



# Анализ динамической нагруженности и усталостной долговечности

---

Начинаем работать

2010

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**<sup>1</sup>, 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**<sup>2</sup>.

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 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.

Лаборатория «Универсальный механизм». Все права защищены ©, 2010.

Все товарные знаки принадлежат их законным владельцам.

---

<sup>1</sup> [http://www.umlabor.ru/download/60/rus/g\\_s\\_um.pdf](http://www.umlabor.ru/download/60/rus/g_s_um.pdf)

<sup>2</sup> [http://www.umlabor.ru/download/60/rus/g\\_s\\_um\\_fem.pdf](http://www.umlabor.ru/download/60/rus/g_s_um_fem.pdf)

## Оглавление

<b>НАЧИНАЕМ РАБОТАТЬ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ»: АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАГРУЖЕННОСТИ И УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ.....</b>	<b>2</b>
<b>1. ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>4</b>
<b>2. ВИБРОСТЕНД.....</b>	<b>7</b>
2.1. Описание модели .....	8
2.2. Последовательность работы.....	8
2.3. Анализ динамики .....	9
2.4. Анализ нагруженности .....	11
2.4.1. Описание режимов нагружения .....	12
2.4.2. Описание групп датчиков.....	18
2.4.3. Настройки расчета нагруженности .....	20
2.4.4. Сохранение проекта в файл.....	20
2.4.5. Расчет нагруженности .....	21
2.4.6. Анализ результатов расчета нагруженности .....	22
2.4.7. Сохранение проекта в файл.....	28
2.5. Анализ долговечности .....	29
2.5.1. Настройка параметров расчета долговечности .....	29
2.5.2. Выбор контрольных зон .....	32
2.5.3. Описание контрольных зон и свойств сопротивления усталости .....	32
2.5.4. Сохранение проекта в файл.....	39
2.5.5. Расчет долговечности .....	39
2.5.6. Анализ результатов расчета долговечности .....	40
2.5.7. Сохранение проекта в файл.....	42

## 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 конструктивными, 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.

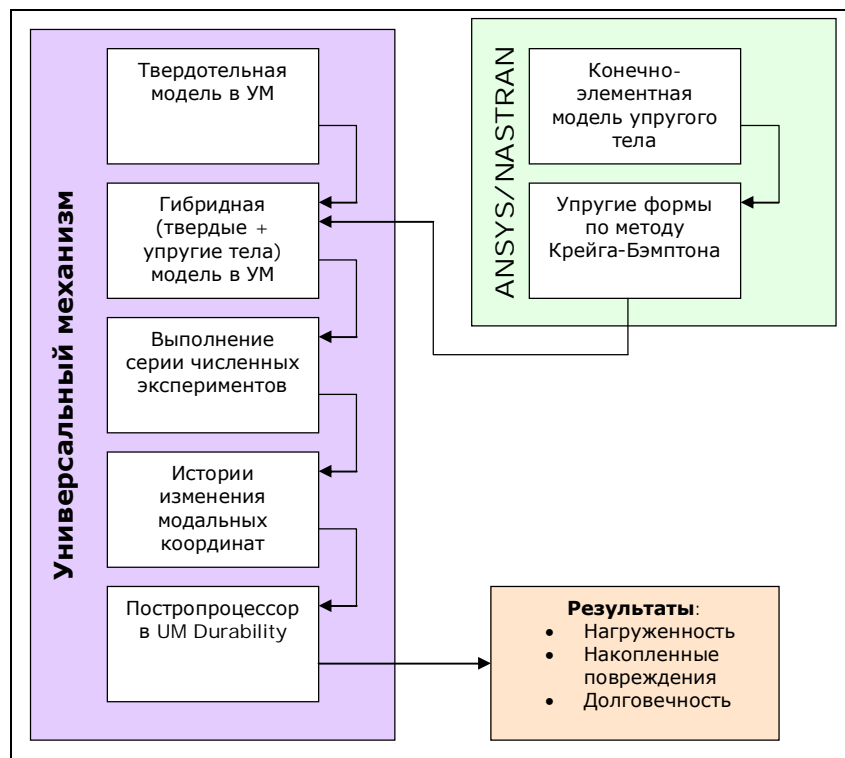


Рис. 1.1. Методика анализа эксплуатационной нагруженности и усталостной долговечности, реализованная в ПК УМ.

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 модальных 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 многоциклового 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**<sup>1</sup> руководства пользователя УМ. В настоящем примере рассматриваются только вопросы оценки долговечности. Скачайте и распакуйте архив с готовой для дальнейшего анализа моделью вибростенда по адресу <http://www.umlabor.ru/download/60/rus/vibrostand.zip> (25 Мб).

---

<sup>1</sup> По сравнению с моделью, описанной в п. 3 **gs\_UM\_FEM.pdf**, настоящая модель имеет улучшенную конечно-элементную сетку для более точной оценки долговечности

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

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

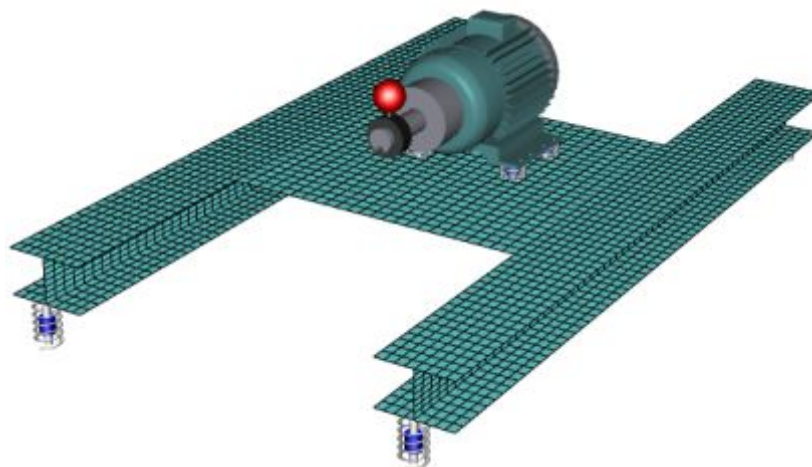


Рис. 2.1. Модель вибростенда

## 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.

1. Через кнопку **Пуск** или ярлык на рабочем столе запустите программу **UM Simulation** и загрузите модель **Vibrostand\_Durability**, 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 таблице 1.

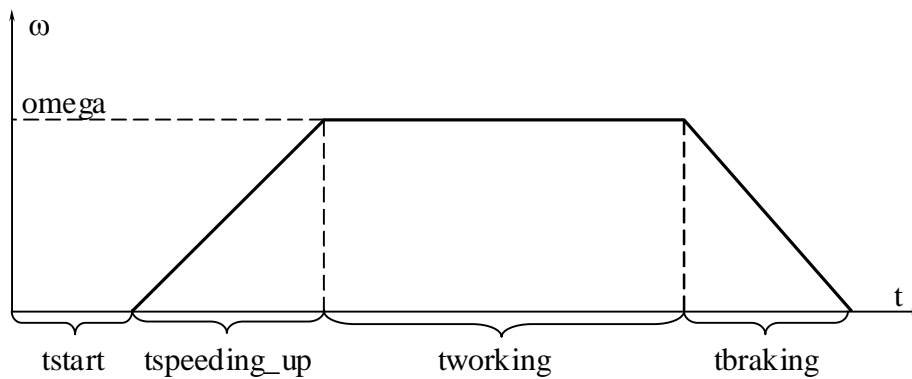


Рис. 2.2. Угловая скорость ротора

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	1
tspeeding_up	Время разгона, с	3
tworking	Время работы с постоянной угловой скоростью, с	3
tbraking	Время торможения до остановки, с	3

Сейчас мы выполним один численный эксперимент. Рассчитанные в процессе моделирования модальные координаты, необходимые для дальнейшего расчета напряжений и прогноза долговечности, будут сохранены в файл.

2. Из меню **Анализ** выберите **Моделирование**. Появится окно **Инспектора моделирования объекта**.
3. Выберите закладку **Начальные условия** и загрузите файл начальных условий **vibrostand\_durability.xv file**.
4. Выберите закладку **Идентификаторы** и загрузите значения параметров, соответствующие табл. 1, из файла **vibrostand\_durability.par**. Нажмите кнопку **Принять** в открывшемся после загрузки файла окне **Список прочитанных идентификаторов**.
5. Выберите закладку **Переменные объекта** и для подсистемы **Основная модель...** загрузите файл переменных **vibrostand\_durability.var**<sup>1</sup>. При загрузке файла следует выбрать в выпадающем списке **Основной объект**.

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

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

Во время численного моделирования в каталоге модели будет создана пара файлов *Vibrostand\_durability.imc* и *Vibrostand\_durability.tmc*.

7. 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.

---

<sup>1</sup> Для сохранения файлов модальных координат необходимо, чтобы был включен флажок **Автоматическое сохранение переменных** на закладке **Переменные объекта**, и чтобы список переменных был непустым. В этом случае вместе с файлом рассчитанных переменных записываются одноименные файлы с модальными координатами.

## 2.4. Анализ нагруженности

1. Выберите пункт главного меню **Инструменты/Долговечность**. Появится окно **Мастера расчета эксплуатационной нагруженности и усталостной долговечности**. При открытии окна автоматически создастся пустой проект расчета.

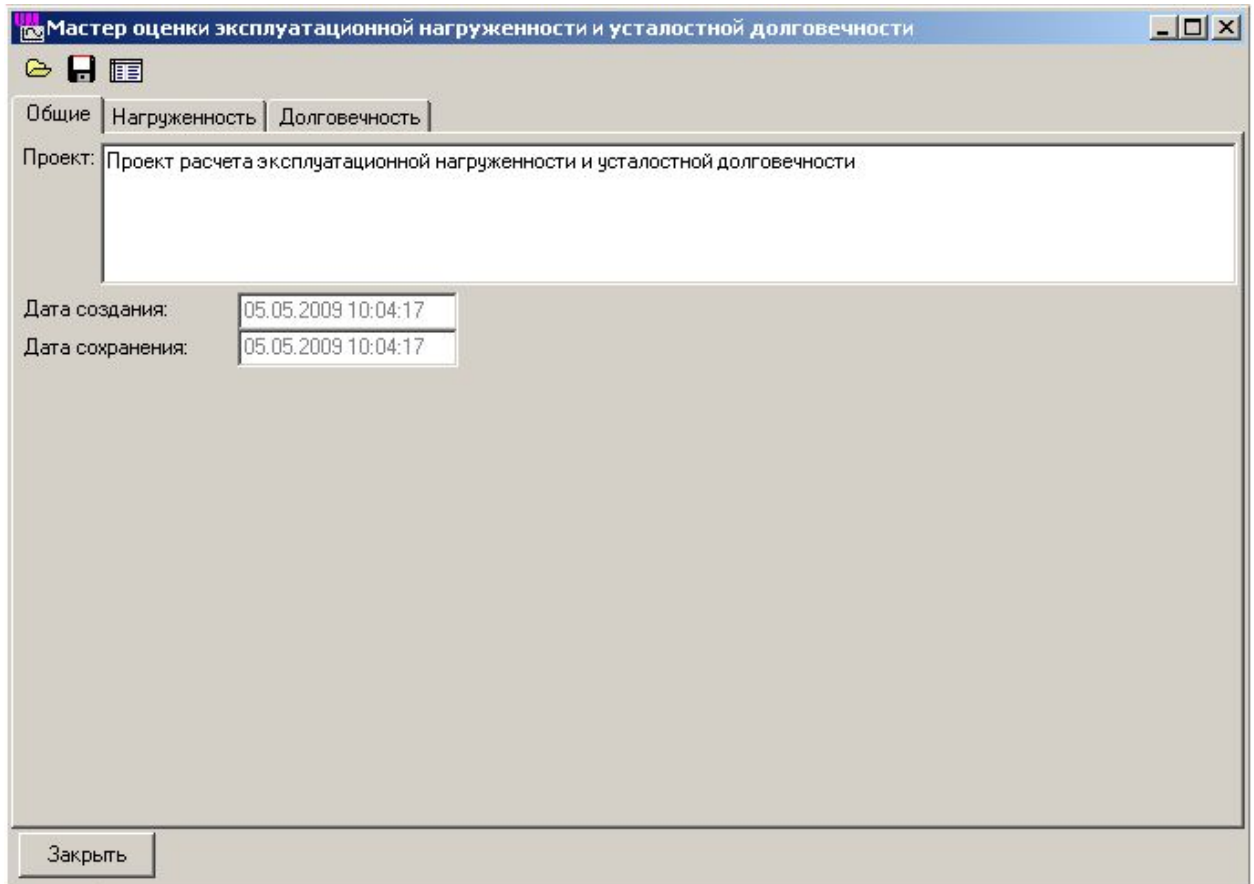



Рис. 2.3. Окно Мастера оценки нагруженности и долговечности

### 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.

1. В окне **Мастера расчета нагруженности и долговечности** выберите закладку **Нагруженность / Исходные данные / Режимы нагружения**.
2. С помощью кнопки  три раза добавьте к списку режимов нагружения файл *vibrostand\_durability.tmc*, см. рис. 2.4. Первая загрузка файла займет больше времени, чем последующие, вследствие затрат на загрузку данных упругой подсистемы, необходимых для последующего анализа.

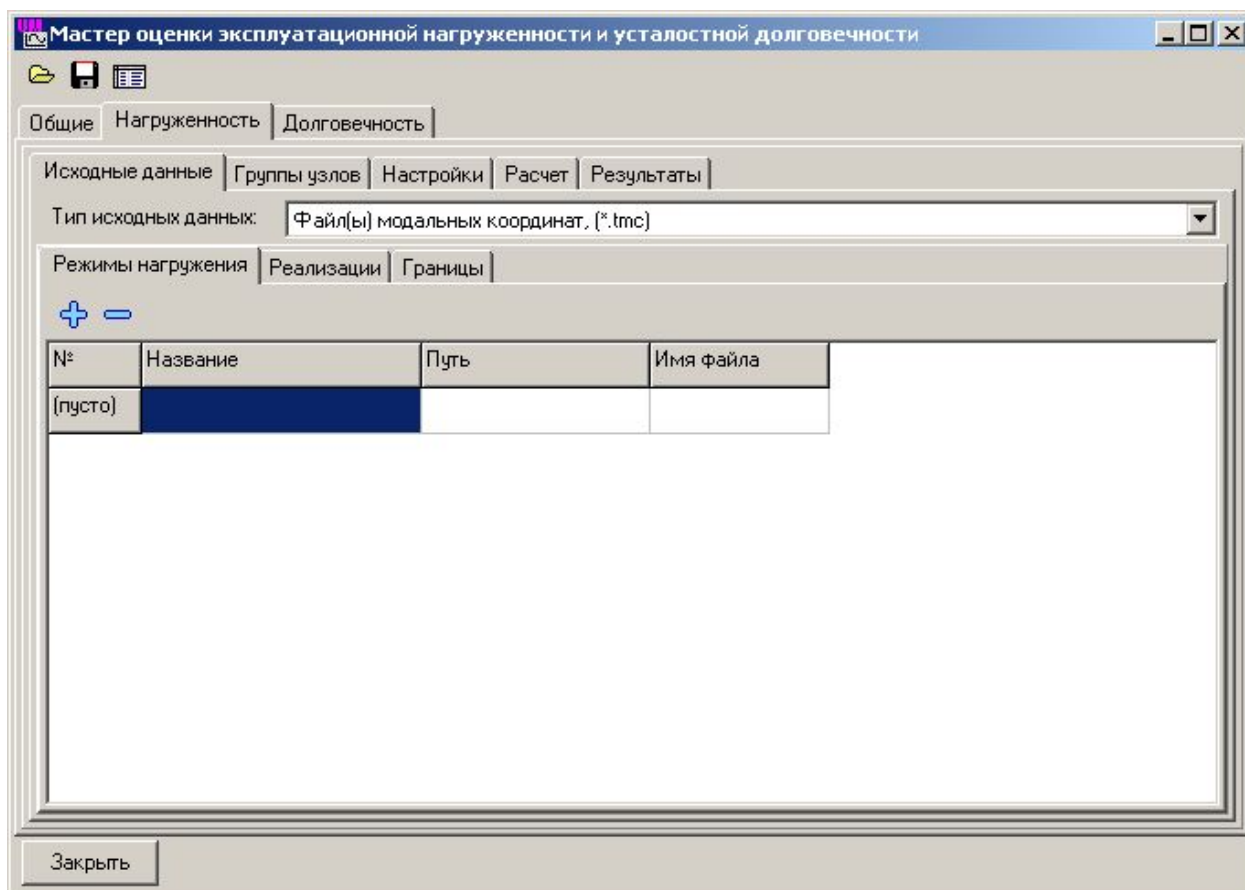


Рис. 2.4. Окно описания режимов нагружения

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.

1. Отредактируйте вручную названия режимов нагружения так, как показано на рис. 2.5 или загрузите названия из заранее подготовленного текстового файла *Названия режимов нагружения.lss* с помощью контекстного меню, см. рис. 2.5.

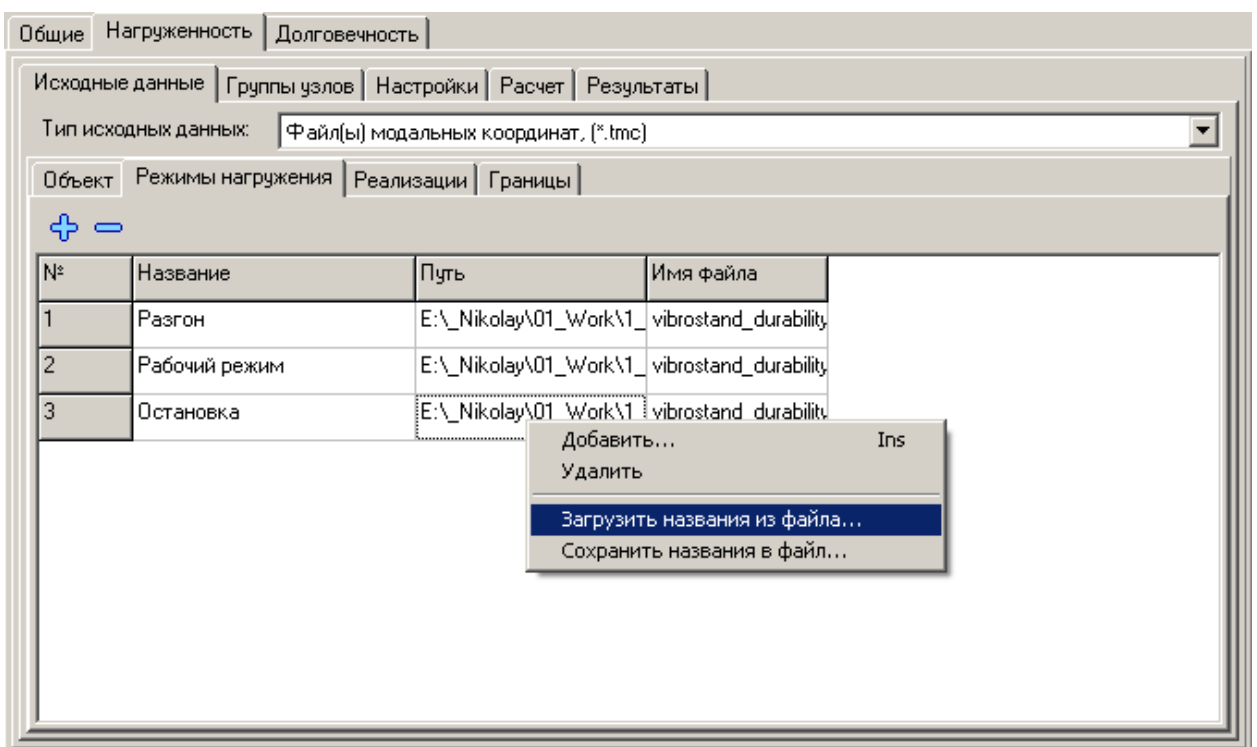


Рис. 2.5. Режимы нагружения: изменение названий режимов

## Визуализация упругой подсистемы

1. Как только вы добавили первый режим нагружения на закладке **Нагруженность/Исходные данные** появляется закладка **Объект**. Перейдите на эту закладку и еще раз посмотрите на исследуемый объект, см. рис. 2.6.

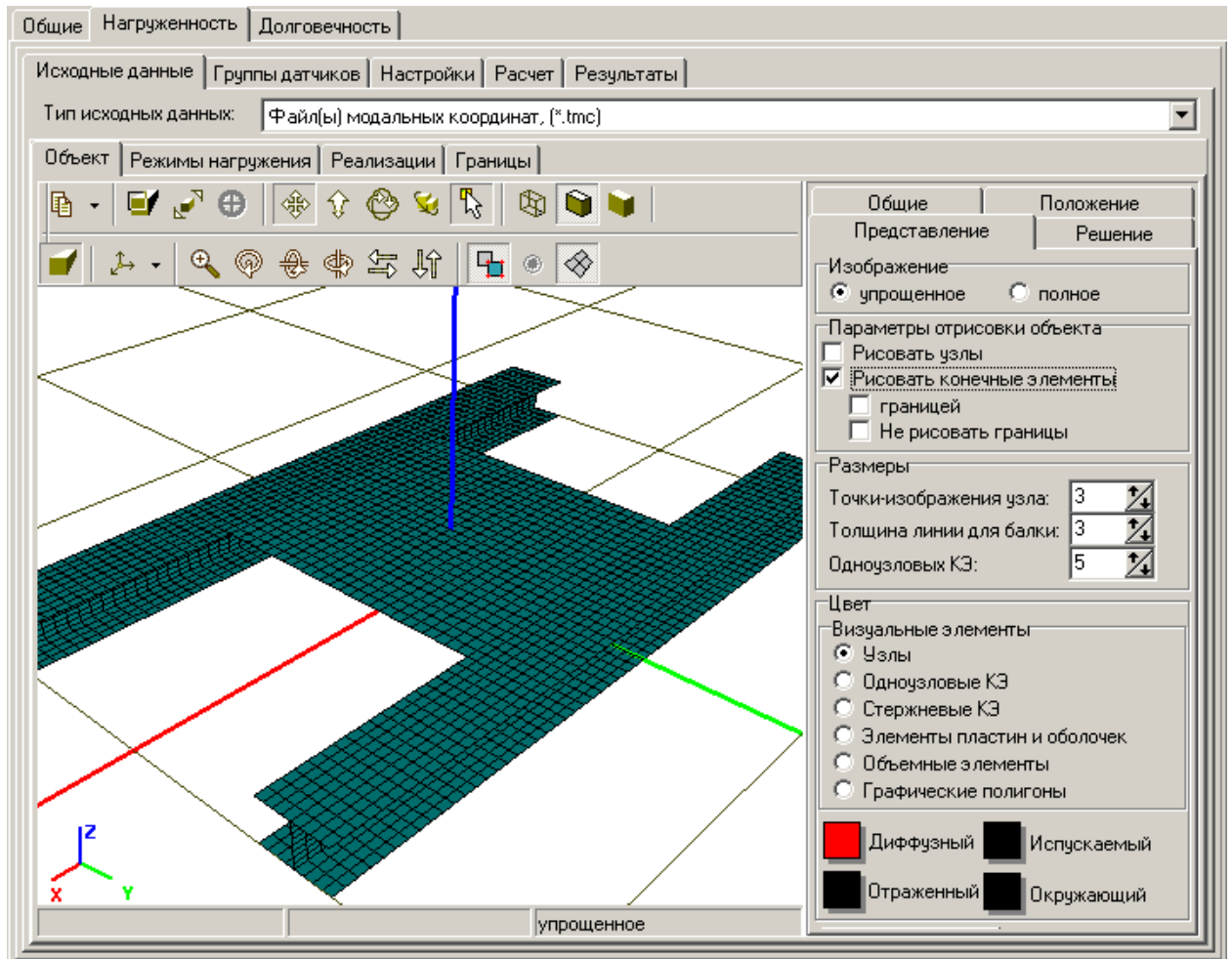



Рис. 2.6. Упругая подсистема

## Построение графиков реализаций напряжений в узлах

Давайте проанализируем график изменения напряжения во времени для двух датчиков, расположенных в узлах с номерами **592** и **3117** конечноэлементной модели рамы вибростенда<sup>1</sup>.

1. Перейдите на закладку **Нагруженность / Исходные данные / Реализации**.
2. Выберите **Эквивалентное фон Мизеса по компонентам тензора напряжений** в левой части окна.
3. В поле **Номер узла** введите **592** и нажмите кнопку **Рассчитать**.
4. Поле со значком  станет доступно. Далее перетащите это поле в графическое окно.
5. Повторите действия 3-4 для узла **3117**.

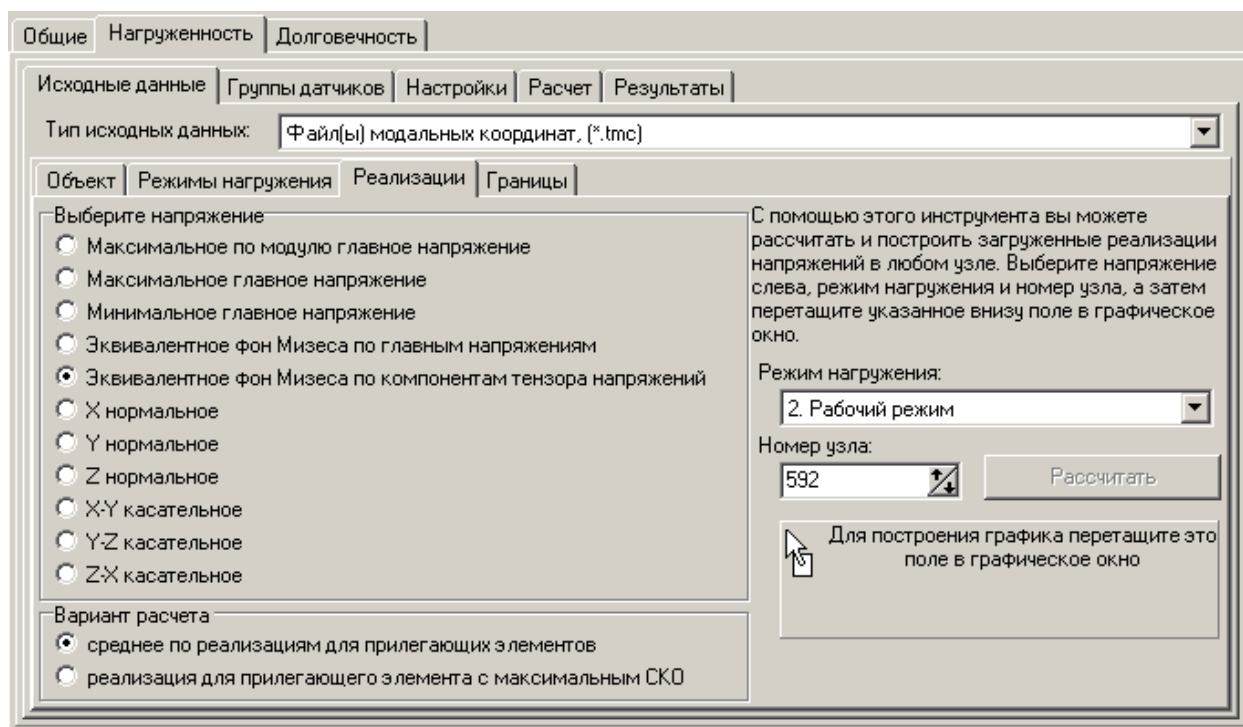


Рис. 2.7. Построение реализаций напряжений в узле **592** конечноэлементной модели рамы

В графическом окне будут построены графики переменных – напряжений в выбранных узлах, см. рис. 2.8. На рисунке четко видны этапы разгона, рабочего режима и остановки.

<sup>1</sup> Позже мы увидим, что узлы 592 и 3117 располагаются в наиболее нагруженных зонах рамы платформы, но пока мы этого еще не знаем и идем дальше по уроку...

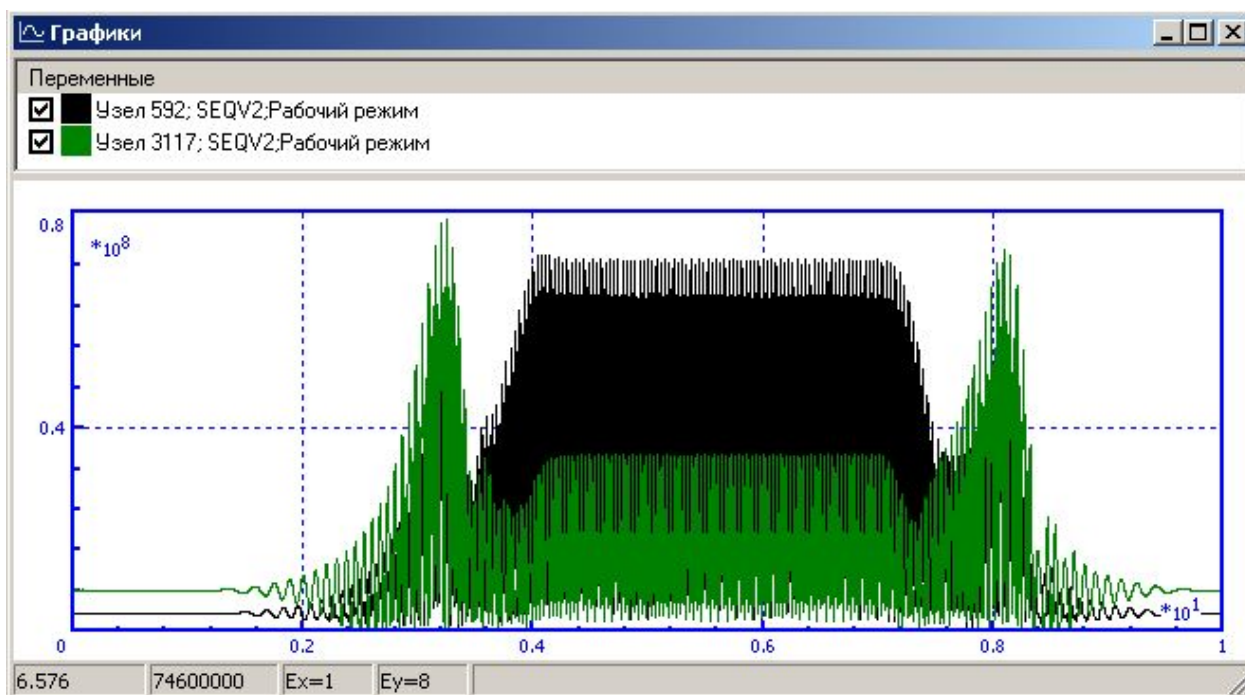


Рис. 2.8. Реализация напряжений в узлах 592 и 3117

## Настройка интервалов времени для режимов нагружения

В соответствии с графиком реализации напряжений, представленном на рис. 2.8 определим интервалы времени для каждого из режимов нагружения.

1. Перейдите на закладку **Нагруженность / Исходные данные / Границы**.
2. Введите вручную значения левой и правой границ интервалов, как показано на рис. 2.9 или загрузите значения из текстового файла *Интервалы времени.int*.

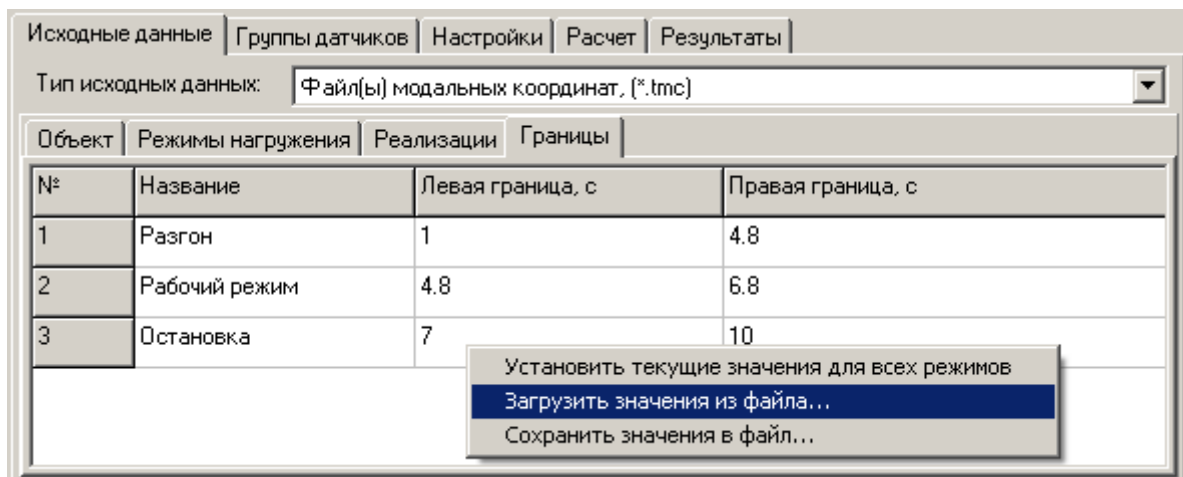


Рис. 2.9. Границы режимов нагружения

### 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. закладку **Нагруженность / Группы**.

1. Выберите закладку **Нагруженность / Группы**, см. рис. 2.10.

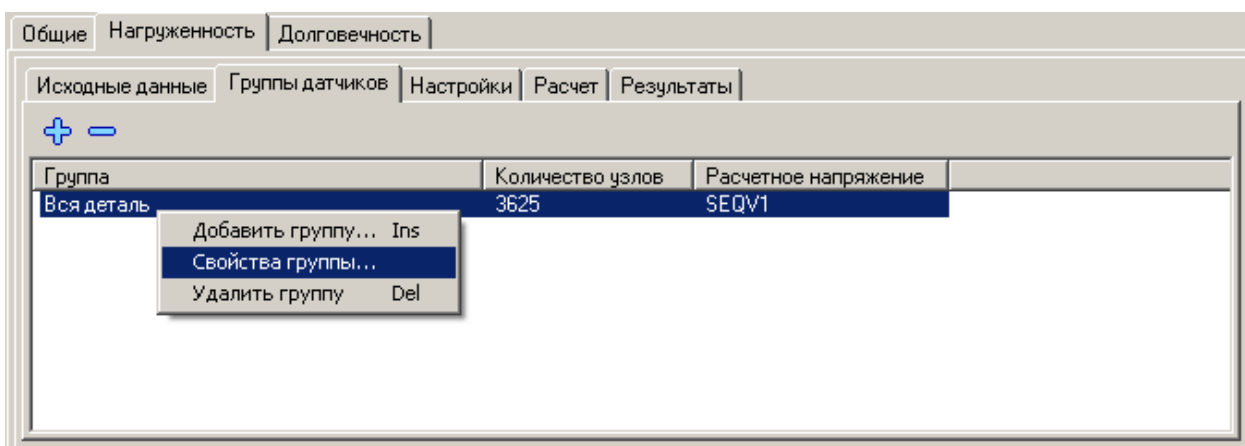


Рис. 2.10. Задание групп датчиков

2. Дважды щелкните правой кнопкой мыши на имени группы **Вся деталь** либо выберите **Свойства группы...** из контекстного меню группы, см. рис. 2.10.
3. В открывшемся окне выберите закладку **Список узлов**, чтобы отобразить список узлов КЭ схемы рамы, входящих в группу, см. рис. 2.11.

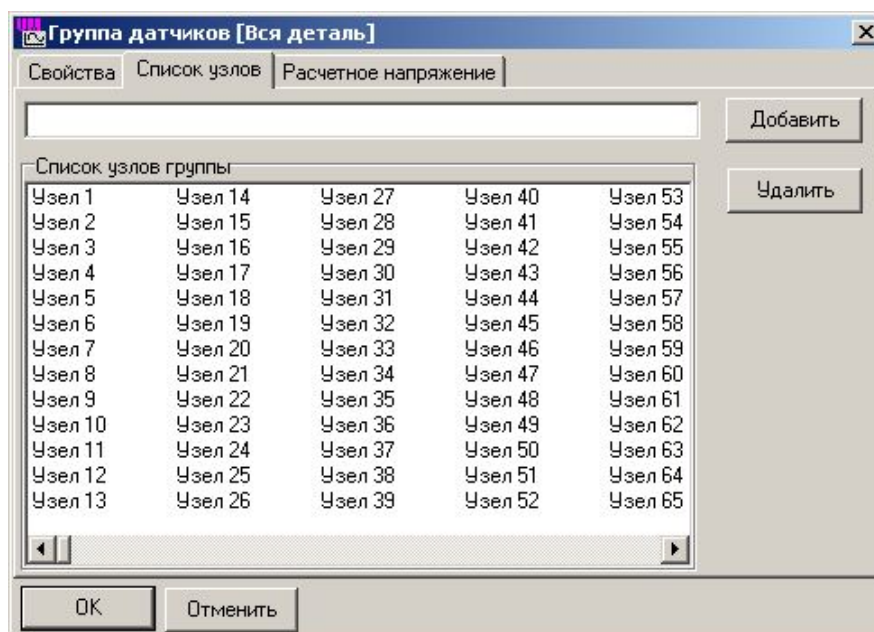


Рис. 2.11. Список датчиков – узлов КЭ модели группы

## Выбор расчетных напряжений для групп датчиков

4. Выберите закладку **Расчетное напряжение**, см. рис. 2.12.
5. Поле **Выберите расчетные напряжения** установите в **Эквивалентное фон Мизеса по компонентам тензора напряжений**<sup>1</sup>.
6. В поле **Вариант расчета** выберите **Среднее по элементам**.<sup>2</sup>

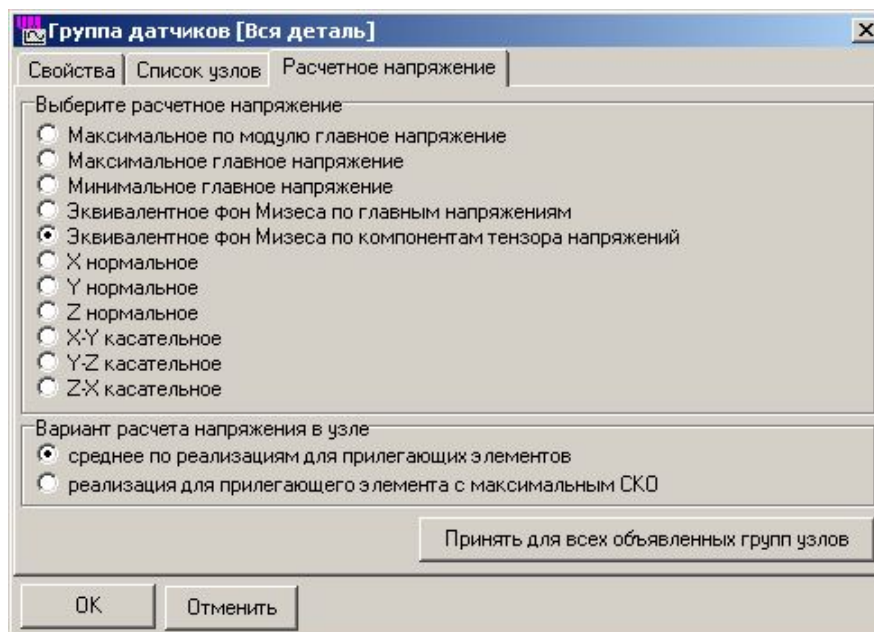


Рис. 2.12. Выбор расчетных напряжений для группы **Вся деталь**

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

<sup>1</sup> Эквивалентный 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.

<sup>2</sup> 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.

### 2.4.3. Настройки расчета нагруженности

1. Перейдите на закладку **Нагруженность / Настройки** и выполните настройки расчета нагруженности так, как показано на, см. рис. 2.13.

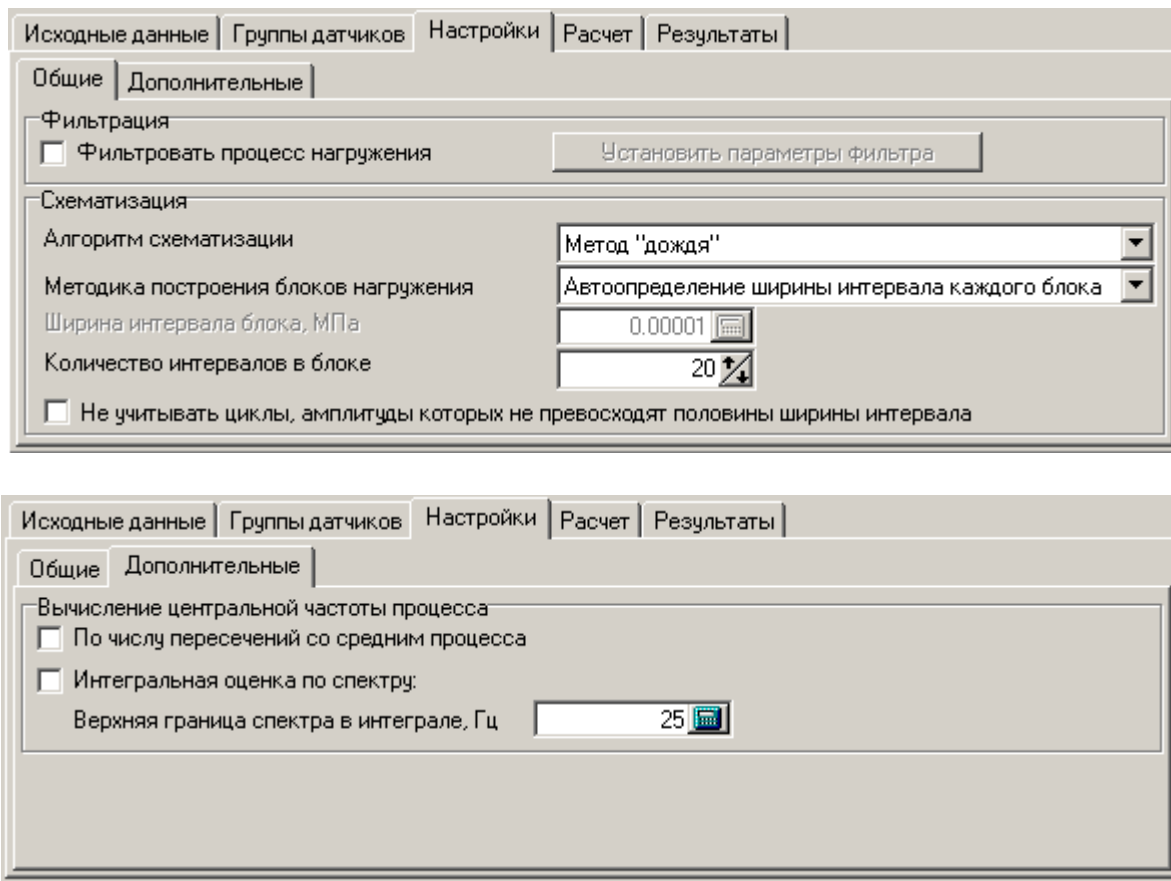



Рис. 2.13. Параметры расчета нагруженности


### 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 закладку **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. 2.14. 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.

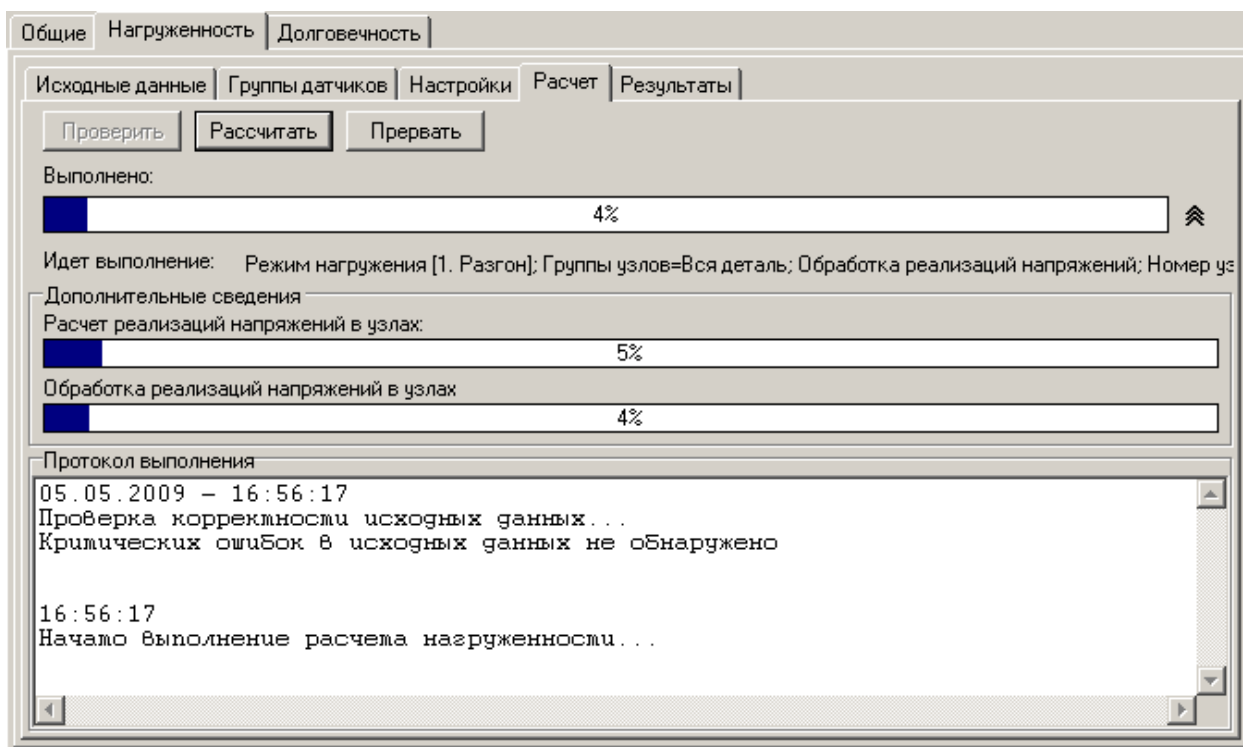


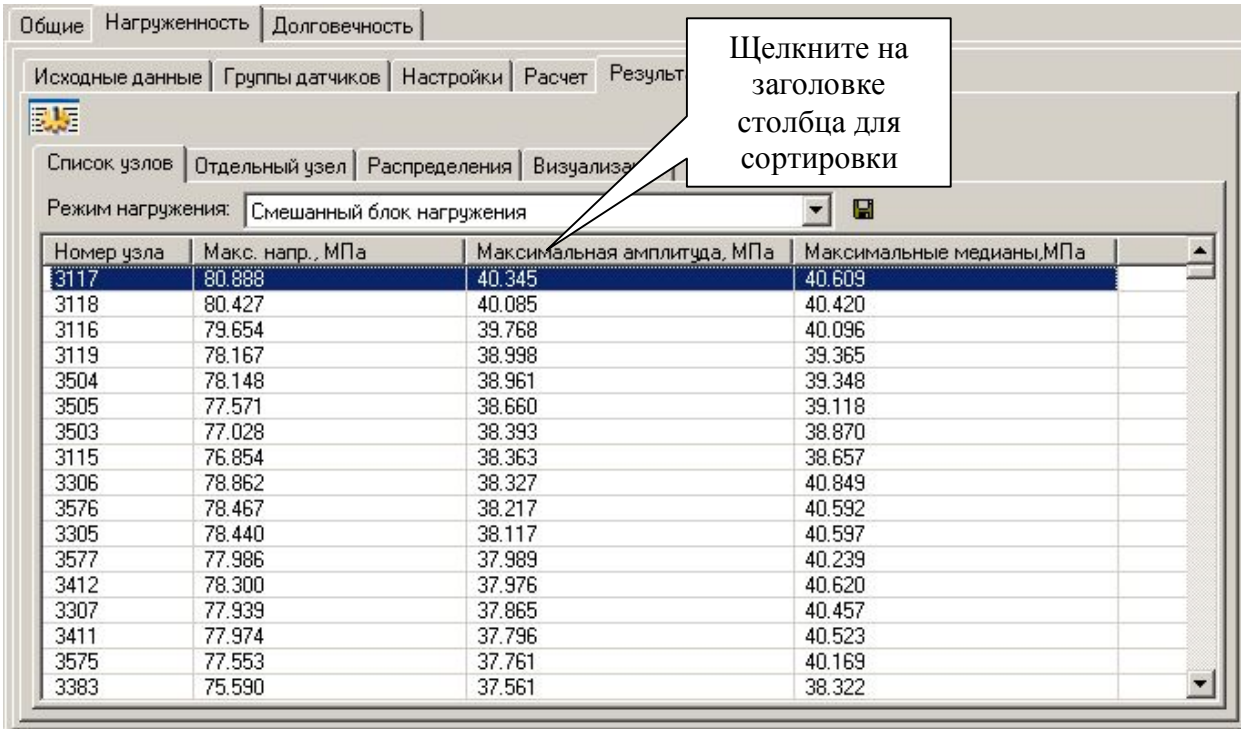
Рис. 2.14. Выполнение расчета нагруженности

## 2.4.6. Анализ результатов расчета нагруженности

1. Выберите закладку **Нагруженность / Результаты / Список узлов**.
2. В выпадающем списке **Режим нагружения** выберите **Смешанный блок нагружения**.
3. Отсортируйте узлы по убыванию максимальной амплитуды циклов нагружения, см. рис. 2.15. Для этого щелкните один раз левой клавишей мыши на заголовке соответствующего столбца.

Включить/выключить столбцы данных можно с помощью контекстного меню, см. рис. 2.15. По умолчанию включены все столбцы.

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



Щелкните на заголовке столбца для сортировки

Номер узла	Макс. напр., МПа	Максимальная амплитуда, МПа	Максимальные медианы, МПа
3117	80.888	40.345	40.609
3118	80.427	40.085	40.420
3116	79.654	39.768	40.096
3119	78.167	38.998	39.365
3504	78.148	38.961	39.348
3505	77.571	38.660	39.118
3503	77.028	38.393	38.870
3115	76.854	38.363	38.657
3306	78.862	38.327	40.849
3576	78.467	38.217	40.592
3305	78.440	38.117	40.597
3577	77.986	37.989	40.239
3412	78.300	37.976	40.620
3307	77.939	37.865	40.457
3411	77.974	37.796	40.523
3575	77.553	37.761	40.169
3383	75.590	37.561	38.322

Рис. 2.15. Результаты: список узлов

Максимальные амплитуды циклов напряжения, оказывающих определяющее влияние на усталостную долговечность материала, обнаруживаются в узлах 3117, 3118, 3116, 3119.

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

Режим **Разгон** – узлы **3117, 3118, 3116, 3119**.

Режим **Рабочий режим** – узлы **592, 1642, 2117, 646**.

Режим **Остановка** – узлы **3117, 3118, 3116, 592**.

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

5. Перейдите на закладку **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. 2.16.
8. Нажмите кнопку **Показать**, появится окно с распределением максимальных амплитуд циклов, рис. 2.17.

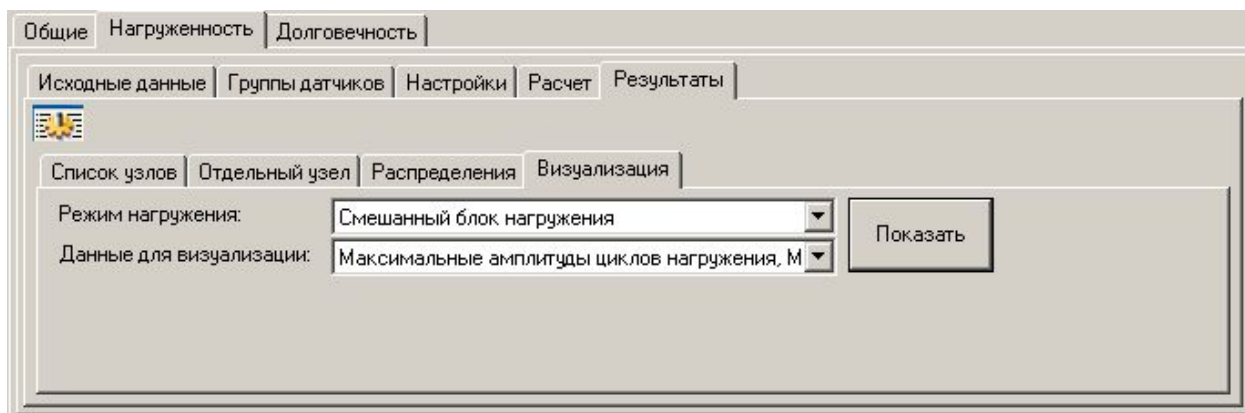


Рис. 2.16. Результаты: визуализация

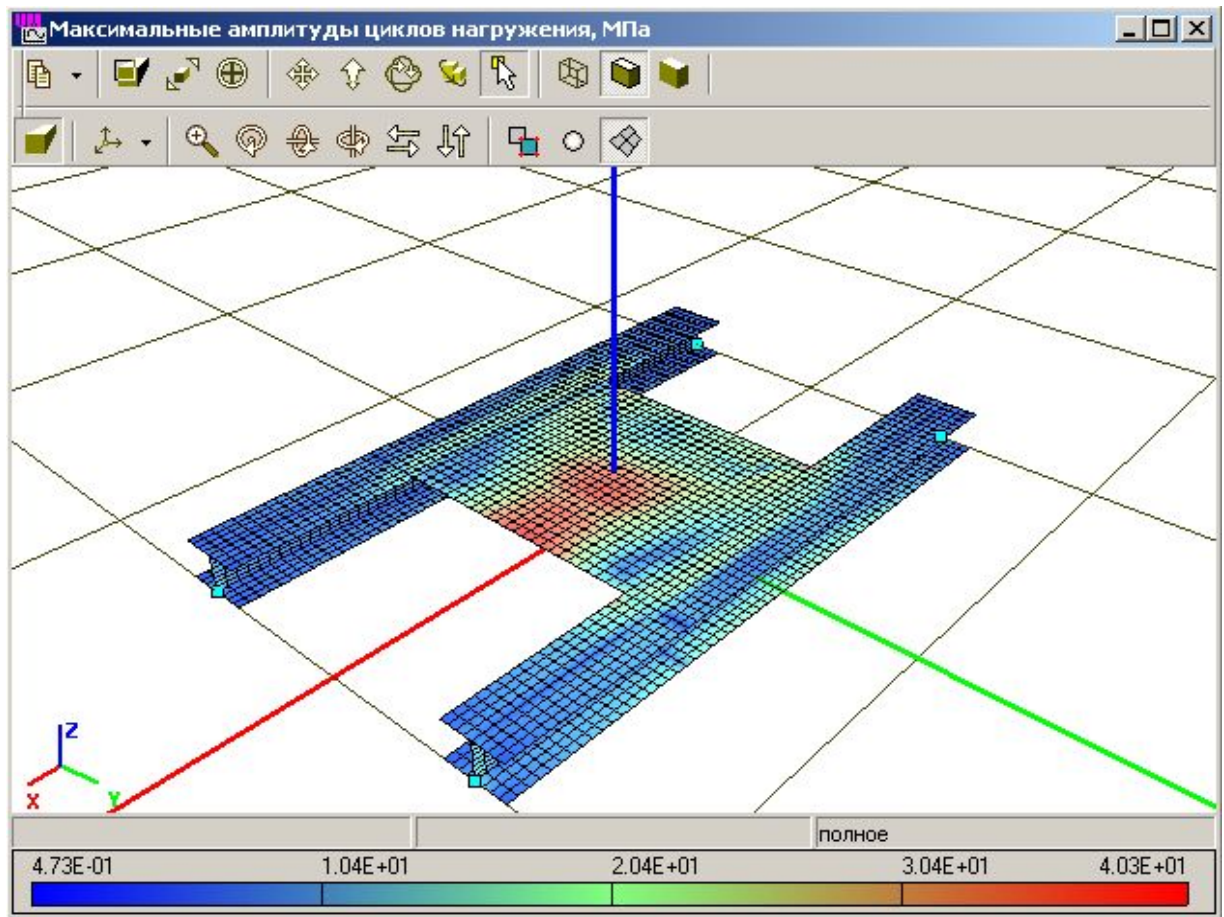


Рис. 2.17. Распределение максимальных амплитуд циклов нагружения

9. В контекстном меню окна выберите команду **Выделить конечно-элементные узлы**. Появится диалоговое окно выбора узлов.

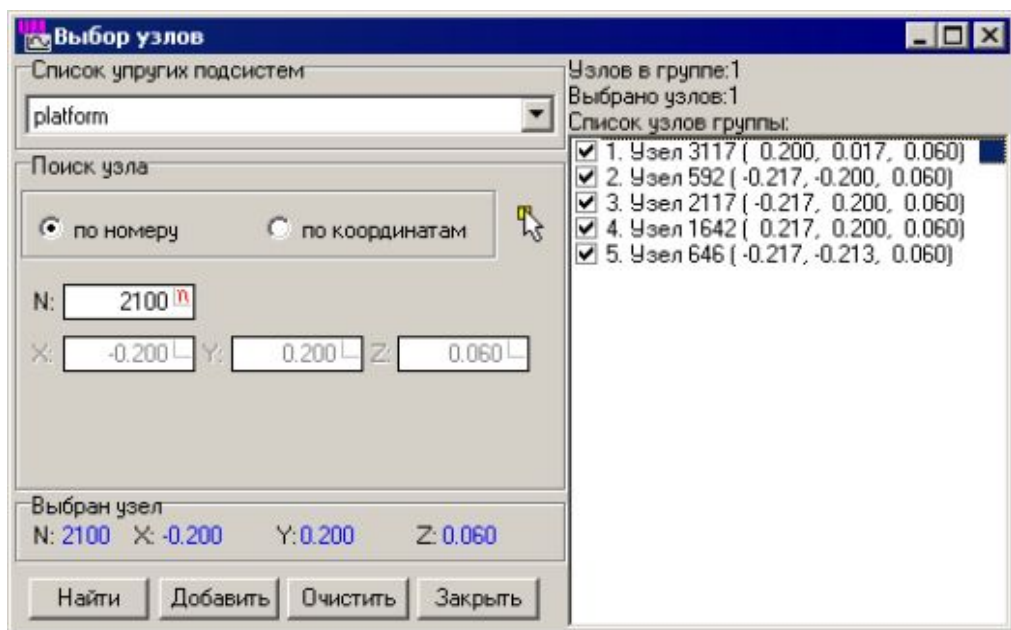


Рис. 2.18. Выбор узлов для выделения

10. В поле **Поиск узла** выберите опцию **по номеру**, а в поле **N** введите номер **3117**, как показано на рис. 2.18.

11. Затем нажмите кнопку **Найти** и **Добавить**. Узел **3117** будет добавлен к списку выделенных и отразится в списке в правой части окна, рис. 2.18.
12. Повторите действия 10-11 для узлов с номерами **592, 2117, 1642, 646**.
13. Нажмите кнопку **Заккрыть**. Выбранные узлы будут выделены на конечно-элементной модели рамы зелеными точками, см. рис. 2.19. Наведите курсор на точку – в нижнем поле окна отобразится номер и координаты узла.

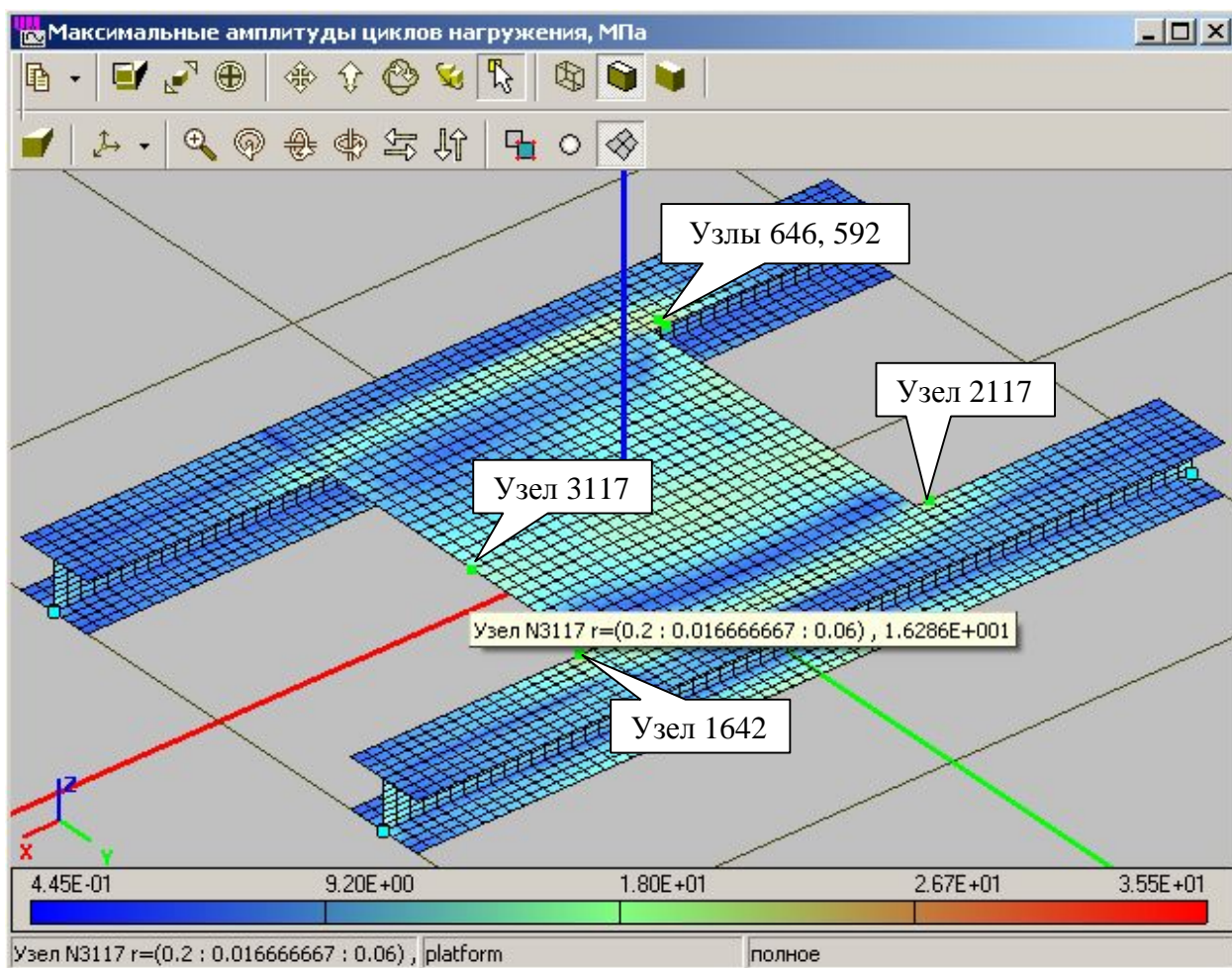

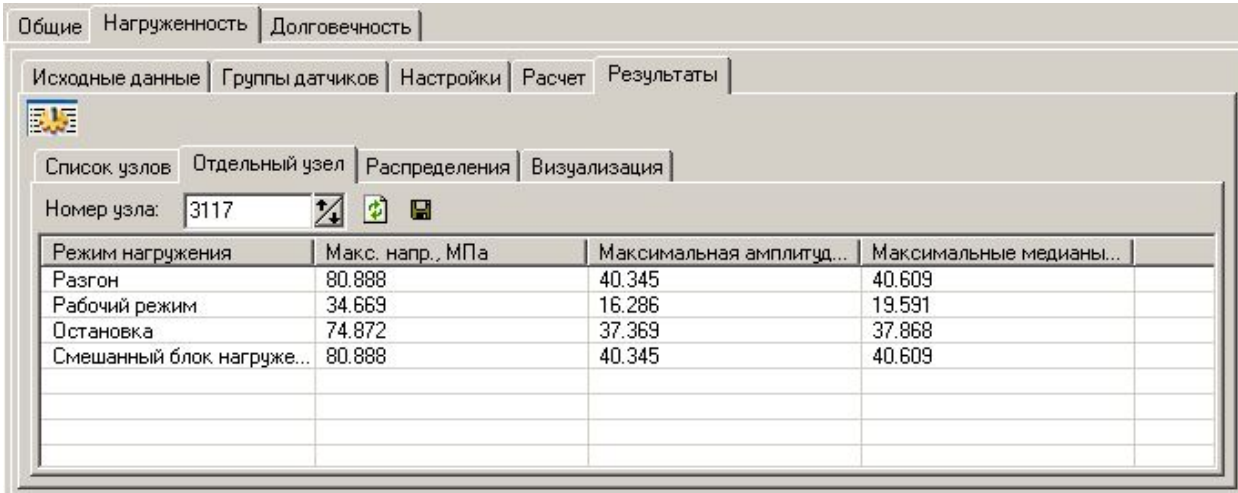


Рис. 2.19. Отображение выделенных узлы на КЭ схеме рамы

Далее проанализируем, какой из режимов нагружения является самым опасным с точки зрения возникновения высоких амплитуд напряжений в узле **3117**.

14. Перейдите на закладку **Нагруженность / Результаты / Отдельный узел**, в поле **Номер узла** введите **3117**, затем нажмите **Enter** или кнопку  для обновления данных в таблице, см. рис. 2.20.

Анализ данных в таблице на рис. 2.20 показывает, что максимальные напряжения и амплитуды циклов напряжений наблюдаются на режимах **Разгон** и **Остановка** – их величины в два раза превышают аналогичные показатели для **Рабочего режима**.



Общие | Нагруженность | Долговечность



Исходные данные | Группы датчиков | Настройки | Расчет | Результаты

Список узлов | Отдельный узел | Распределения | Визуализация

Номер узла: 3117

Режим нагружения	Макс. напр., МПа	Максимальная амплитуд...	Максимальные медианы...
Разгон	80.888	40.345	40.609
Рабочий режим	34.669	16.286	19.591
Остановка	74.872	37.369	37.868
Смешанный блок нагруже...	80.888	40.345	40.609

Рис. 2.20. Результаты: отдельный узел

15. Для анализа распределения показателей нагруженности перейдите на закладку **Нагруженность / Результаты / Распределения / Двухпараметрическое распределение<sup>1</sup>**, см. рис. 2.21.
16. В поле **Номер узла** введите **3117** и нажмите **Enter** или кнопку  для обновления данных в таблице, см. рис. 2.21.
17. Для построения распределения в графической форме нажмите кнопку , см. рис. 2.21.

<sup>1</sup> Двухпараметрическое распределение – это распределение по амплитудам и средним значениям циклов нагружения

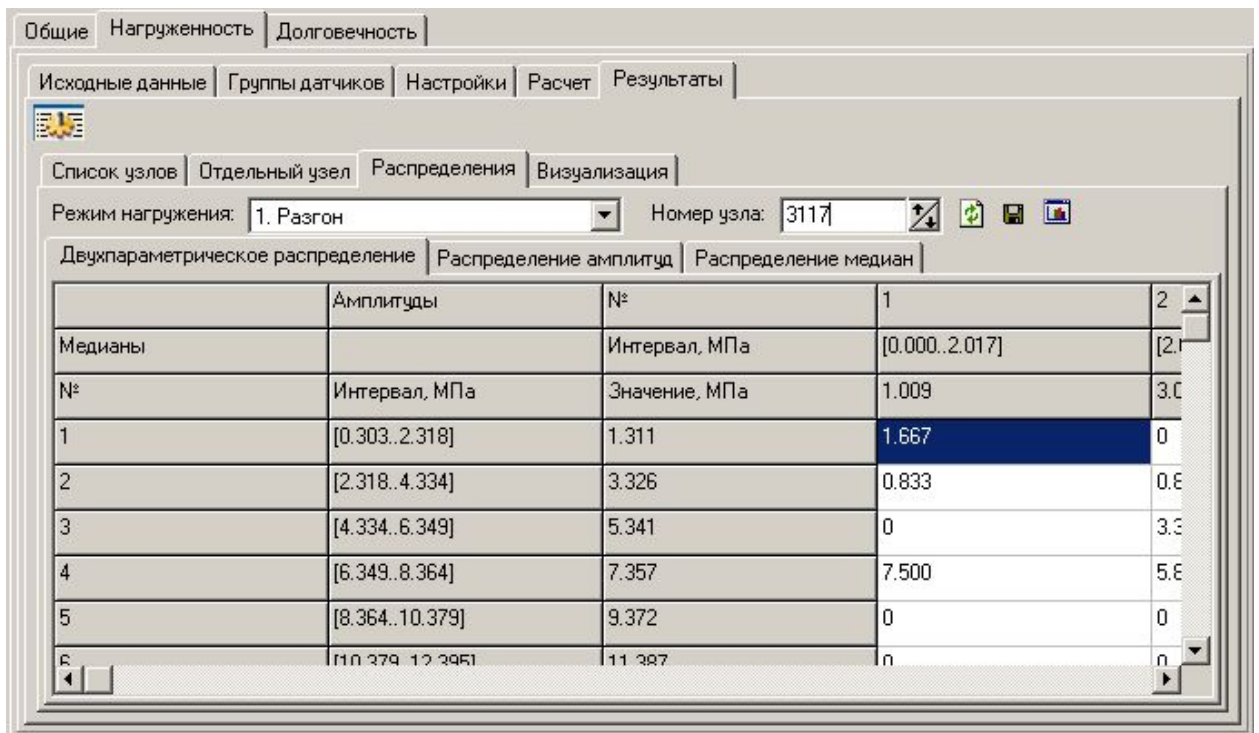


Рис. 2.21. Результаты для режима **Разгон**: двухпараметрическое распределение в табличной форме

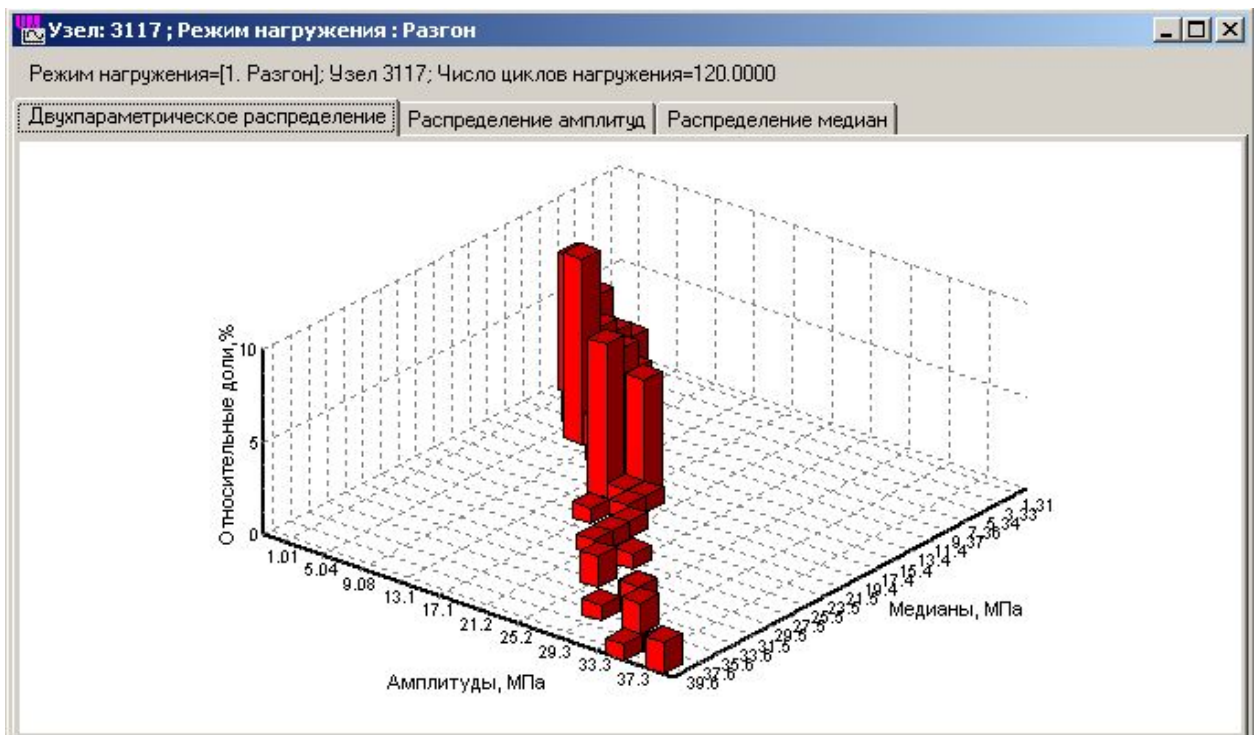



Рис. 2.22. Результаты для режима **Разгон**: двухпараметрическое распределение в форме гистограммы

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 закладку **Долговечность / Метод** и в поле **Метод расчета** выберите **S-N метод**, см. рис. 2.23. **S-N метод** – основной метод анализа долговечности, реализованный в модуле UM Durability.

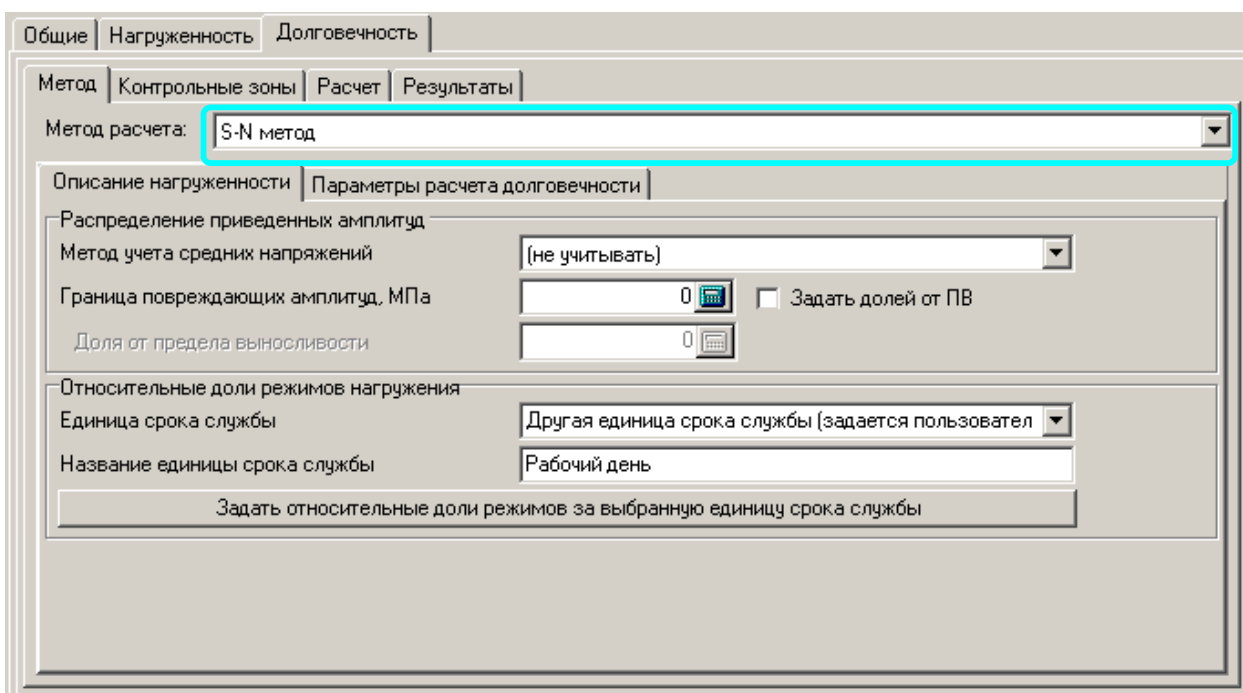


Рис. 2.23. Настройка параметров расчета долговечности

2. Выберите закладку **Описание нагруженности**, см. рис. 2.23.

Для первого знакомства с программой не будем производить коррекцию напряжений с учетом среднего.

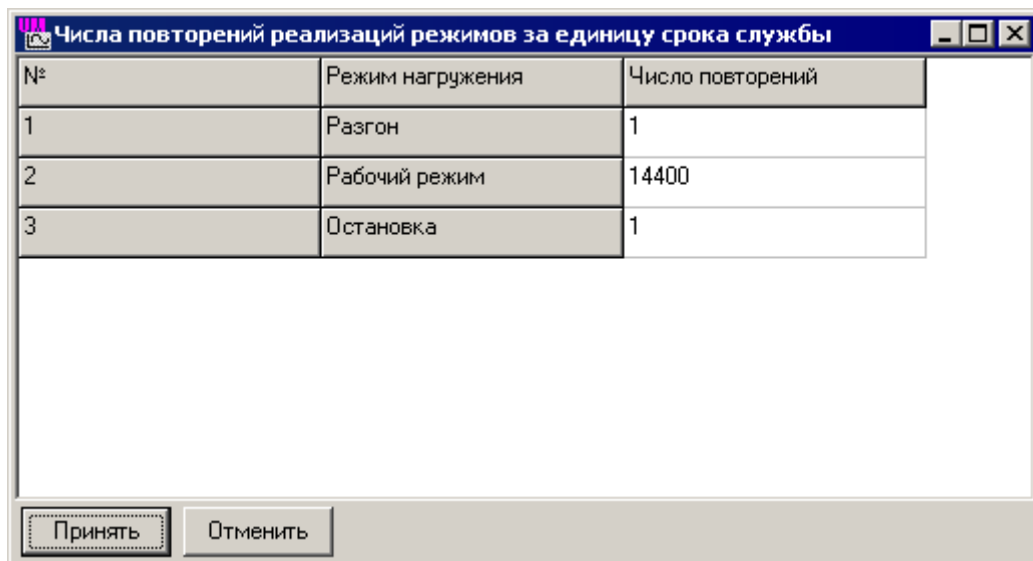
3. В поле **Метод учета средних напряжений** выберите **(не учитывать)**.
4. В поле **Граница повреждающих амплитуд** введите **0**. Это означает, что все циклы нагружения вне зависимости от их амплитуд напряжений приводят к повреждению материала детали.

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. 2.23.
7. Затем нажмите кнопку **Задать относительные доли...**, откроется окно задания коэффициентов, см. рис. 2.24.

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 двухсекундной истории напряжений. За восьмичасовой рабочий день эти две секунды повторяются  $(8*60*60 \text{ секунд в день}) / 2 = \mathbf{14400}$  раз.

8. Введите эти данные в диалоговое окно, см. рис. 2.24.



№	Режим нагружения	Число повторений
1	Разгон	1
2	Рабочий режим	14400
3	Остановка	1

Рис. 2.24. Число повторений за единицу срока службы

9. Выберите закладку **Параметры расчета долговечности**, см. рис. 2.25.

Общие | Нагруженность | Долговечность

Метод | Контрольные зоны | Расчет | Результаты

Метод расчета: S-N метод

Описание нагруженности | Параметры расчета долговечности

Вероятность безотказной работы

1 99.9 95

Параметры

Модель накопления повреждений: Линейная модель накопления повреждений

Коэффициент перевода: 310

Расчет коэффициента запаса

Проектный срок службы, лет: 10

Рис. 2.25. 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 **3117**), а в **Рабочем режиме** – в местах соединений верхнего листа рамы с двутавровыми опорными балками (узлы **3117, 592, 2117, 1642, 646**). 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 уголках соединений (узел 2100) могут иметь погрешности.

Оценку усталостной прочности материала верхнего листа рамы будем проводить по локальным напряжениям, а соединений – по номинальным, взятым, в узлах **3117, 592, 2117, 1642, 646**.

## 2.5.3. Описание контрольных зон и свойств сопротивления усталости

1. Выберите закладку **Долговечность / Контрольные зоны**, см. рис. 2.26.

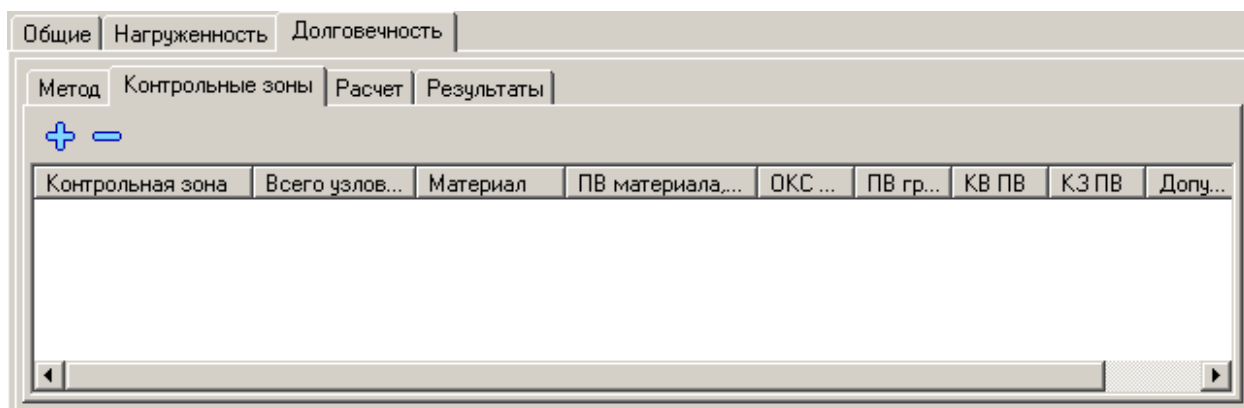


Рис. 2.26. Список контрольных зон

## Описание контрольной зоны Верхний лист

2. Добавьте новую контрольную зону. Появится окно редактирования свойств контрольной зоны, см. рис. 2.27.
3. Изменим название зоны, для этого в поле **Название** введите **Верхний лист**.

Свойства контрольной зоны [Верхний лист]

Свойства | Список узлов

Название:

Материал:

Тип нагружения:

Описание кривой усталости

Тип КУ:

Sf0: Предел выносливости образца: R=-1, МПа

Kf: Общий коэффициент снижения предела выносливости

Sf: Предел выносливости группы: R=-1, МПа

SE: Коэффициент вариации предела выносливости

Nc1: Базовое число циклов, млн.

B1: Тангенс угла наклона КУ (участок 1)

B2: Тангенс угла наклона КУ (участок 2)

Коэффициент запаса по пределу выносливости

Значение   Значение коэффициента запаса используется для расчета предела выносливости, применяемого при вычислении долговечности.

Остаточные/температурные напряжения в материале, МПа

Рис. 2.27. Окно описания свойств контрольной зоны

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

4. Перейдите на закладку **Список узлов**.
5. Добавьте список узлов вручную<sup>1</sup> или загрузите его из текстового файла *Список узлов верхней пластины.nls* при помощи команды контекстного меню **Загрузить список узлов из файла**, см. рис. 2.28. Список содержит не только узел **3117**, но и прилегающие к нему.

<sup>1</sup> Для удобства ввода всех узлов из некоторого диапазона номеров используйте синтаксис *НомерНачальный-НомерКонечный*, так укажите 3380-3384, чтобы добавить узлы 3380, 3381, 3382, 3383, 3384.

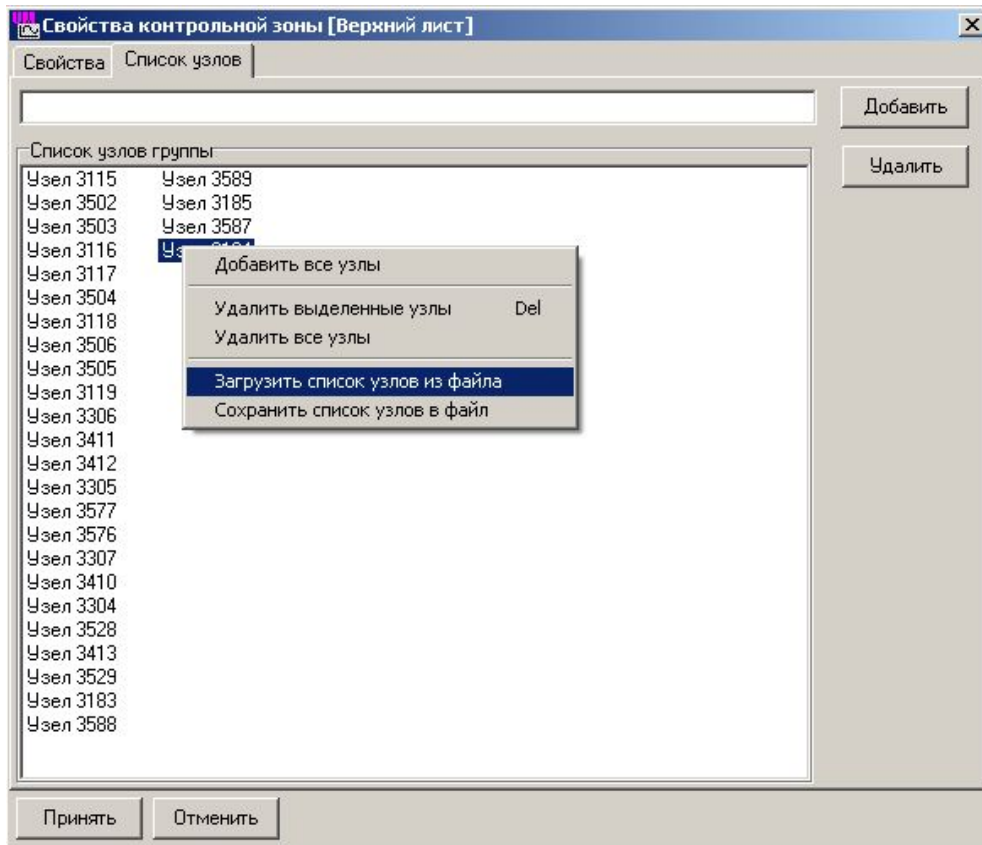


Рис. 2.28. Изменение списка узлов

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

Прочностные свойства		
$S_y$ :	Предел текучести, МПа	305
$S_u$ :	Предел прочности, МПа	440
Свойства сопротивления усталости стандартного образца		
$S_f$ :	Предел выносливости, который соответствует 50% вероятности разрушения стандартного образца на базовом числе циклов $N_0$ в условиях регулярного нагружения (МПа)	210
$N_0$ :	Базовое число циклов	$10^7 = 1E7$
$b_1$ :	Тангенс наклона первого участка кривой усталости	0.125
$b_2$ :	Тангенс наклона второго участка кривой усталости	0.020

Появится диалоговое окно редактирования свойств материала.

### Описание свойств материала

- В этом окне перейдите на закладку **Общие**. Введите параметры так, как показано на рис. 2.29.

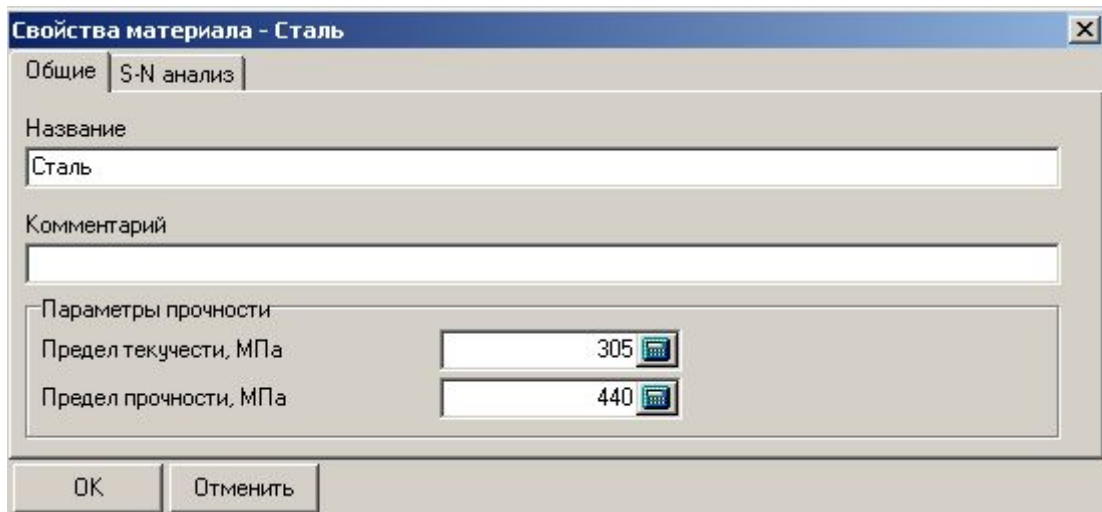


Рис. 2.29. Окно описания свойств материала

- Выберите закладку **S-N анализ / Изгиб** чтобы определить свойства материала.
- Выберите тип кривой усталости (поле **Тип КУ**) установите в **Модель №5**, далее введите параметры материала так, как показано на рис. 2.30.
- После ввода значений всем полям нажмите кнопку **Назначить для всех** и затем закройте окно кнопкой **ОК**.

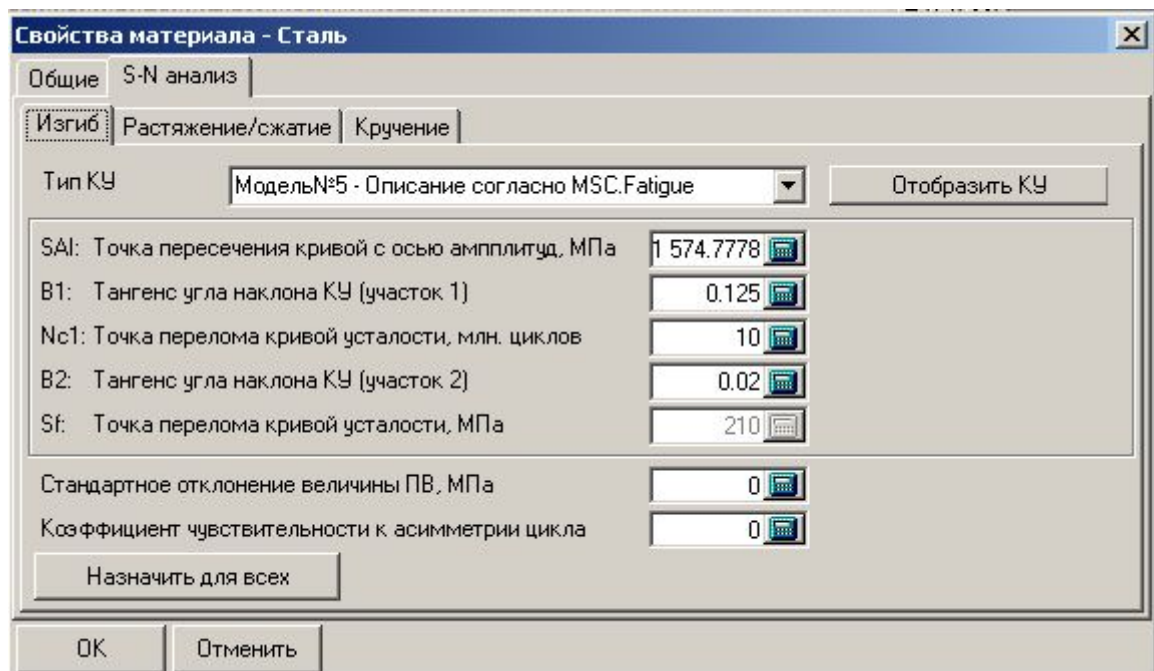


Рис. 2.30. Окно описания свойств материала

## Описание контрольной зоны Верхний лист (продолжение)

11. В окне **Описание свойств контрольной зоны [Верхний лист]** в поле **Тип нагружения** выберите **Изгиб**, см. рис. 2.31.

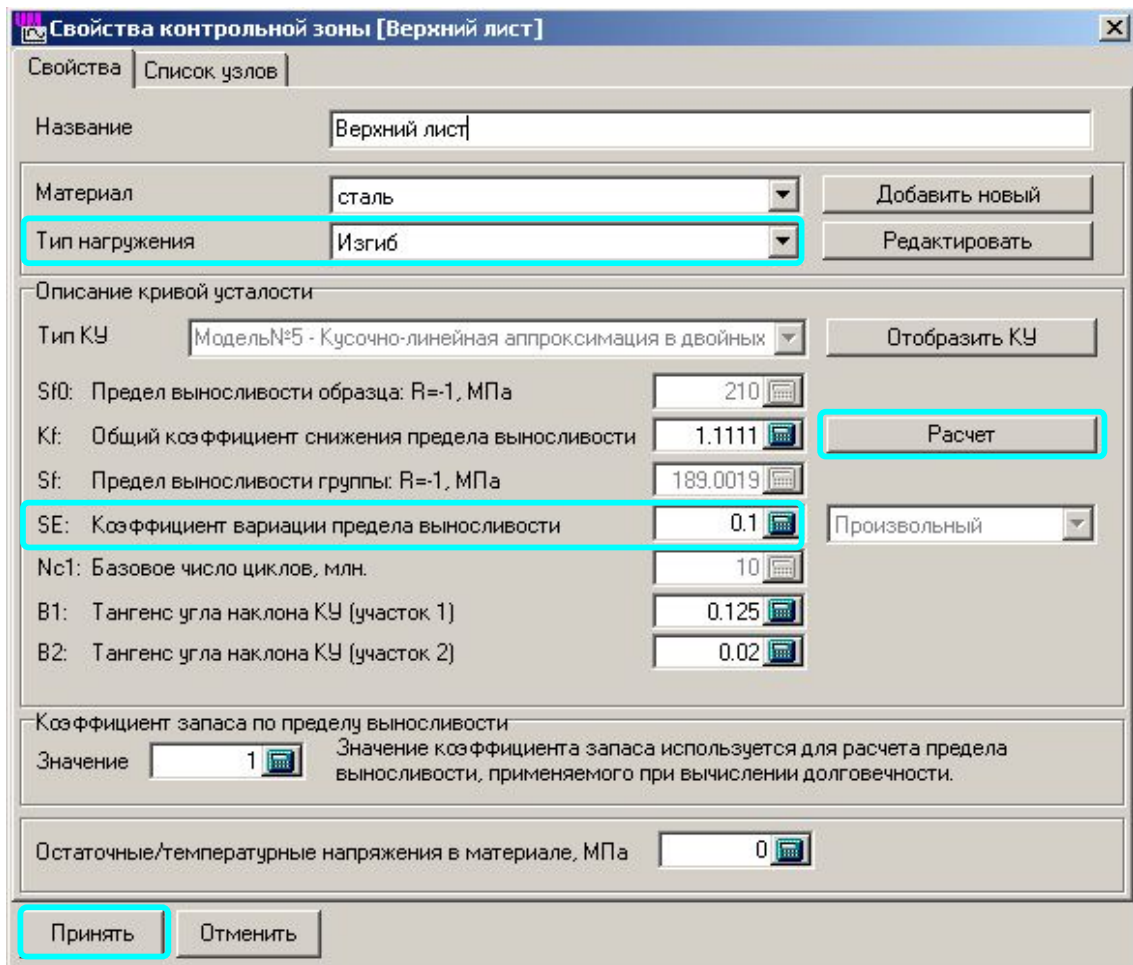


Рис. 2.31. Свойства группы **Верхний лист**

12. Нажмите кнопку **Расчет** для использования инструмента расчета общего коэффициента снижения предела выносливости, см. рис. 2.32. Поскольку расчет усталостной долговечности для зоны **Верхний лист** ведется в локальных напряжениях, то **Коэффициент концентрации напряжений** принимается равным единице. Нажмите **Принять** по окончании ввода.

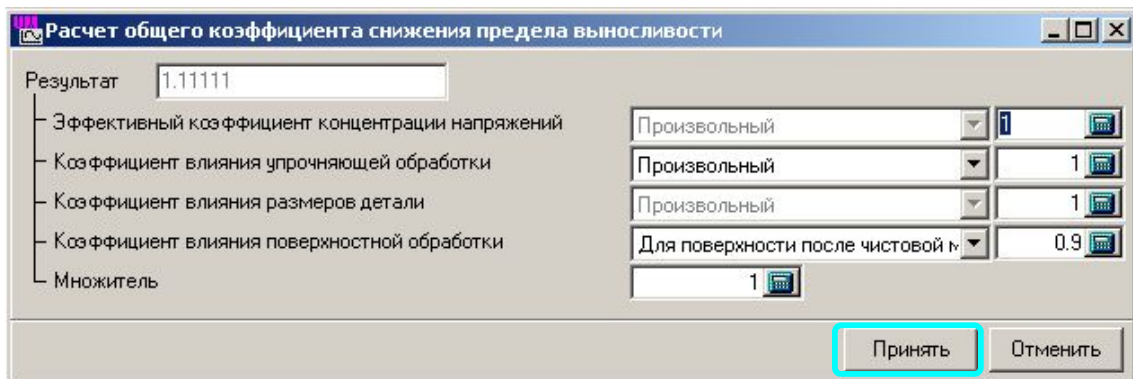


Рис. 2.32. Расчет коэффициента снижения предела выносливости

1. В поле **Коэффициент вариации** введите **0.1**, см. рис. 2.31.
2. Нажмите **Принять** в окне свойств зоны **Верхний лист** для сохранения введенных изменений, рис. 2.31.

### Описание контрольной зоны Соединение

3. Добавьте еще одну контрольную зону **Соединение** для оценки усталостной прочности в зоне соединения верхнего листа и продольных балок.
4. Введите свойства зоны как это показано на рис. 2.33, 2.34.

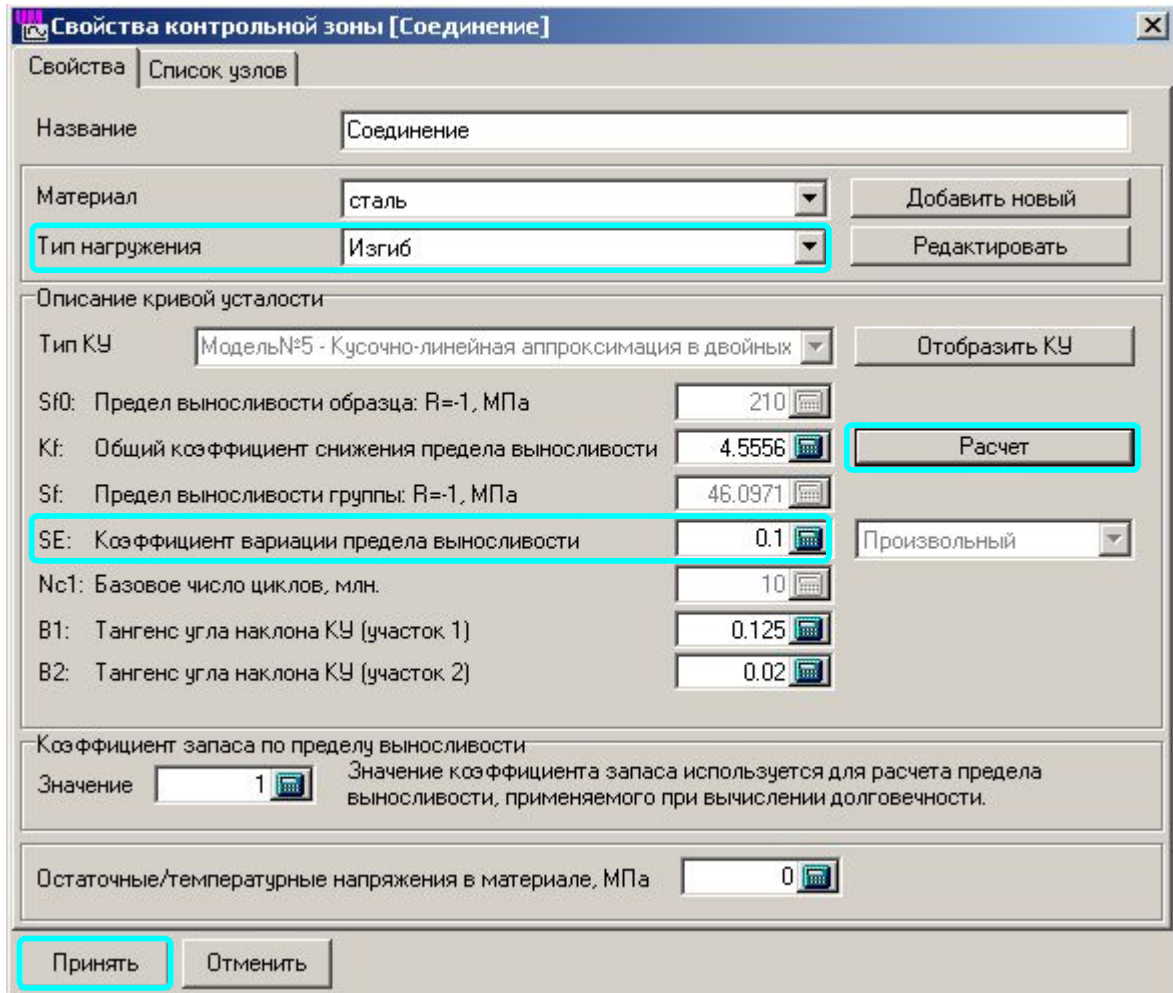


Рис. 2.33. Свойства контрольной зоны **Соединение**

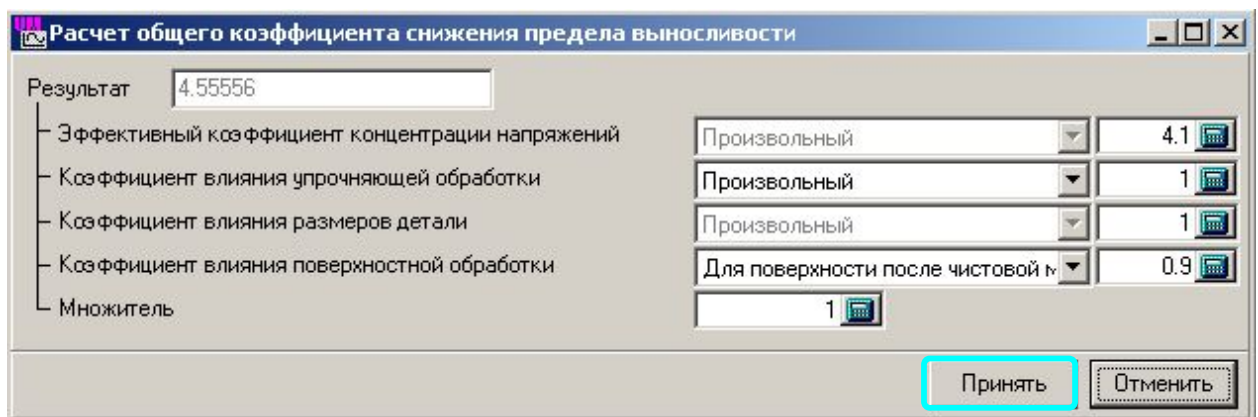


Рис. 2.34. Коэффициент снижения предела выносливости

5. Список узлов зоны загрузите из файла *Список узлов соединения.nls*.
6. Нажмите **Принять** чтобы применить все изменения и закрыть окно редактирования свойств контрольной зоны.

## 2.5.4. Сохранение проекта в файл

1. Щелкните кнопку  для сохранения проекта в файл.

## 2.5.5. Расчет долговечности

1. Выберите закладку Долговечность / Расчет
2. Нажмите кнопку **Рассчитать**, см. рис. 2.35. Расчет долговечности займет несколько секунд.

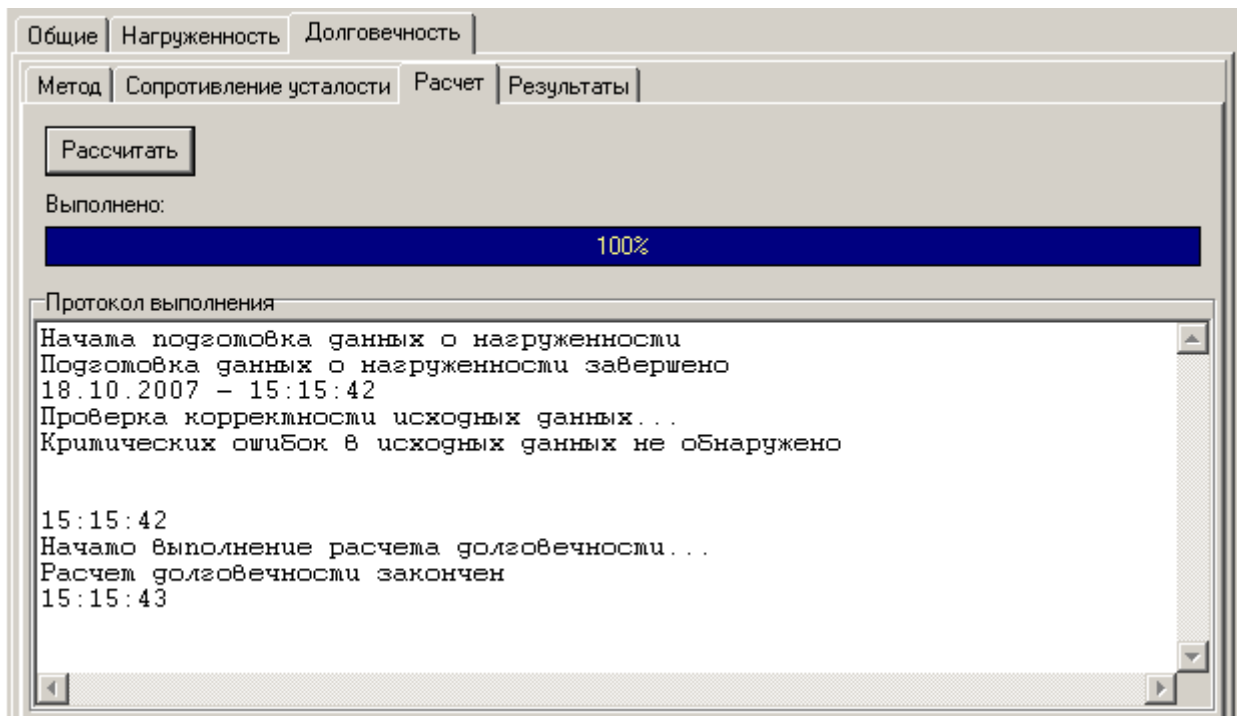


Рис. 2.35. Расчет параметров долговечности

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

### 2.5.6. Анализ результатов расчета долговечности

1. Перейдите на закладку Долговечность / Результаты / Список узлов.
2. В списке Режим нагружения выберите Смешанный блок нагружения.
3. Отсортируйте данные по столбцу Срок службы (лет), см. рис. 2.36.

Максимальные повреждения в единицу времени наблюдаются в узле **592**. Срок службы детали до разрушения в зоне соединения верхнего листа с боковыми балками составляет **13,007** года с заданной вероятностью безотказной работы 0,95.

Номер узла	Контрольная зона	Максимальная амплитуда, МПа	Срок службы, лет	К.З по сроку службы
592	Соединение	36.529	13.007	1.301
2100	Соединение	35.922	3.20215E006	320215.000
2117	Соединение	26.646	2.68249E007	2.68249E006
3129	Соединение	34.151	4.03112E007	4.03112E006
646	Соединение	26.267	1.02204E008	1.02204E007
574	Соединение	25.347	5.37646E008	5.37646E007
3149	Соединение	32.209	7.94235E008	7.94235E007
3471	Соединение	30.940	5.60077E009	5.60077E008
591	Соединение	23.836	1.87801E010	1.87801E009
571	Соединение	23.840	2.9176E010	2.9176E009
1459	Соединение	22.905	4.01486E010	4.01486E009
643	Соединение	20.705	2.46396E013	2.46396E012
2171	Соединение	19.136	8.4514E014	8.4514E013
2116	Соединение	18.389	2.37398E015	2.37398E014
2959	Соединение	23.536	5.16946E015	5.16946E014

Рис. 2.36. Результаты расчета долговечности

Давайте проанализируем наиболее опасные с точки зрения долговечности режимы работы.

4. Выберите закладку Долговечность / Результаты / Отдельный узел.
5. В поле **Номер узла** введите **592** и нажмите **Enter**, см. рис. 2.37.

На основании анализа данных, представленных на рис. 2.37, наибольший вклад в накопление усталостных повреждений вносит рабочий режим.

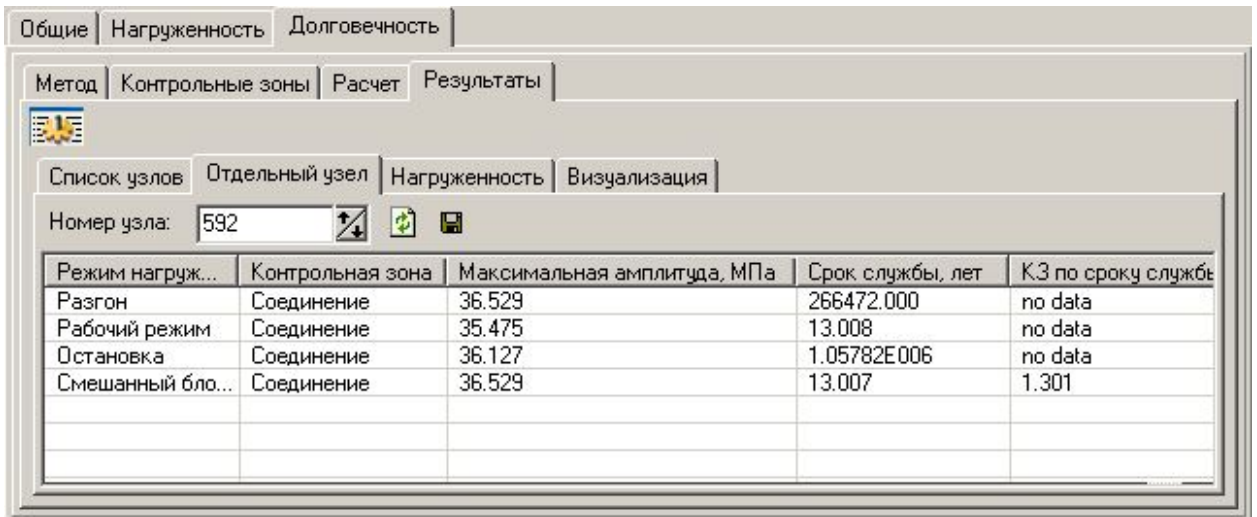


Рис. 2.37. Отдельный узел

6. Для оценки приведенных амплитуд перейдите на закладку Долговечность / Результаты / Нагруженность.
7. В поле **Номер узла** введите **592** и нажмите **Enter**, см. рис. 2.38.

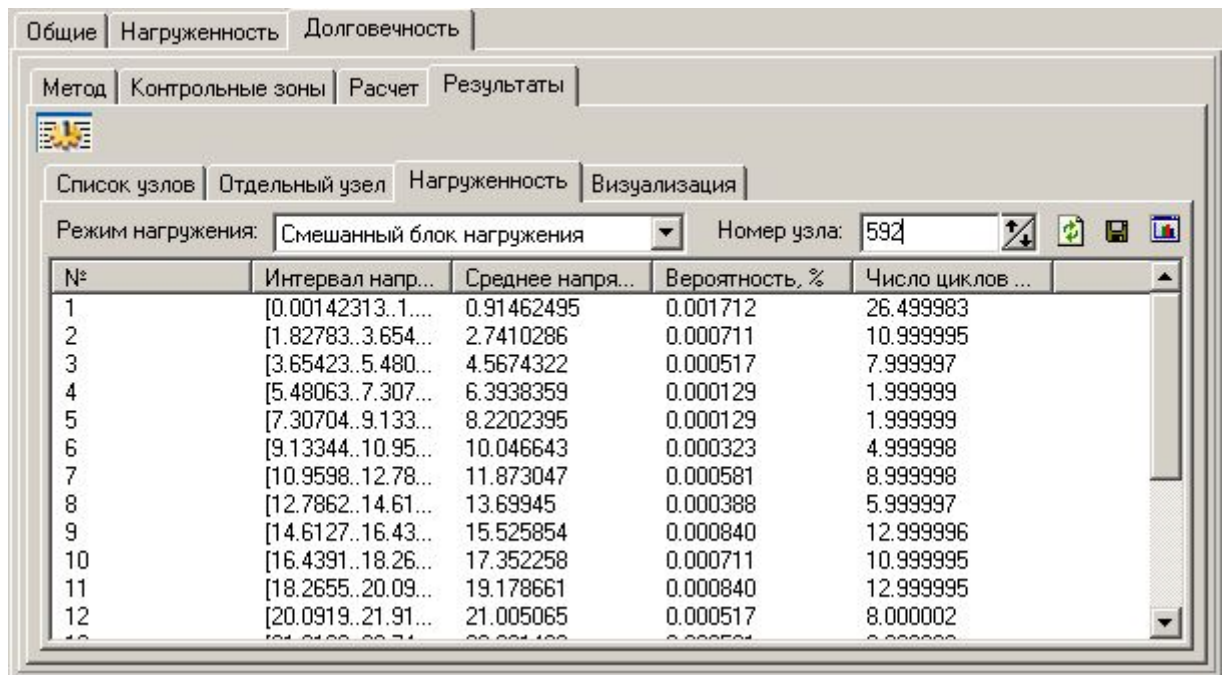



Рис. 2.38. Результаты расчета нагруженности

- Для построения распределения амплитуд щелкните на кнопке . Появится новое графическое окно с визуализацией этого распределения, см. рис. 2.39.

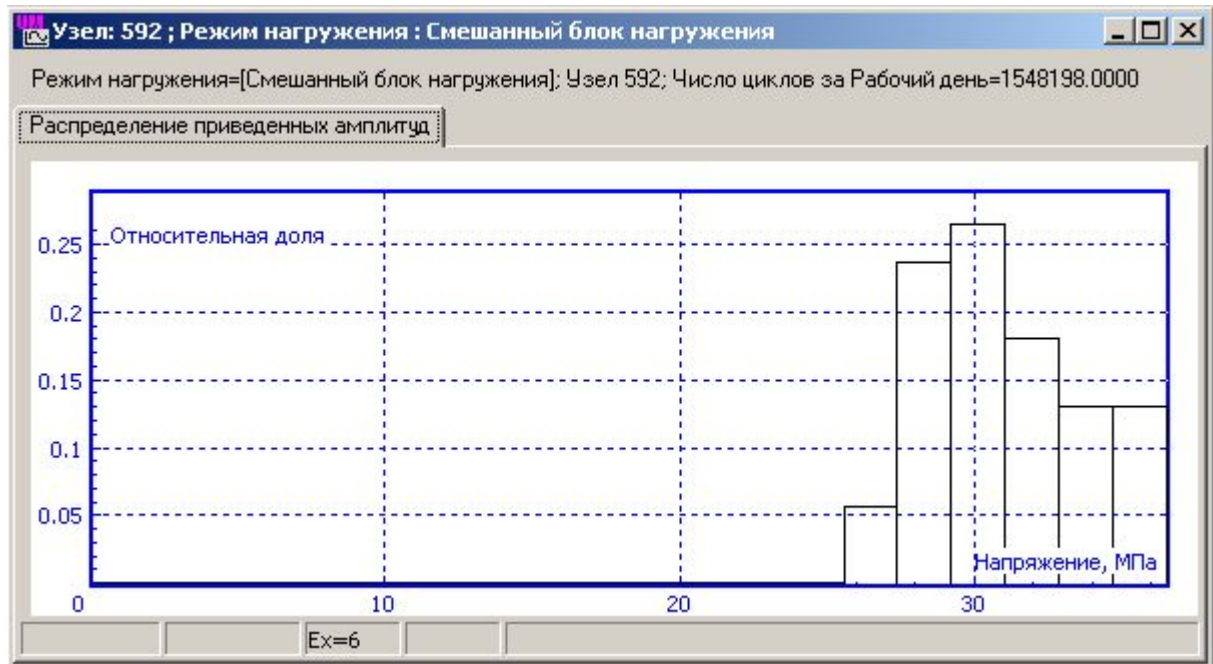



Рис. 2.39. Распределение приведенных амплитуд

### 2.5.7. Сохранение проекта в файл

- Щелкните кнопку  для сохранения проекта в файл.