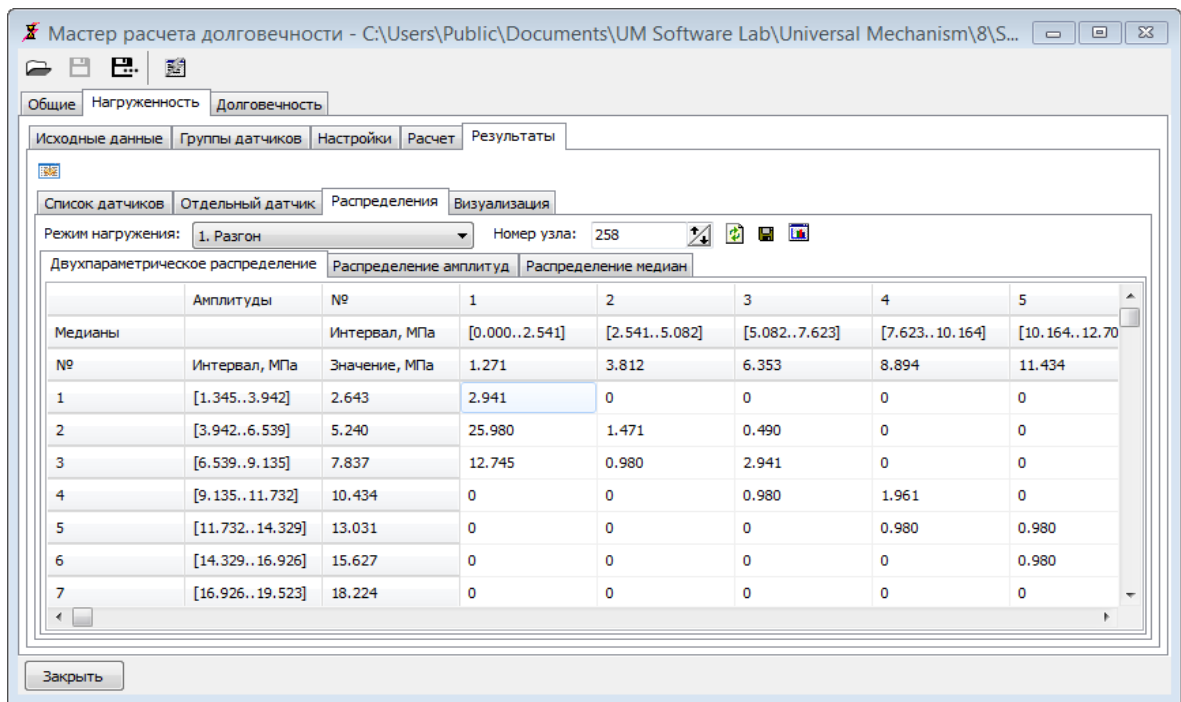


Рис. 2.22. Результаты для режима Разгон в табличной форме

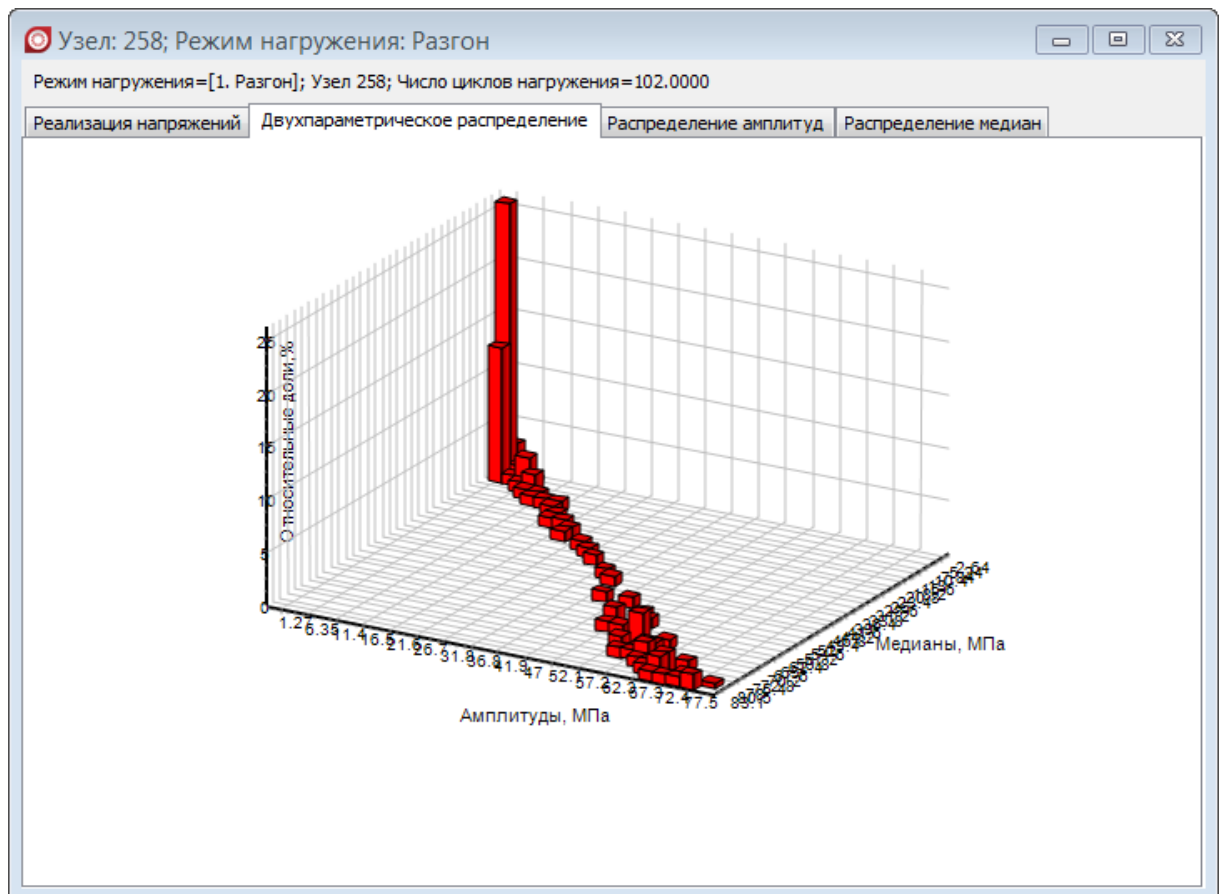


Рис. 2.23. Результаты для режима Разгон в форме гистограммы

Полученные результаты оценки нагруженности могут быть использованы для оценки усталостной долговечности конструкции во внешних программах, либо для расчетов

вручную. В **Мастер** включен набор инструментов **Анализ долговечности** для оценки усталостной прочности деталей с использованием полученных результатов по методикам, применяющимся в транспортном и общем машиностроении.

2.4.7. Сохранение проекта в файл

1. Щелкните кнопку  для сохранения проекта в файл.

2.5. Анализ долговечности

2.5.1. Настройка параметров расчета долговечности

1. Перейдите на вкладку **Долговечность | Метод** и в поле **Метод расчета** выберите **S-N метод**, см. рис. 2.24. **S-N метод** – основной метод анализа долговечности, реализованный в модуле UM Durability.

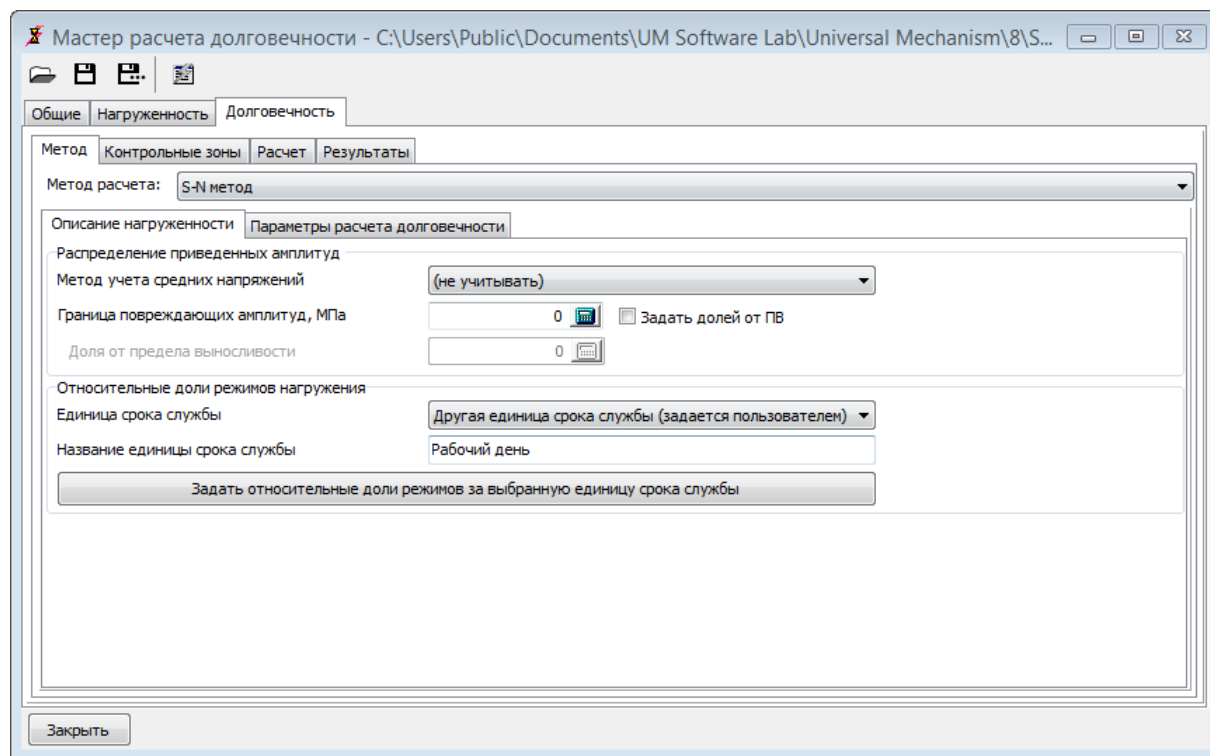


Рис. 2.24. Настройка параметров расчета долговечности

2. Выберите вкладку **Описание нагруженности**, см. рис. 2.24.
Для первого знакомства с программой не будем производить коррекцию напряжений с учетом среднего.
3. В поле **Метод учета средних напряжений** выберите **(не учитывать)**.
4. В поле **Граница повреждающих амплитуд** введите **0**. Это означает, что все циклы нагружения вне зависимости от их амплитуд напряжений приводят к повреждению материала детали.
Для оценки долговечности будем использовать собственную единицу срока службы – **Рабочий день**.
5. В поле **Единица срока службы** введите **Другая единица...**
6. В поле **Название единицы срока службы** введите **Рабочий день**, см. рис. 2.24.
7. Затем нажмите кнопку **Задать относительные доли...**, откроется окно задания коэффициентов, см. рис. 2.25.

Пусть двигатель работает по 8 часов в день, 310 дней в году. Каждый день двигатель **один раз** включается и **один раз** выключается. В соответствии с этими условиями *Разгон* и *Остановка* повторяются один раз в день. *Рабочий режим* представлен в виде истории

напряжений, занимающей 2.7 секунд . За восьмичасовой рабочий день эти 2.7 секунды повторяются $(8*60*60 \text{ секунд в день}) / 2.7 = 10670$ раз.

8. Введите эти данные в диалоговое окно, см. рис. 2.25.

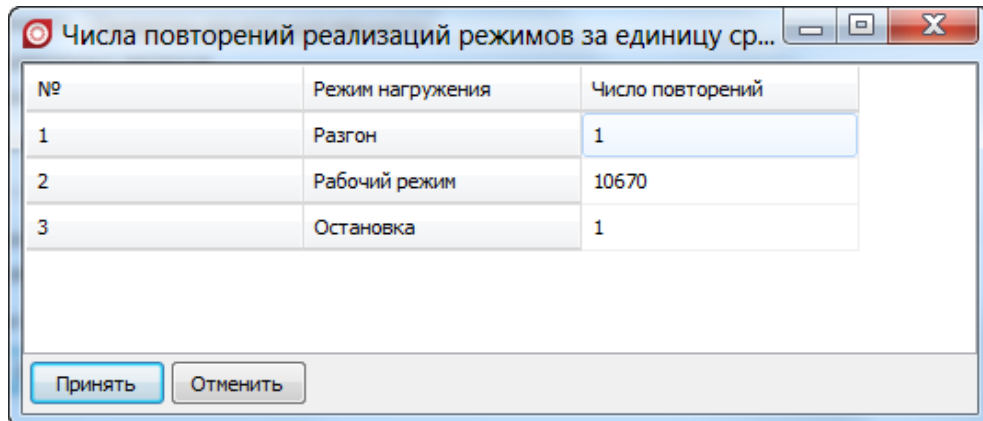


Рис. 2.25. Число повторений за единицу срока службы

9. Выберите вкладку **Параметры расчета долговечности**, см. рис. 2.26.

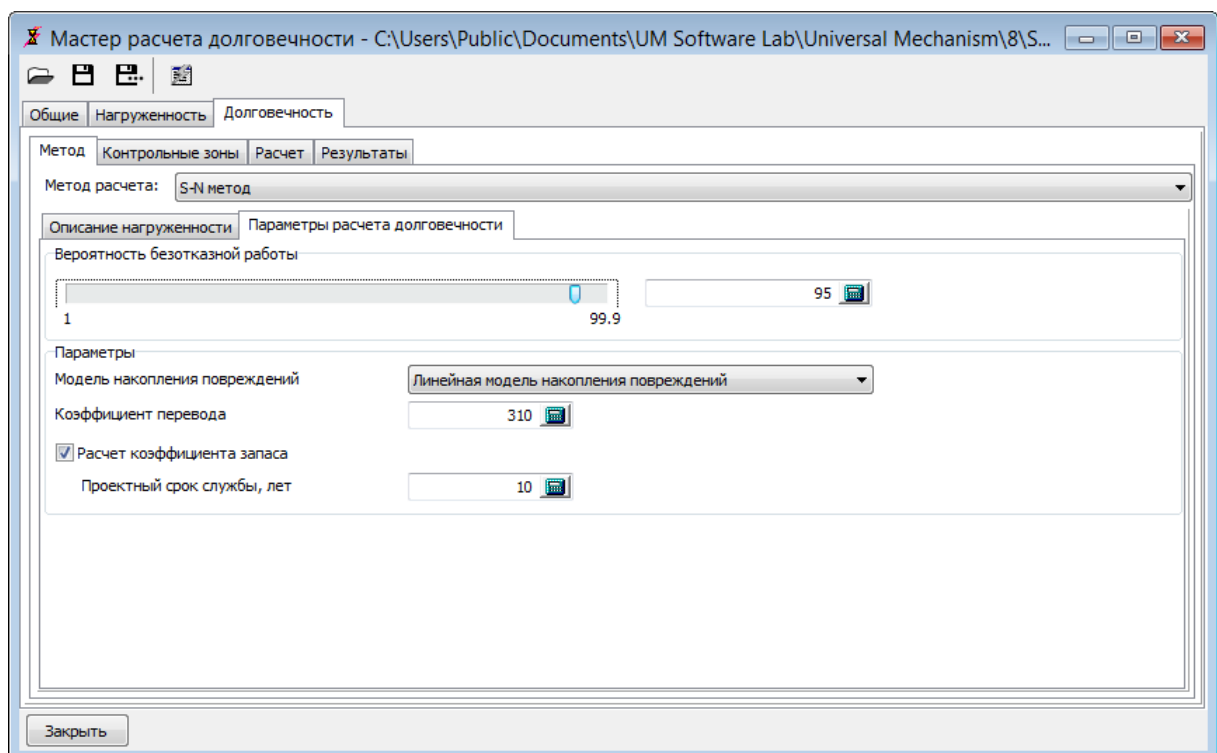


Рис. 2.26. Параметры расчета долговечности

10. В поле **Вероятность безотказной работы** введите 95%. Результаты расчета будут соответствовать сроку службы с 5% вероятностью отказа.
11. В поле **Коэффициент перевода** введите **310** (310 рабочих дней в году).
12. Включите флажок **Расчет коэффициента запаса** и в поле **Проектный срок службы** введите **10** лет.

2.5.2. Выбор контрольных зон

Максимальные амплитуды циклов напряжений на режимах **Разгона** и **Остановки** в процессе эксплуатации возникают в середине верхнего листа (узел **3773**), а в **Рабочем режиме** – в местах соединений верхнего листа рамы с двутавровыми опорными балками (узлы **258**, **542**). Зоны соединений являются потенциально опасными и вследствие повышенной концентрации напряжений.

Выбранная КЭ схема позволяет с достаточной точностью определить уровень напряжений в середине верхнего листа, в то же время, результаты расчета напряжений в углах соединений могут иметь погрешности.

Оценку усталостной прочности материала верхнего листа рамы будем проводить по локальным напряжениям, а соединений – по номинальным.

2.5.3. Описание контрольных зон и свойств сопротивления усталости

1. Выберите вкладку **Долговечность | Контрольные зоны**, см. рис. 2.27.

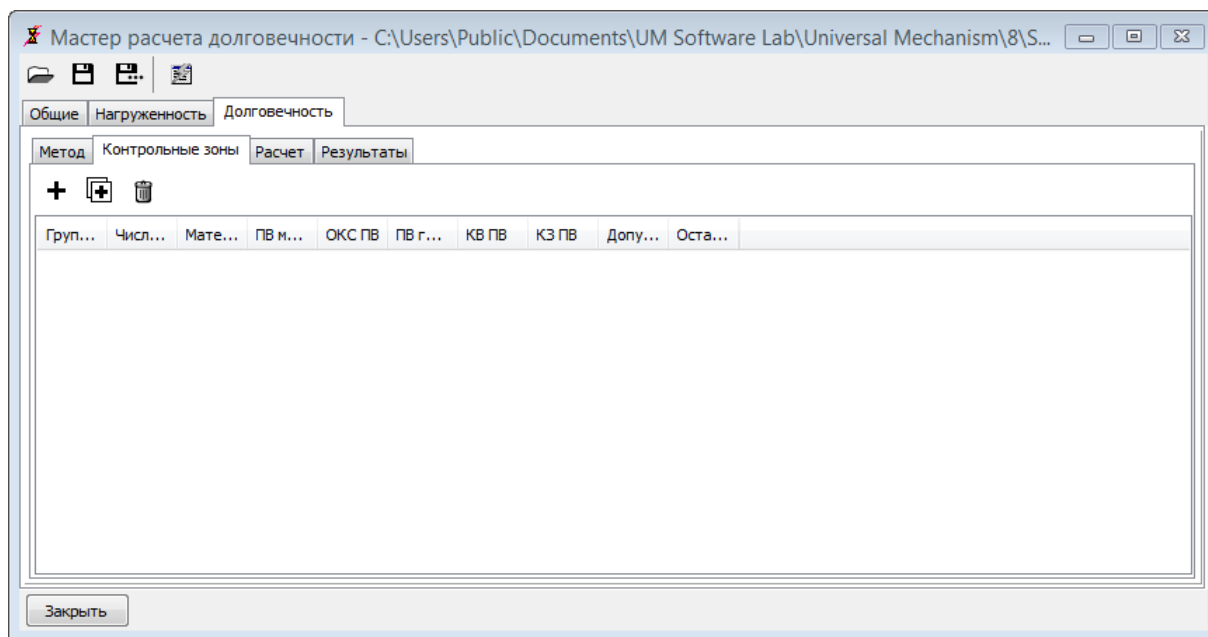


Рис. 2.27. Список контрольных зон

Описание контрольной зоны **Верхний лист**

2. Добавьте новую контрольную зону. Появится окно редактирования свойств контрольной зоны, см. рис. 2.28.

3. Изменим название зоны, для этого в поле **Название** введите **Верхний лист**.

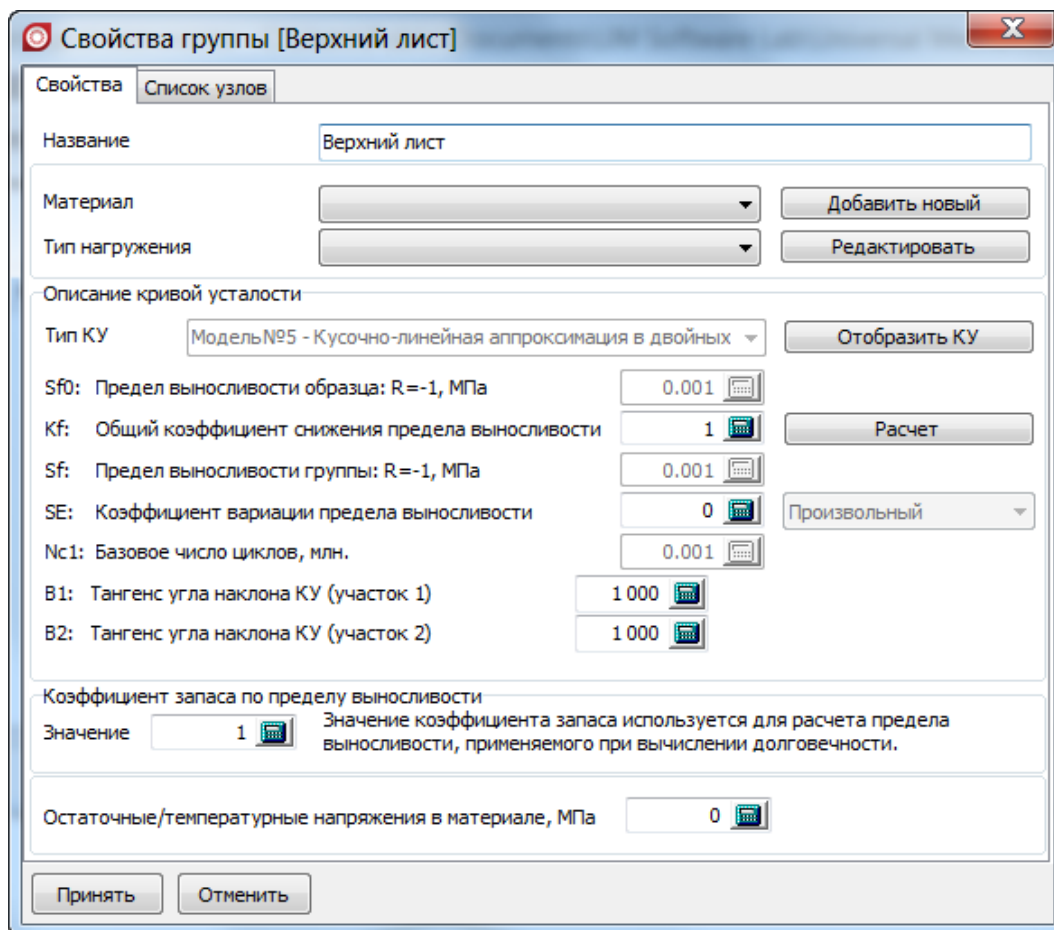


Рис. 2.28. Окно описания свойств контрольной зоны

Далее мы добавим в список контрольной зоны узлы, находящиеся в выделенных ранее опасных зонах.

4. Перейдите на вкладку **Список узлов**.

5. Добавьте список узлов вручную⁸ или загрузите его из текстового файла *Список узлов верхней пластины.nls* при помощи команды контекстного меню **Загрузить список узлов из файла**, см. рис. 2.29. Список содержит не только узел **3773**, но и прилегающие к нему.

⁸ Для удобства ввода всех узлов из некоторого диапазона номеров используйте синтаксис

НомерНачальный-НомерКонечный, так укажите 3768-3779, чтобы добавить все узлы из этого интервала.

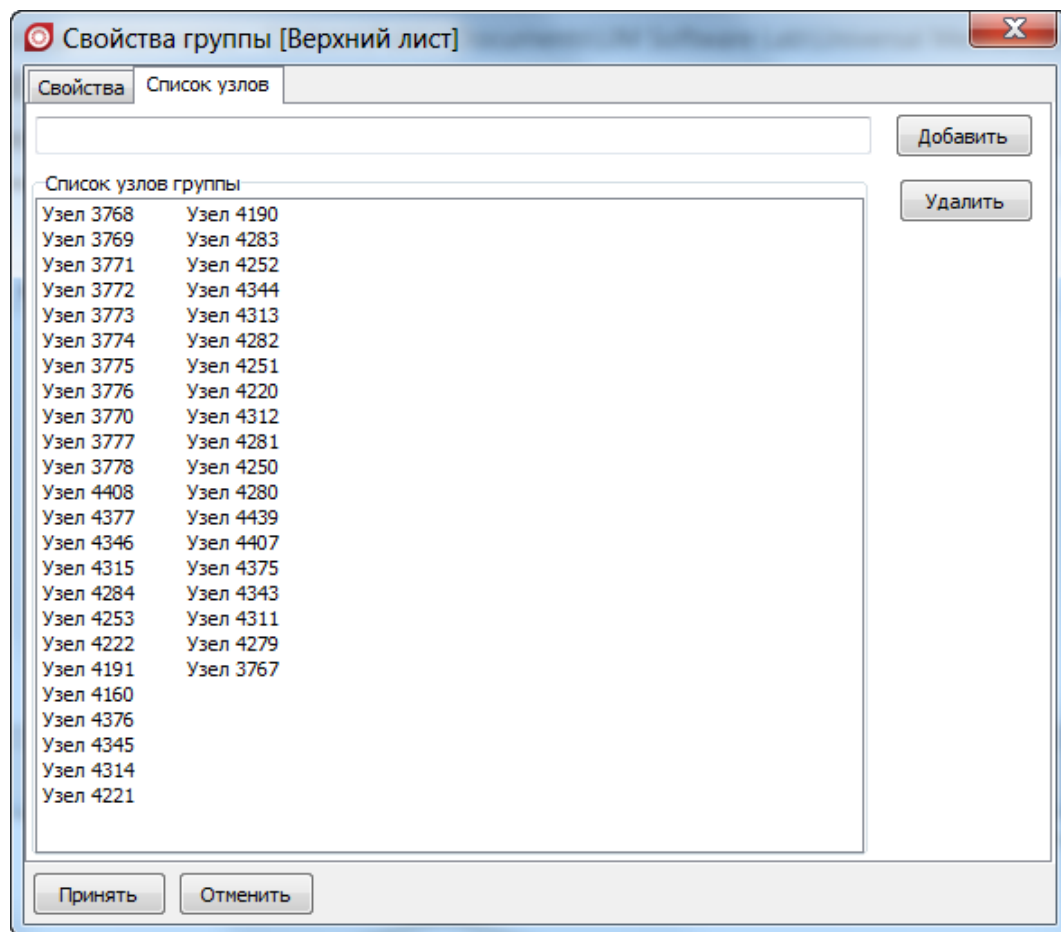


Рис. 2.29. Изменение списка узлов

б. Теперь опишем свойства материала рамы. Вернитесь на вкладку **Свойства** и нажмите кнопку **Материал | Добавить новый** чтобы описать материал со следующими свойствами:

Прочностные свойства		
S _y :	Предел текучести при растяжении, МПа	305
S _u :	Предел прочности, МПа	440
Свойства сопротивления усталости стандартного образца		
N ₀ :	Базовое число циклов	107 = 1E7
b1:	Показатель наклона кривой усталости	5.9988
	Предел выносливости образца при симметричном нагружении (амплитуда напряжений), МПа	180

Появится диалоговое окно редактирования свойств материала.

Описание свойств материала

1. В этом окне перейдите на вкладку **Общие**. Введите параметры так, как показано на рис. 2.30.

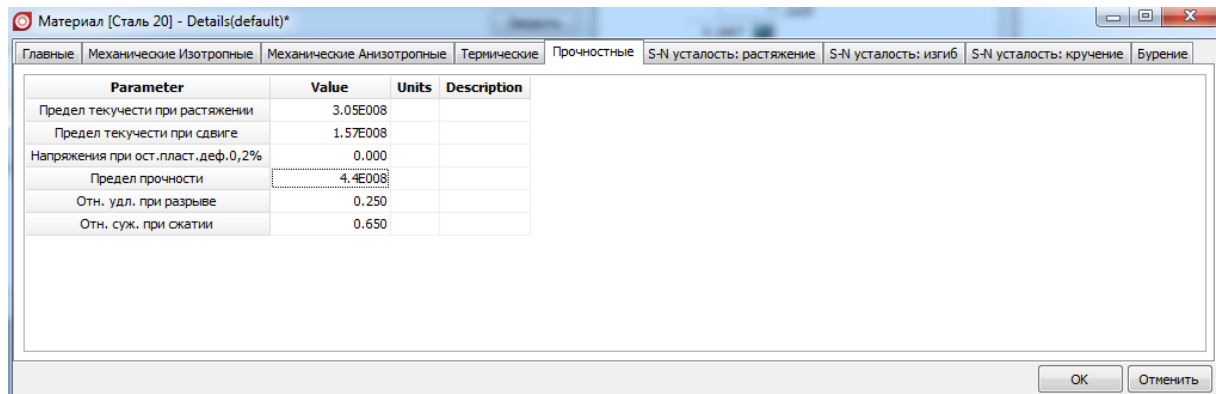


Рис. 2.30. Окно описания свойств материала

2. Выберите вкладку **S-N анализ | Изгиб** чтобы определить свойства материала.
3. Выберите тип кривой усталости (поле **Тип КУ**) установите в **Модель №5**, далее введите параметры материала так, как показано на рис. 2.31.
4. После ввода значений всем полям нажмите кнопку **Назначить для всех** и затем закройте окно кнопкой **ОК**.

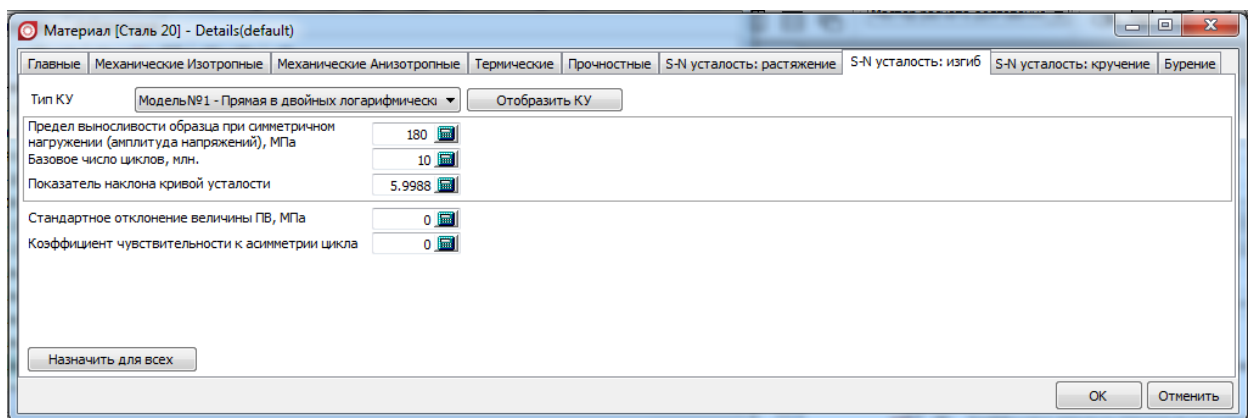


Рис. 2.31. Окно описания свойств материала

Описание контрольной зоны Верхний лист (продолжение)

1. В окне **Свойства группы [Верхний лист]** в поле **Тип нагружения** выберите **Изгиб**, см. рис. 2.32.

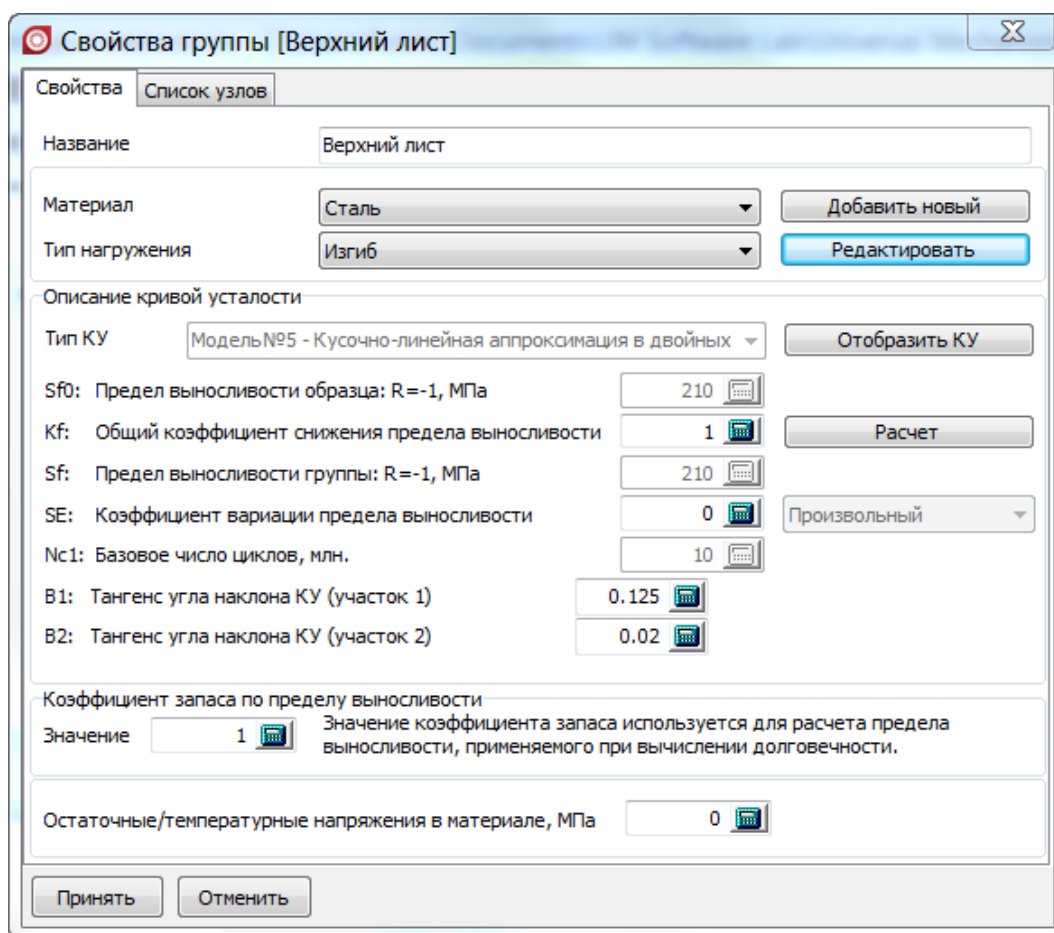


Рис. 2.32. Свойства группы Верхний лист

2. Нажмите кнопку **Расчет** для использования инструмента расчета общего коэффициента снижения предела выносливости, см. рис. 2.33. Расчет усталостной долговечности для зоны **Верхний лист** ведется в локальных напряжениях, поэтому **Коэффициент концентрации напряжений** принимается равным единице. Нажмите **Принять** по окончании ввода.

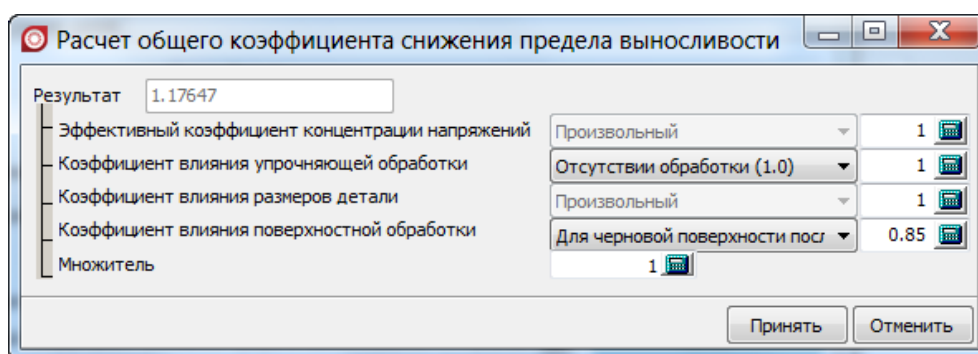


Рис. 2.33. Расчет коэффициента снижения предела выносливости

13. В поле **Коэффициент вариации** введите **0.1**, см. рис. 2.32.
14. Нажмите **Принять** в окне свойств зоны **Верхний лист** для сохранения введенных изменений, рис. 2.32.

Описание контрольной зоны Соединение

Добавьте еще одну контрольную зону **Соединение** для оценки усталостной прочности в зоне соединения верхнего листа и продольных балок.

Введите свойства зоны как это показано на рис. 2.34, 2.35.

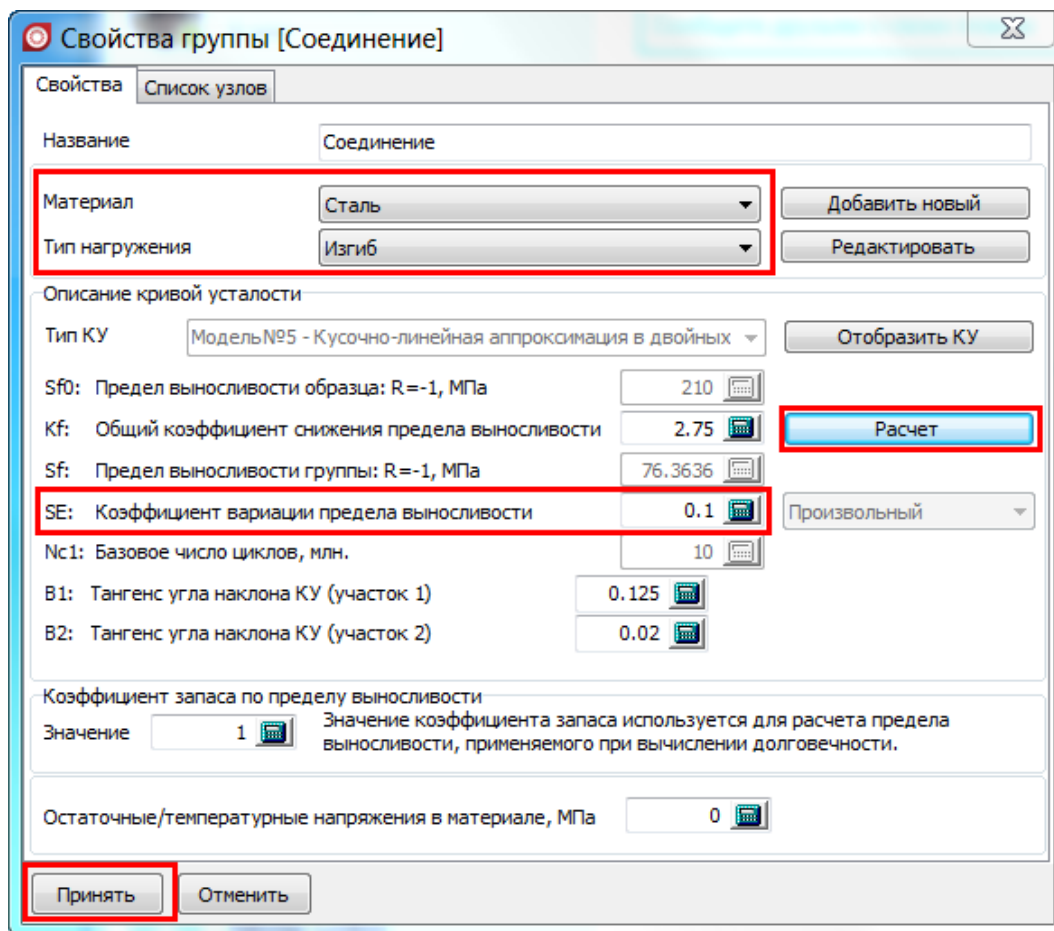


Рис. 2.34. Свойства контрольной зоны Соединение

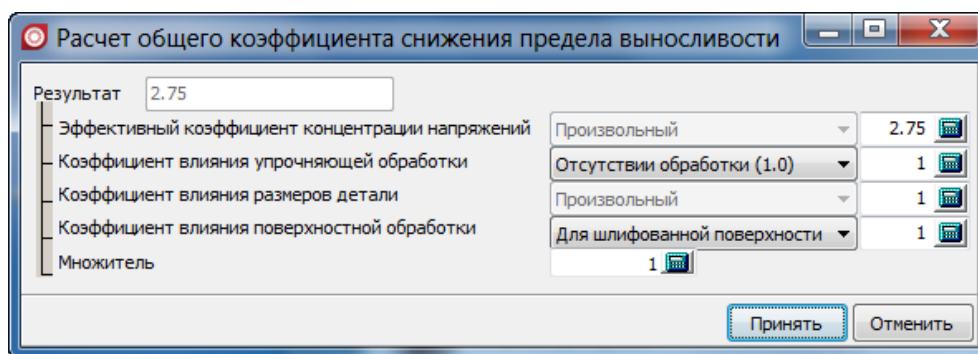


Рис. 2.35. Коэффициент снижения предела выносливости

Список узлов зоны загрузите из файла *Список узлов соединения.nls* как на Рис. 2.5 Рис. 2.36

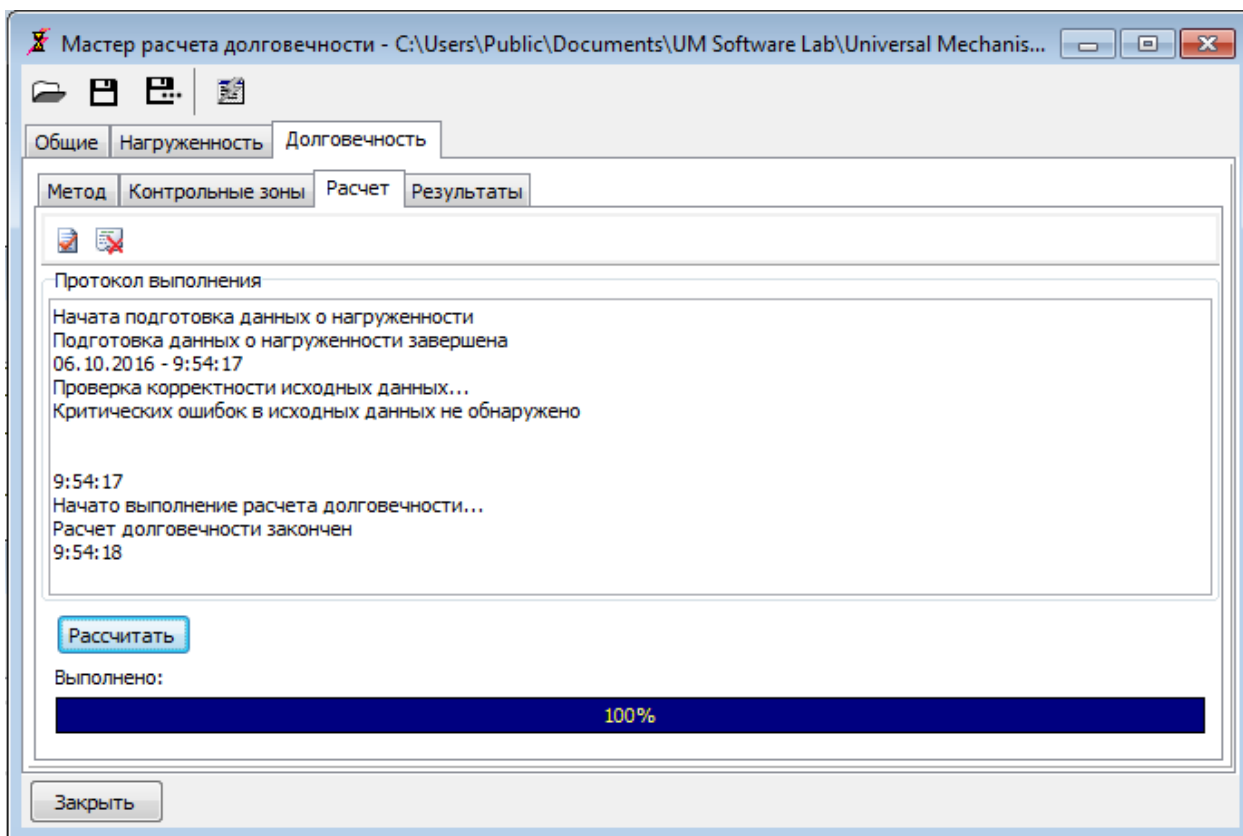


Рис. 2.37. Расчет параметров долговечности

Теперь, когда проведен расчет долговечности, перейдем к анализу полученных результатов.

2.5.6. Анализ результатов расчета долговечности

1. Перейдите на вкладку **Долговечность | Результаты | Список датчиков**.
2. В списке **Режим нагружения** выберите **Смешанный блок нагружения**.
3. Отсортируйте данные по столбцу **Срок службы (лет)**, см. рис. 2.38. Максимальные повреждения в единицу времени наблюдаются в узле **542**. Срок службы детали до разрушения в зоне соединения верхнего листа с боковыми балками составляет **6.635** года с заданной вероятностью безотказной работы 0,95.

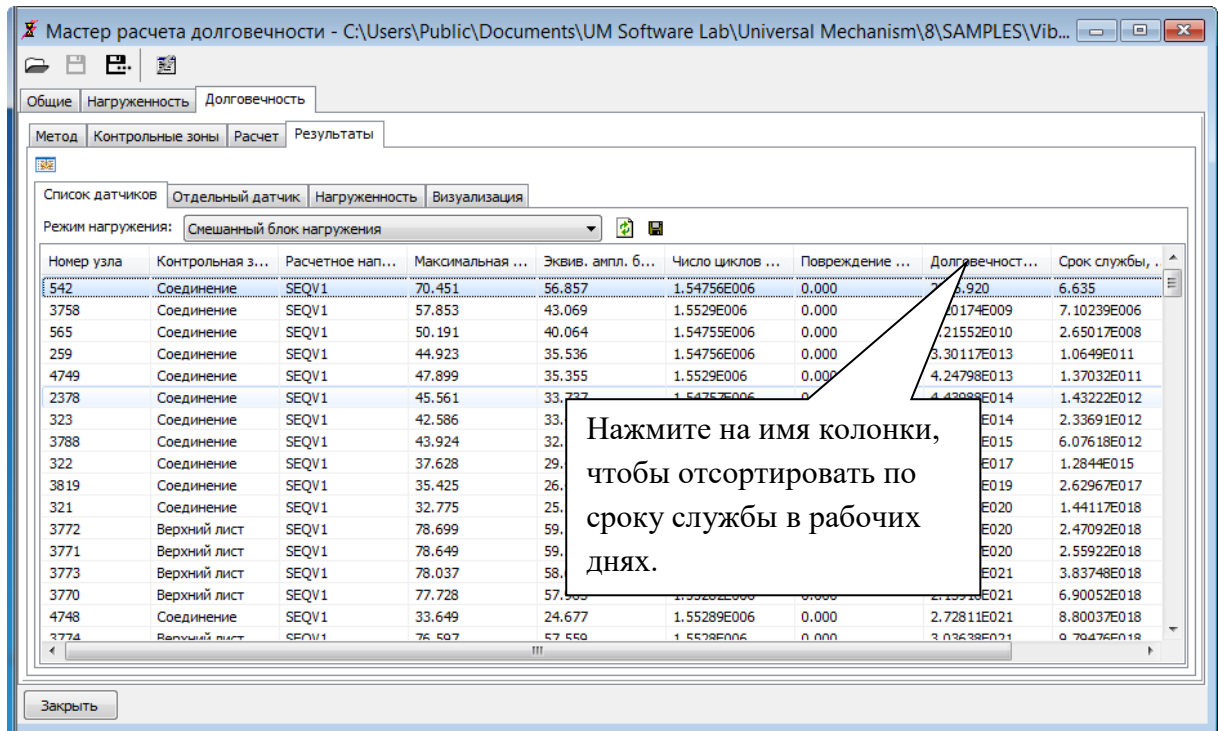


Рис. 2.38. Результаты расчета долговечности

Давайте проанализируем наиболее опасные с точки зрения долговечности режимы работы.

4. Выберите вкладку Долговечность | Результаты | Отдельный датчик.
5. В поле Номер узла введите 542 и нажмите Enter, см. рис. 2.39.

На основании анализа данных, представленных на рис. 2.39, наибольший вклад в накопление усталостных повреждений вносит рабочий режим.

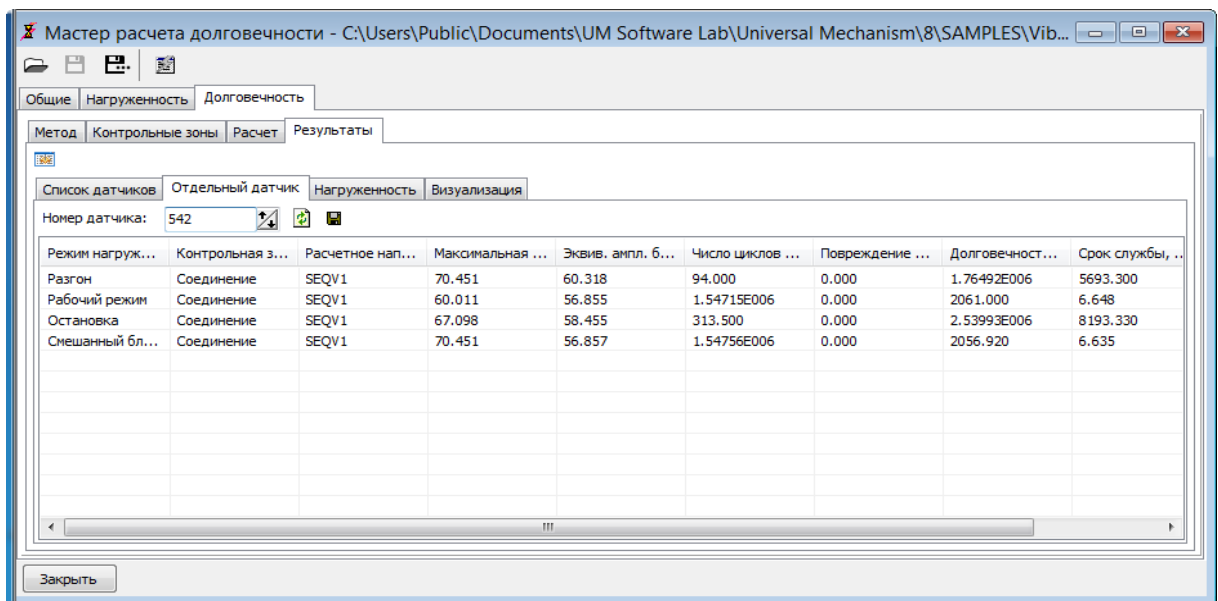


Рис. 2.39. Отдельный узел

6. Для оценки приведенных амплитуд перейдите на вкладку Долговечность | Результаты | Нагруженность.

7. В поле **Номер узла** введите **542** и нажмите **Enter**, см. рис. 2.40.

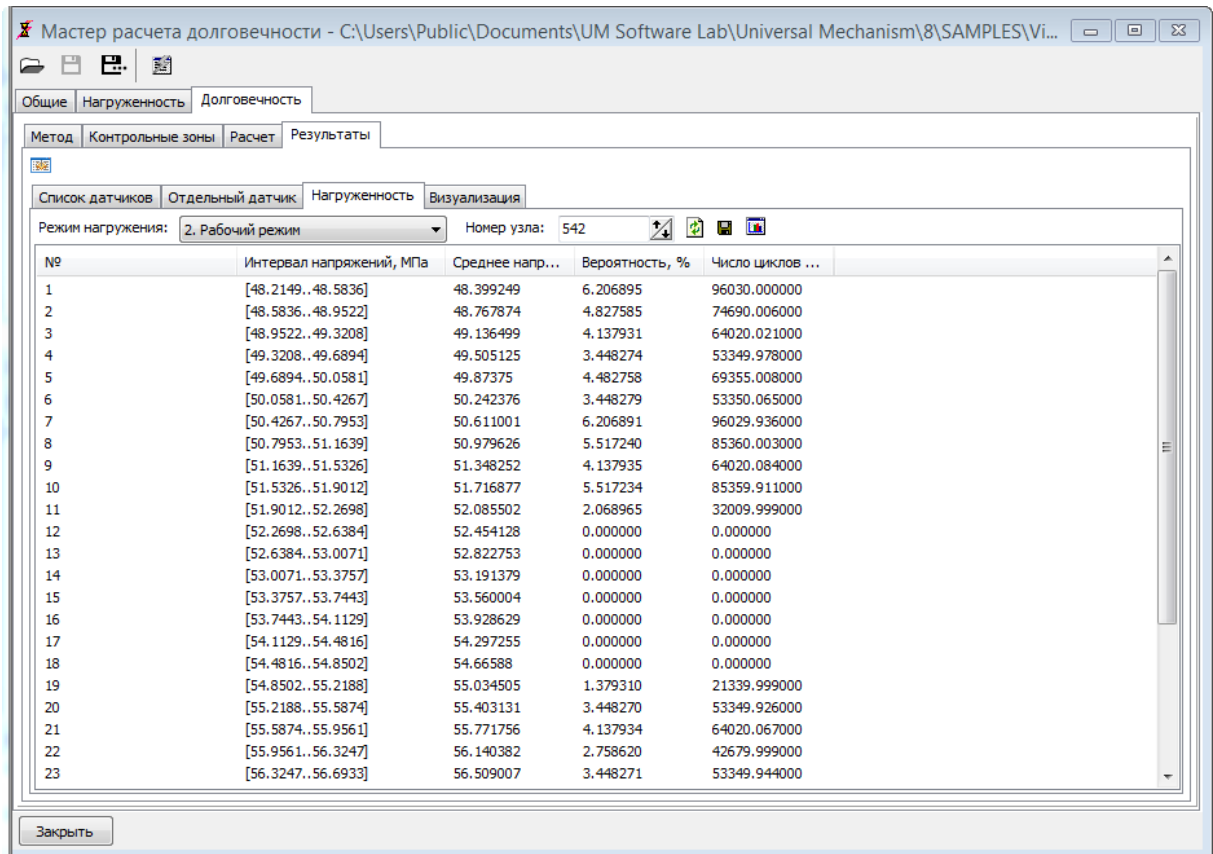


Рис. 2.40. Результаты расчета нагруженности


8. Для построения распределения амплитуд щелкните на кнопке . Появится новое графическое окно с визуализацией этого распределения, см. рис. 2.41.



Рис. 2.41. Распределение приведенных амплитуд

2.5.7. Сохранение проекта в файл

1. Щелкните кнопку  для сохранения проекта в файл.