



Руководство пользователя



# Расчет динамической нагруженности и усталостной долговечности элементов конструкции

Рассматривается подход, позволяющий производить оценку эксплуатационной нагруженности и усталостной долговечности конструктивных элементов механических систем на основании результатов моделирования их динамики с учетом реальных условий эксплуатации средствами программного комплекса «Универсальный механизм»

## Оглавление

<b>13. МОДУЛЬ РАСЧЕТА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ .....</b>	<b>1-4</b>
<b>13.1. ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>1-4</b>
<b>13.2. АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАГРУЖЕННОСТИ .....</b>	<b>1-7</b>
13.2.1. Методика оценки эксплуатационной нагруженности .....	1-8
13.2.1.1. Расчет реализаций динамических напряжений .....	1-9
13.2.1.2. Схематизация процесса нагружения .....	1-11
13.2.1.3. Частные блоки нагружения .....	1-13
13.2.1.4. Эксплуатационная нагруженность. Смешанный блок нагружения .....	1-17
13.2.1.5. Приведение результатов схематизации к единицам срока службы .....	1-19
13.2.2. Подготовка исходных данных .....	1-21
13.2.2.1. Описание режимов нагружения .....	1-24
13.2.2.2. Выбор расчетных напряжений .....	1-26
13.2.2.3. Просмотр реализаций напряжений в узлах .....	1-28
13.2.2.4. Задание границ реализаций режимов по времени .....	1-30
13.2.3. Работа с группами узлов .....	1-32
13.2.4. Настройки расчета нагруженности .....	1-35
13.2.4.1. Общие настройки .....	1-35
13.2.4.2. Специализированные настройки расчета нагруженности .....	1-37
13.2.4.2.1. Настройки расчета нагруженности для вагонной методики .....	1-37
13.2.5. Результаты расчета нагруженности .....	1-38
13.2.5.1. Список датчиков .....	1-38
13.2.5.2. Отдельный датчик .....	1-40
13.2.5.3. Распределения .....	1-40
13.2.5.3.1. Графическое представление .....	1-42
13.2.5.4. Визуализация результатов расчета .....	1-43
<b>13.3. ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ .....</b>	<b>1-46</b>
13.3.1. Процедура анализа усталостной долговечности .....	1-47
13.3.1.1. Выбор методики расчета усталостной долговечности .....	1-48
13.3.1.2. Приведение к сроку службы .....	1-48
13.3.1.3. Задание свойств контрольных зон для групп узлов .....	1-52
13.3.1.3.1. Справочник материалов .....	1-53
13.3.1.3.2. Модели кривой усталости .....	1-55
13.3.1.3.3. Расчет приведенных амплитуд .....	1-58
13.3.1.4. Анализ результатов расчета долговечности .....	1-60
13.3.1.5. Список узлов .....	1-60
13.3.1.6. Результаты расчета долговечности для отдельного узла .....	1-61
13.3.1.7. Результаты расчета нагруженности .....	1-61
13.3.1.7.1. Табличное представление .....	1-61
13.3.1.7.2. Графическое представление .....	1-62
13.3.1.8. Визуализация результатов на конечно-элементной сетке .....	1-63
<b>13.4. МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ .....</b>	<b>1-64</b>
13.4.1. Вагонная методика .....	1-64
13.4.1.1. Описание нагруженности .....	1-64
13.4.1.2. Параметры расчета долговечности .....	1-67
13.4.1.3. Задание свойств сопротивления усталости .....	1-69
13.4.1.4. Процедура расчета .....	1-71
13.4.2. S-N методика .....	1-75
13.4.2.1. Описание нагруженности .....	1-75
13.4.2.2. Параметры расчета долговечности .....	1-76
13.4.2.3. Задание свойств сопротивления усталости .....	1-78
13.4.2.4. Процедура расчета .....	1-80

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ..... 1-82**

# 1. Модуль расчета усталостной долговечности

## 1.1. Введение

Программный комплекс «Универсальный механизм» включает в себя специализированный модуль для расчета усталостной долговечности **UM Durability**.

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, представленных в виде последовательности полуциклов нагружения.

Экспериментальное исследование нагруженности связано с необходимостью изготовления натурального образца механизма и, следовательно, не может проводиться на ранних стадиях разработки. Компьютерное моделирование лишено данного недостатка и позволяет добиться существенной экономии времени и средств на проведение натурального эксперимента.

В настоящем руководстве рассматривается подход, позволяющий производить оценку эксплуатационной нагруженности и усталостной долговечности конструктивных элементов механических систем на основании результатов моделирования их динамики с учетом реальных условий эксплуатации средствами программного комплекса (ПК) «Универсальный механизм».

Процедура оценки эксплуатационной нагруженности и усталостной долговечности элементов конструкции машин, реализованная в программном комплексе «Универсальный механизм», включает следующие основные этапы.

- Анализ условий эксплуатации механизма с выделением частных режимов работы и их относительных долей за планируемый срок службы.
- Подготовка гибридных моделей механизма, включающих исследуемые на прочность детали в виде упругих тел (с использованием модуля анализа динамики упругих тел **UM FEM**), предназначенных для моделирования выделенных режимов эксплуатации.

Упругие свойства деталей учитываются путем рассмотрения их конечно-элементных (КЭ) моделей, подготовленных в программах **ANSYS** или **MSC.NASTRAN**. В основе учета упругости деталей лежит модальный подход, представляющий упругие деформации тела суперпозицией собственных форм. Формы колебаний, а также данные для последующего расчета напряженно-деформированного состояния детали рассчитываются средствами указанных выше программ конечно-элементного анализа. При адекватном выборе

набора форм колебаний их комбинация моделирует упругие свойства тел точно и эффективно.

- Проведение численных экспериментов, моделирующие работу механизма для выделенных режимов эксплуатации.

Деформации упругих тел с достаточной точностью могут быть представлены суммой некоторого числа форм колебаний, взятых с определенными масштабными коэффициентами. Эти масштабные множители, или, в терминах модального подхода, модальные координаты, используются для получения напряженно-деформированного состояния тела в каждый момент времени. Таким образом, рассчитываются напряжения в узлах конечно-элементной сетки модели упругого тела, и определяется история изменения напряженного состояния детали.

Моделирование динамики механических систем осуществляется средствами ПК «Универсальный механизм», при этом 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** для последующей обработки.

- Анализ усталостной долговечности проводится для каждого упругого тела в отдельности. Средствами модуля **UM Durability** описываются группы датчиков – узлов конечно-элементной модели исследуемого тела. Для каждой из групп датчиков задается способ приведения сложного напряженного состояния материала детали в зоне датчика к одноосному. По записям процессов изменения модальных координат детали рассчитываются истории изменения напряжений в датчиках для каждого из режимов работы. Полученные процессы схематизируются для дальнейшего использования в алгоритмах оценки усталостной прочности и долговечности; распределения их статистических характеристик применяются для предварительного выявления ресурсоограничивающих зон конструкции.

- Подготовка расчета усталостной долговечности включает 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 реализованы алгоритмы расчета усталостной долговечности при многоцикловой усталости, регламентированные нормативными документами локомотивостроения (Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм, 1998г.) и вагоностроения (Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных), 1996г.), а также их модификации.

Дополнительные возможности модуля:

- визуализация и экспорт во внешние программы результатов расчета нагруженности и усталостной долговечности для отдельных датчиков и контрольных зон;
- графическое отображение распределений расчетных параметров нагружения и результатов оценки долговечности по исследуемой детали;

- справочник свойств сопротивления усталости конструкционных материалов с возможностью добавления новых записей.



Рис. 1.1. Порядок оценки эксплуатационной нагруженности и усталостной долговечности

## 1.2. Анализ эксплуатационной нагруженности

Анализ эксплуатационной нагруженности является одним из необходимых этапов проектирования и обслуживания конструкции. Под эксплуатационной нагруженностью понимается совокупность факторов, оказывающих влияние на работоспособность технической системы. В качестве основного фактора влияния рассматривается силовая нагруженность, описываемая величинами напряжений и деформации, возникающих в элементах конструкции.

Наиболее достоверные данные по силовой нагруженности могут быть получены в результате статистической обработки результатов натурных экспериментов, полученных с помощью тензометрирования в различных режимах эксплуатации объекта. Подобный подход имеет ряд существенных недостатков, таких как: высокие материальные и временные затраты на проведение эксперимента, необходимость изготовления серии натуральных образцов и, таким образом, невозможность применения на ранних стадиях разработки, когда стоимость внесения изменений в конструкцию минимальна.

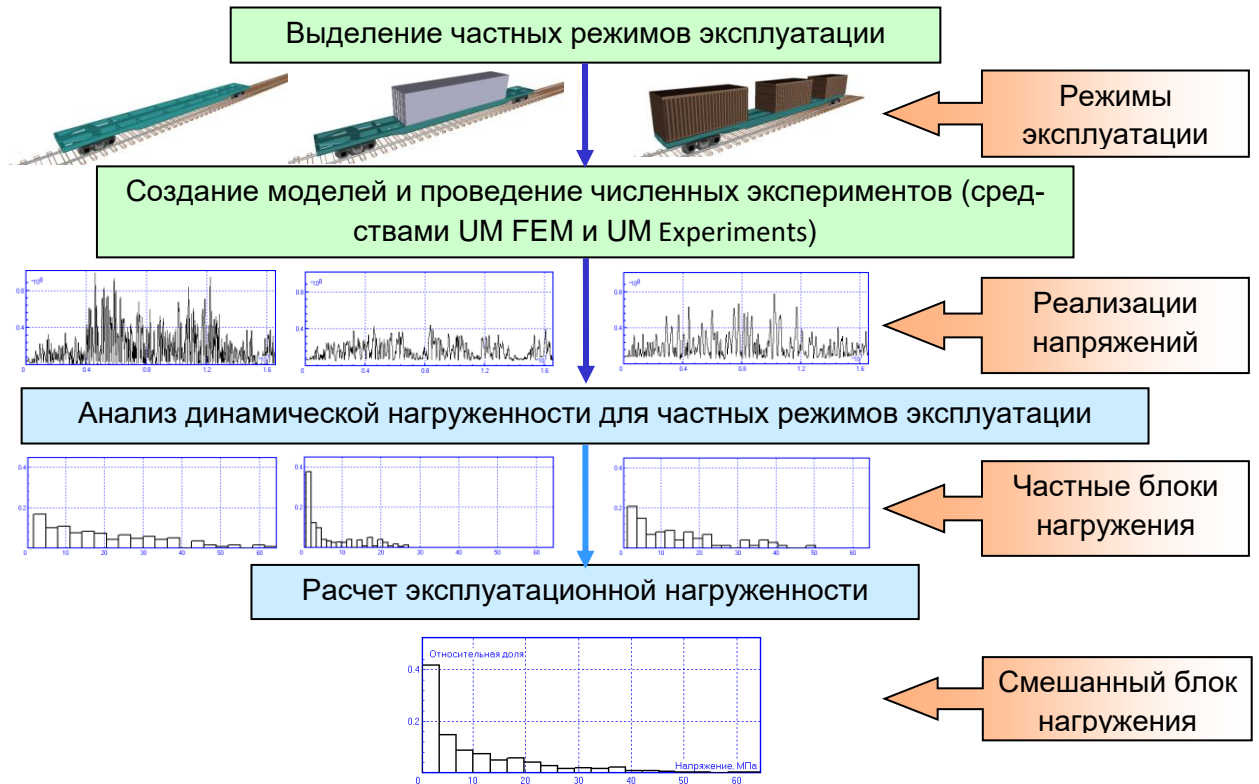
Альтернативной методикой оценки эксплуатационной нагруженности является компьютерное моделирование динамических процессов. Команда разработчиков программного комплекса «Универсальный механизм» более 10 лет занимается разработкой методик моделирования динамики сложных механических систем. Включение модуля динамики упругих тел позволило выйти на новый круг задач, включающий анализ не только динамических, но и прочностных характеристик исследуемых объектов.

Оценка динамической нагруженности основывается на анализе историй изменения напряженно-деформированного состояния конструкции в ходе эксплуатации. Динамика гибридных моделей (включающих наряду с абсолютно твердыми телами упругие тела) рассчитывается по методу Крейга-Бэмптона. Упругие тела описываются конечно-элементными моделями, на основании которых производится переход от величин модальных координат, используемых при расчете динамики упругого тела, к величинам напряжений, возникающих в исследуемых телах.

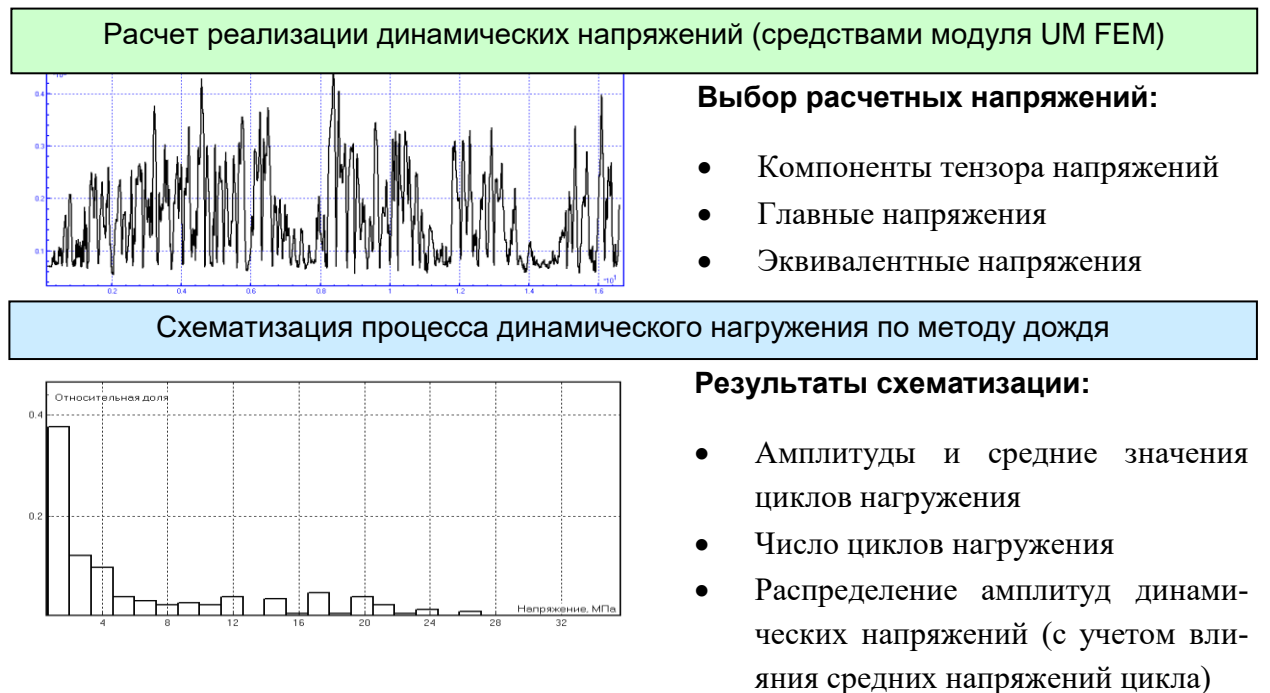
Методика моделирования динамики упругих тел по методу Крейга-Бэмптона, реализованная в модуле **УМ FEM** подробно описана в [Главе 11](#) руководства пользователя.

### 1.2.1. Методика оценки эксплуатационной нагруженности

В данном разделе приведено описание основных алгоритмов, реализованных в модулях UM FEM и UM Durability для расчета динамической нагруженности упругих тел. Основные этапы анализа эксплуатационной нагруженности отображены на схеме.



Основные этапы анализа динамической нагруженности для частного режима эксплуатации представлены на следующей схеме.



### 1.2.1.1. Расчет реализаций динамических напряжений

Расчет напряжений, возникающих в моделях упругих тел, в программном комплексе «Универсальный механизм» осуществляется следующим образом.

- Расчет тензора напряжений

Для формирования истории изменения НДС исследуемая деталь должна быть представлена упругой подсистемой.

При подготовке конечно-элементной модели упругого тела формируется список датчиков – узлов, для которых подготавливаются матрицы пересчета, позволяющие вычислять величину тензора напряжений по значениям модальных координат упругой подсистемы. Процесс подготовки упругой подсистемы подробно изложен в [Главе 11](#) руководства пользователя Моделирование упругих тел. Для расчета тензора напряжений используется следующее соотношение:

$$\sigma_i^e = D_i^e B_i^e(x_i^e) u_i^e = D_i^e B_i^e(x_i^e) H_i^e w = D_i^e B_i^e(x_i^e) \sum_{j=1}^H h_{ji}^{e\sigma} w_j = \sum_{j=1}^H h_{ji}^{e\sigma} w_j = H_i^{e\sigma} w \quad (1.1)$$

где  $\sigma_i^e$  – матрица-столбец компонент напряжений  $i$ -го конечного элемента,  $B_i^e$  – матрица, связывающая поле деформаций конечного элемента с узловыми перемещениями,  $D_i^e$  – матрица упругости конечного элемента, построенная на основе закона Гука,  $X_i^e$  – матрица-столбец координат узлов конечного элемента,  $h_{ji}^e$  – часть  $j$ -ой формы, соответствующая узловым степеням свободы  $i$ -го конечного элемента.

В процессе моделирования величины модальных координат каждой из упругих подсистем записываются в бинарных файлах с расширением \*.imc с фиксированным шагом по времени моделирования. Матрицы пересчета хранятся в файле упругой подсистемы **input.fss**.

- Выбор расчетного напряжения

Классическая теория многоциклового усталости позволяет оценить сопротивление усталости детали, работающей в условиях одноосного напряженно-деформированного состояния. В этом случае нагружение характеризуется единственной ненулевой компонентой тензора напряжений.

В большинстве случаев материал детали находится в сложном НДС. В том случае, если величина одного из компонент тензора существенно превосходит остальные, либо все компоненты тензора напряжений изменяются во времени пропорционально, оценка нагруженности при сложном НДС может производиться таким же образом, как и при одноосном напряженном состоянии. При этом в качестве расчетного напряжения выбирается величина, позволяющая наиболее точно охарактеризовать условия нагружения и особенности сопротивления усталости объекта исследования.

Модуль **UM Durability** позволяет производить оценку нагруженности по следующим расчетным величинам:

- Максимальные по модулю главные напряжения

Принимается, что повреждения наносят как максимальные растягивающие, так и максимальные сжимающие напряжения.

- Максимальные главные напряжения

Расчет ведется по первому (максимальному) главному напряжению. Применяется для расчета сварных соединений, поскольку основной вклад в усталостное повреждение в этом случае вносят растягивающие напряжения.

- Эквивалентные фон Мизеса по главным напряжениям

Расчет ведется по эквивалентным напряжениям, рассчитанным по главным с использованием формулы Мизеса (1.2):

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \quad (1.2)$$

- Эквивалентные фон Мизеса по компонентам напряжения

Расчет ведется по эквивалентным напряжениям, рассчитанным по компонентам тензора с использованием формулы Мизеса (1.3):

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot ((\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 6 \cdot (\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{xz}^2))} \quad (1.3)$$

### 1.2.1.2. Схематизация процесса нагружения

Для выполнения расчетов на усталостную долговечность используются результаты статистической обработки процесса нагружения. Рассчитанная история изменения расчетного напряжения схематизируется и представляется в виде последовательности циклов регулярного нагружения с фиксированными параметрами.

Процедура схематизации включает следующие операции:

Выделение экстремумов процесса нагружения

Процесс изменения расчетного напряжения описывается последовательностью значений, фиксирующихся с некоторым шагом по времени в процессе моделирования, см. рис. 1.2.

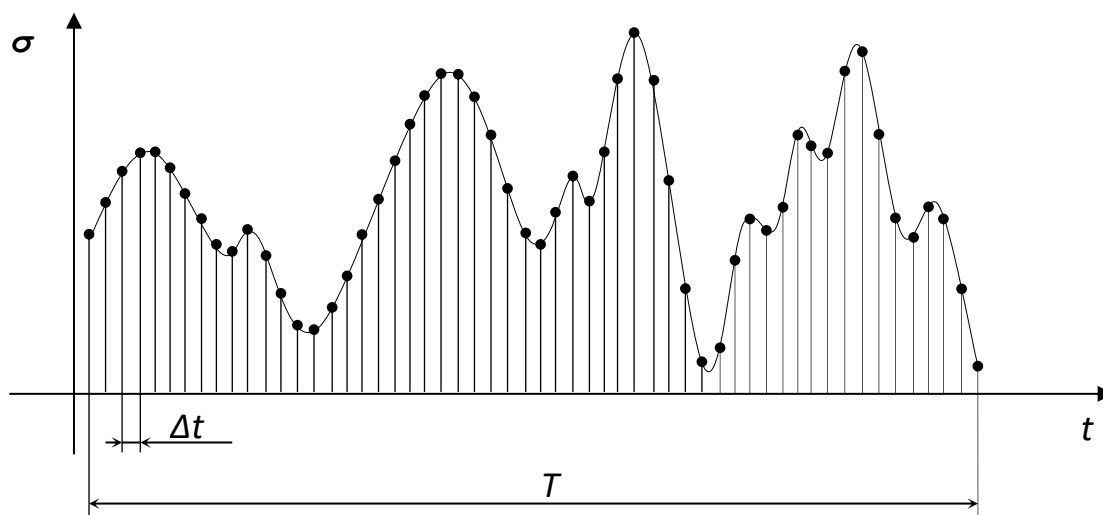


Рис. 1.2. История изменения напряжения

Для выделения максимумов используется следующее правило. Последовательность ординат процесса просматривается (по три соседних значения). При выполнении условия  $\sigma_{j-1} < \sigma_j \geq \sigma_{j+1}$  точка процесса с ординатой  $\sigma_j$  принимается в качестве максимума.

Для выделения минимумов используется аналогичное правило. При выполнении условия  $\sigma_{j-1} > \sigma_j \leq \sigma_{j+1}$  точка с ординатой  $\sigma_j$  принимается в качестве минимума.

- Двухпараметрическая схематизация процесса

Схематизированный процесс представляет собой совокупность выделенных по методу дождя полуциклов нагружения. Для каждого полуцикла фиксируется амплитуда и среднее значение.

Процедура схематизации процесса нагружения по методу дождя приведена на рис. 1.3. При схематизации удобно представить, что ось времени направлена вертикально вниз. Пусть линии, соединяющие соседние экстремумы – это последовательность плоскостей, по которым стекают потоки воды.

Траектории потоков определяют в соответствии со следующими правилами:

- Потоки начинаются с внутренней стороны экстремумов последовательно. Каждый поток определяет полуцикл нагружения. Величину размаха определяют проекцией траектории потока на ось напряжений.
- Поток, начавшийся в точке максимума, прерывается в тот момент, когда встречается максимум, больший, чем исходный. Например, поток из максимума 1 стекает по направлению к минимуму 2 и прерывается напротив максимума 3, поскольку он больше исходного.
- Поток, начавшийся в точке минимума, прерывается в тот момент, когда встречается минимум, меньший, чем исходный. Например, поток из минимума 10 прерывается напротив минимума 16, поскольку минимум 16 меньше исходного.
- При встрече на одной из плоскостей нескольких потоков движение продолжает тот, который берет начало в экстремуме с меньшим номером, а остальные прерываются. Например, поток из точки 5 продолжает свой путь, а потоки из точек 7 и 9 прерываются.
- Поток, не встретивший препятствий, падает на землю и прерывается, например поток из точки 19.

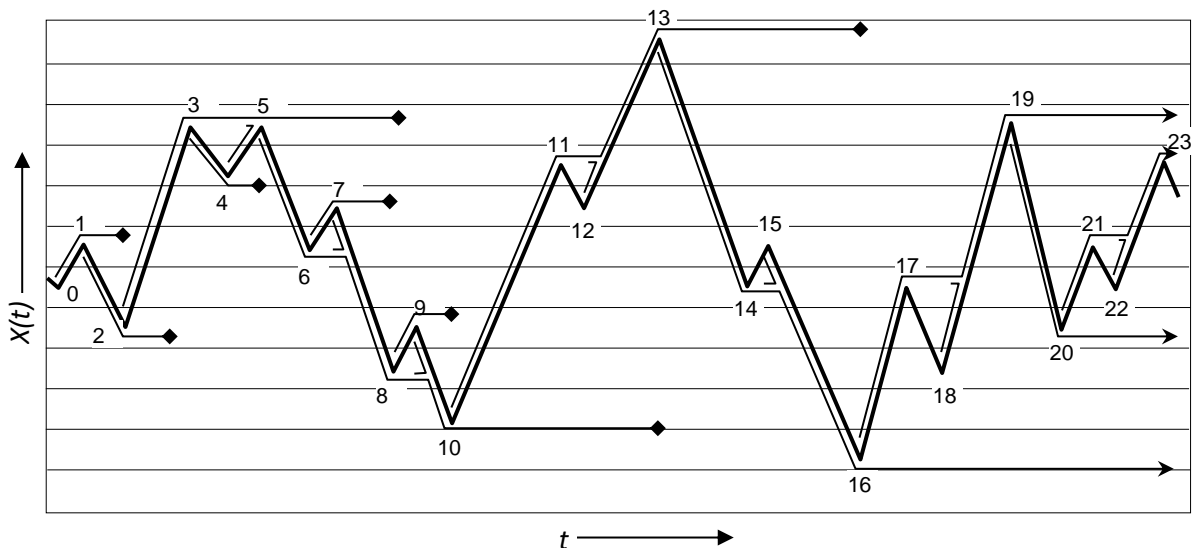


Рис. 1.3. Схема выделения полуциклов нагружения по методу дождя

### 1.2.1.3. Частные блоки нагружения

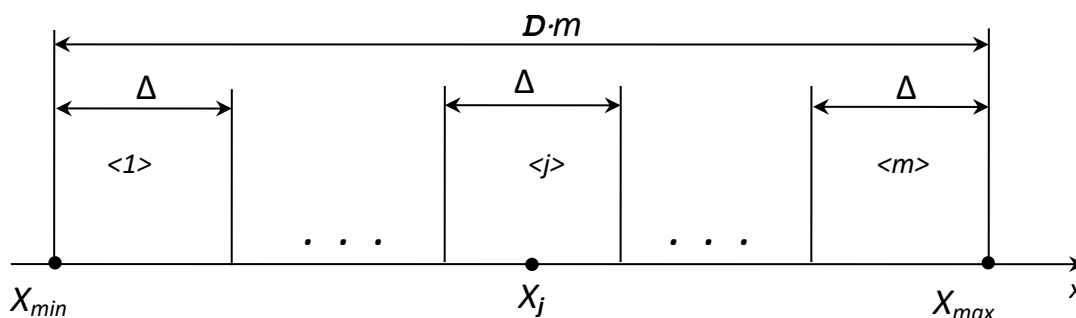
Полученная в ходе схематизации совокупность амплитуд и средних значений полуциклов нагружения подвергается статистической обработке. Для представления нагруженности в программе **UM Durability** используются однопараметрические и двухпараметрические распределения параметров нагружения – *блоки нагружения*.

#### Основные положения

Согласно ГОСТ 25.101-83, количество интервалов должно удовлетворять неравенству  $14 \leq m \leq 32$ .

Нумерация интервалов производится в направлении возрастания величины. Если полученная величина попадает на границу интервала, то ее относят к интервалу с большим номером.

Распределение строится таким образом, что максимальное значение является центральным значением последнего интервала блока, а минимальное – центральным значением первого интервала блока.



- $X_{min}$  – минимальное значение величины,
- $X_{max}$  – максимальное значение величины,
- $D$  – ширина интервала блока,
- $\langle j \rangle$  – номер интервала,
- $X_j$  – представительное значение интервала.

#### Формирование блоков нагружения

В программе реализовано два алгоритма формирования блоков нагружения.

- Построение блоков нагружения с использованием автоматического определения ширины интервала блока

Ширина блока определяется как отношение разности максимального и минимального значения выборки к величине на единицу меньшей заданного числа интервалов блока.

Диапазон изменения величины  $a_{max} = X_{max} - X_{min}$  равномерно разбивается на интервалы шириной  $\Delta = \frac{a_{max}}{m}$ .

- Построение блоков нагружения с использованием заданной пользователем ширины интервала блока

Центральные значения интервалов блока отстоят от нуля на расстояния кратные ширине интервала.

Если разброс между минимальным и максимальным значением превышает ширину блока (определяемую по заданным параметрам  $a = \Delta \cdot m$ ), то значения меньше нижней границы блока относятся к первому интервалу.

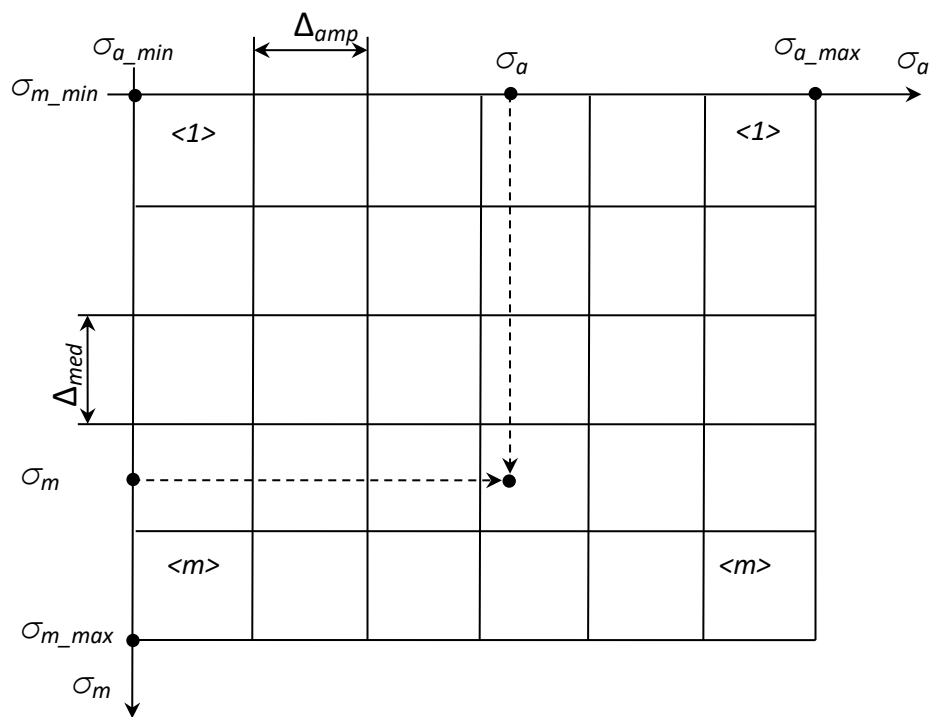
Представление результатов

В программе UM Durability используются следующие способы представления результатов двухпараметрической схематизации:

- Корреляционная таблица амплитуд и средних значений

Каждая ячейка таблицы соответствует интервалу значений параметров нагружения (амплитуд  $\sigma_a$  и медиан  $\sigma_m$  полуциклов). Строки соответствуют интервалам по средним значениям, а столбцы – по амплитудам полуциклов нагружения.

В ячейках таблицы, соответствующих интервалам по амплитудам и средним значениям полуциклов нагружения, отображаются относительные доли числа циклов, параметры которых позволяют отнести их к тому или иному интервалу.



- Распределение приведенных амплитуд

Для учета влияния асимметрии цикла нагружения при определении характеристик сопротивления усталости элементов машин и конструкций применяют два подхода.

- Первый из них используется для регулярных процессов нагружения. Характеристики сопротивления усталости определяются по диаграммам предельных амплитуд, а нагруженность описывается распределением амплитуд циклов.
- Второй подход заключается в формировании однопараметрических распределений *приведенных амплитуд* – амплитуд симметричного цикла, приводящего к усталостным повреждениям эквивалентным повреждениям для несимметричного цикла. Приведение амплитуд применяется при положительных значениях средних напряжений цикла. Принимается, что сжимающие напряжения не приводят к изменению свойств сопротивления усталости.

Методики методик расчета усталостной долговечности, реализованных в UM Durability, используют в качестве исходных данных по нагруженности однопараметрические распределения приведенных амплитуд.

В программе реализовано вычисление приведенных амплитуд в соответствии со следующими описаниями диаграмм предельных амплитуд:

- *Модель Кинасошвилли*

Формула для вычисления приведенной амплитуды:

$$\sigma_{a_{np}} = \sigma_a + \psi \cdot \sigma_m, \text{ где}$$

$\psi$  – коэффициент чувствительности к асимметрии цикла нагружения.

- *Модель Зодерберга*

Формула для вычисления приведенной амплитуды:

$$\sigma_{a_{np}} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_T}\right)\right)}, \text{ где}$$

$\sigma_T$  – предел текучести материала при растяжении.

- *Модель Гербера*

Формула для вычисления приведенной амплитуды:

$$\sigma_{a_{np}} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B}\right)^2\right)}, \text{ где}$$

$\sigma_B$  – предел прочности материала при растяжении.

- *Модель Гудмана*

Формула для вычисления приведенной амплитуды:

$$\sigma_{a_{np}} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B}\right)\right)}.$$

*Распределение приведенных амплитуд* строится на основании корреляционной таблицы амплитуд и средних значений по следующему алгоритму.

- Для каждой ячейки, содержащей ненулевую относительную долю циклов нагружения, вычисляются наибольшие и наименьшие значения медианы и амплитуды.
- Для полученных крайних значений рассчитываются величины приведенных амплитуд циклов нагружения. Полученный набор интервалов приведенных амплитуд является взвешенной выборкой, поскольку каждому интервалу соответствует относительная доля циклов нагружения блока.
- На основании взвешенной выборки строится распределение приведенных амплитуд.

При обработке учитываются остаточные/температурные напряжения, величина которых добавляется к медианным значениям.

При задании *нижнего предела повреждающих амплитуд симметричного нагружения*  $\sigma_a^{lim}$ , циклы, значения приведенных амплитуд которых меньше указанной величины, не учитываются.

#### 1.2.1.4. Эксплуатационная нагруженность. Смешанный блок нагружения

Под эксплуатационной понимается нагруженность, описываемая набором (два и более) частных режимов работы. Для частных режимов строятся распределения параметров нагружения (частные блоки).

На основании этих данных на первом этапе расчета усталостной долговечности (см. далее п. 1.3. "Оценка показателей усталостной долговечности", с. 1-46) производится оценка эксплуатационной нагруженности – строится *смешанный блок нагружения*.

Способы построения смешанного блока соответствуют способам формирования частных блоков.

Рассмотрим процедуру формирования однопараметрического распределения приведенных амплитуд эксплуатационного нагружения при включенной опции автоопределения ширины интервала частных блоков.

Введем следующие обозначения:

- ЧБН<k> – блок нагружения, построенный по результатам обработки характерной реализации k-ого рабочего режима;
- $C^{<k>}$  – относительная доля k-ого рабочего режима во времени эксплуатации объекта, либо в пробеге за единицу срока службы;
- СБН – смешанный блок нагружения, характеризующий распределение параметров эксплуатационного нагружения;
- $\sigma_i^{<k>}$  – характерное значение i-ого интервала распределения приведенных амплитуд ЧБН<k>;
- $\sigma_i^{<СБН>}$  – характерное значение i-ого интервала распределения приведенных амплитуд СБН;
- $t_i^{<k>}$  – относительная доля циклов нагружения, параметры которых позволяют отнести их к i-ому интервалу распределения приведенных амплитуд ЧБН<k>;
- $t_i^{<СБН>}$  – относительная доля циклов нагружения, параметры которых позволяют отнести их к i-ому интервалу распределения приведенных амплитуд СБН;
- $\Delta^{<СБН>}$  – ширина интервала СБН;
- $\sigma_{min}^{<k>}, \sigma_{max}^{<k>}$  – минимальная и максимальная приведенная амплитуда ЧБН<k>;
- $\sigma_{min}^{<СБН>}, \sigma_{max}^{<СБН>}$  – минимальная и максимальная приведенная амплитуда СБН.

Границы распределения СБН  $\sigma_{min}^{<СБН>}, \sigma_{max}^{<СБН>}$  определяются соответственно как максимальное и минимальное значение из  $\sigma_{min}^{<k>}, \sigma_{max}^{<k>}$ .

Учет нижней границы повреждающих амплитуд производится на стадии формирования частных блоков нагружения. Таким образом, значение  $\sigma_{min}^{<СБН>}$  автоматически удовлетворяет условию:  $\sigma_{min}^{<СБН>} \geq \sigma_a^{lim}$ .

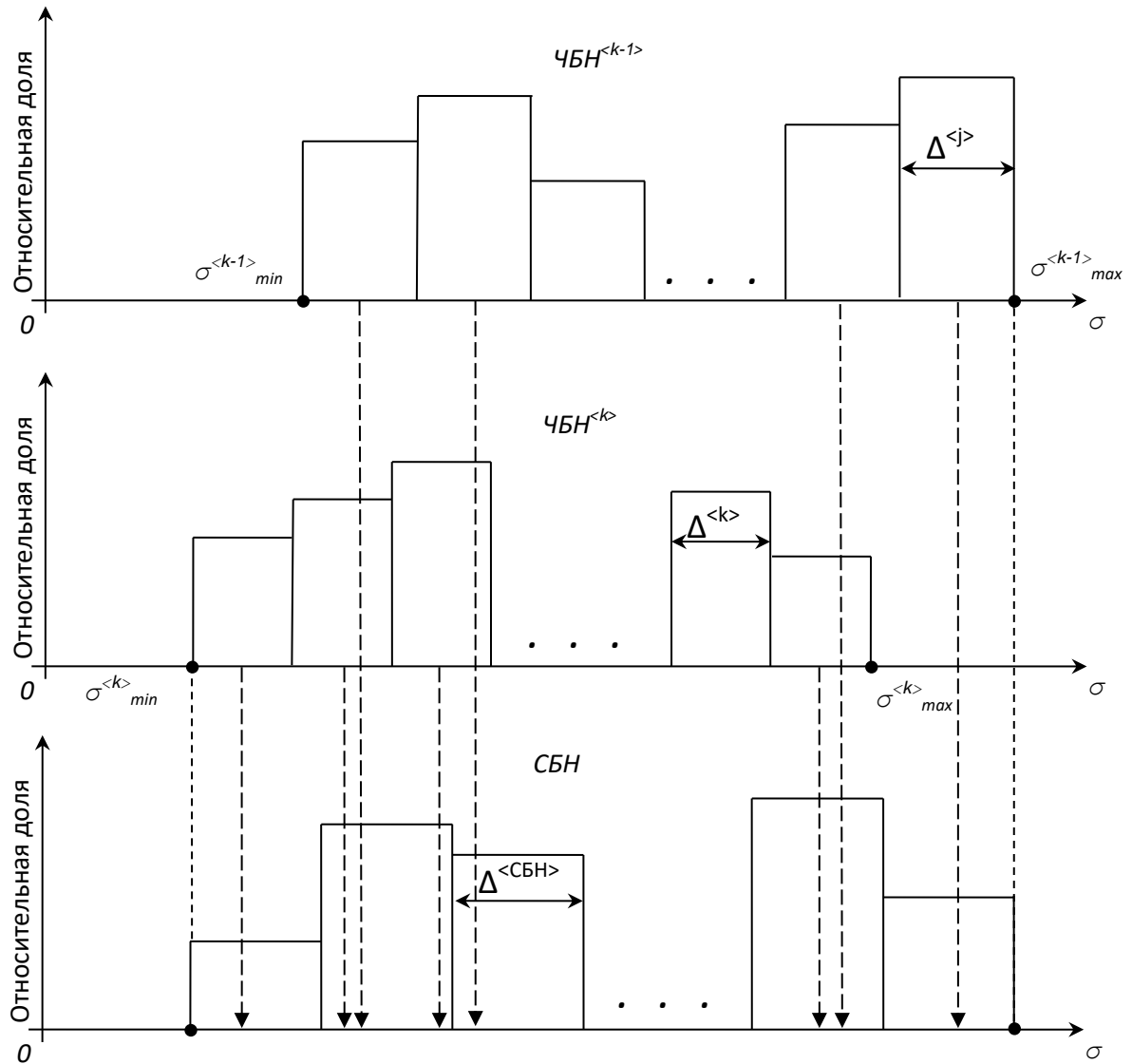
Ширина интервала СБН рассчитывается по формуле

$$\Delta^{<СБН>} = \frac{\sigma_{max}^{<СБН>} - \sigma_{min}^{<СБН>}}{m}.$$

Характерные значения интервалов ЧБН распределяются по интервалам СБН. При попадании значения  $i$ -ого интервала ЧБН<sup><k></sup> в  $j$ -ый интервал СБН

$$j = \frac{(\sigma_i^{<k>} - \sigma_{min}^{<СБН>})}{\Delta^{<СБН>}}$$

в  $j$ -ый интервал СБН добавляется вклад, соответствующий  $i$ -ому интервалу ЧБН<sup><k></sup>



### 1.2.1.5. Приведение результатов схематизации к единицам срока службы

По результатам схематизации процесса строится распределение параметров нагружения и фиксируется число циклов в реализации.

Для расчета усталостной долговечности необходимо привести полученное число циклов нагружения к единице срока службы.

В программе UM Durability используется приведение к следующим единицам:

- *Приведение к секунде работы*

Пусть,  $CycleCount_{real}^{<k>}$  – число циклов нагружения, выделенных в ходе схематизации реализации  $i$ -ого режима.

Тогда, число циклов за секунду рассчитывается по формуле

$$CycleCount_{sec}^{<k>} = \frac{CycleCount_{real}^{<k>}}{t_2^{<k>} - t_1^{<k>}}, \text{ где}$$

$t_1^{<k>}, t_2^{<k>}$  – моменты начала и конца реализации, соответствующей  $k$ -ому режиму работы, см. далее п. 1.2.2.4. "Задание границ реализаций режимов по времени", с. 1-30.

В этом случае число циклов эксплуатационного нагружения за секунду движения определяется на основании значений числа циклов за секунду частных режимов по формуле

$$CycleCount_{sec}^{<СБН>} = \sum_{k=1} C^{<k>} \cdot CycleCount_{sec}^{<k>}, \text{ где}$$

$C^{<k>}$  – относительная доля  $k$ -ого рабочего режима во времени эксплуатации объекта.

- *Приведение к километру пройденного пути*

Число циклов на километр пробега рассчитывается по формуле

$$\text{ЧислоЦиклов}_{\text{км}}^{<k>} = \frac{\text{ЧислоЦиклов}_{\text{реализация}}^{<k>}}{L^{<k>} \cdot 10^{-3}}, \text{ где}$$

$L^{<k>}$  – величина пробега (в метрах) для реализации, соответствующей  $k$ -ому режиму работы, см. далее п. 1.2.4.1. "Общие настройки", с. 1-35.

В этом случае число циклов эксплуатационного нагружения за километр пробега определяется на основании значений числа циклов на 1 километр пути, пройденного в частных режимах по формуле

$$\text{ЧислоЦиклов}_{\text{км}}^{<СБН>} = \sum_{k=1} C^{<k>} \cdot \text{ЧислоЦиклов}_{\text{км}}^{<k>}, \text{ где}$$

$C^{<k>}$  – относительная доля  $k$ -ого режима движения в пробеге за единицу срока службы.

- *Приведение к условной единице*

Пользователь может задать собственную единицу приведения числа циклов нагружения. Эта возможность реализована в S-N и локомотивной методиках расчета усталостной долговечности.

В этом случае необходимо задать число повторений каждой из реализаций, характеризующих отдельный режим, за принятую условную единицу срока службы. Значения  $C^{<k>}$  не используются.

Число циклов эксплуатационного нагружения за одну условную единицу определяется на основании значений для частных режимов по формуле

$$\text{ЧислоЦиклов}_R^{<СБН>} = \sum_{k=1} R^{<k>} \cdot \text{ЧислоЦиклов}_R^{<k>}, \text{ где}$$

$R^{<k>}$  – число повторений реализации, представляющей  $k$ -ый режим движения, за единицу срока службы (задается пользователем, см. описание соответствующих методик).

## 1.2.2. Подготовка исходных данных

Исходными данными для анализа нагруженности являются истории изменения напряженно-деформированного состояния элементов конструкции.

Для формирования истории изменения НДС исследуемая деталь должна быть представлена упругой подсистемой. По результатам моделирования динамики гибридной системы, содержащей как абсолютно твердые, так и упругие тела, автоматически создаются следующие файлы:


<Имя упругой подсистемы>.imc – бинарный файл, содержащий истории изменения модальных координат упругих подсистем.

<Имя упругой подсистемы>.tmc – текстовый файл, содержащий заголовочную информацию, необходимую для работы с файлом \*.imc. Файлы данного типа, как будет описано далее, используются для задания режимов эксплуатации объекта.

В настоящей версии программы файлы модальных координат создаются вместе с файлами переменных, подробнее см. п. 4.3.3. *Список переменных*. Идея заключается в том, что список переменных сохраняет информацию о динамических переменных, а файлы модальных координат служат для получения напряжений и деформаций. Таким образом, этот набор файлов позволяет хранить максимально полный набор результатов моделирования.<sup>1</sup>

Данные, содержащиеся в файлах \*.imc, \*.tmc и input.fss (файл упругой подсистемы), позволяют рассчитать истории изменения тензора напряжений в узлах конечно-элементной модели тела.

### Подготовка файлов модальных координат вручную

Загрузите гибридную модель для анализа в программу **UM Simulation**. В **Инспекторе моделирования объекта** перейдите на закладку **Подсистемы МКЭ | Моделирование | Настройки**. Включите галочку **Сохранять значения модельных координат**, выберите **Место сохранения – Файл** и введите имя файла (см. также раздел 11.5.2.1 [Главы 11](#) Руководства пользователя). Имя файла по умолчанию, включая полный путь к нему, можно задать, нажав клавиши **Ctrl+ENTER** клавиатуры, либо кнопкой  на форме. Каталог хранения файла по умолчанию является каталог упругой подсистемы.

Настройте остальные параметры для данного расчета и запустите моделирование. По окончании моделирования будут созданы два файла: *ИмяФайла.imc*, *ИмяФайла.tmc*. В файлах \*.imc и \*.tmc будут сохранены записи модальных координат модели. Далее эти

---

<sup>1</sup> Переменные, соответствующие модальным координатам и напряжениям в узлах упругих тел можно сформировать в Мастере переменных (см. п. 4.3.2) и сохранить в список переменных. Вместе с тем модуль расчета долговечности в настоящей версии в качестве входных параметров принимает только *imc/tmc* файлы, а реализации напряжений в узлах автоматически рассчитываются по модальным координатам и матрицам перехода от модальных координат к напряжениям в узлах, содержащихся в файлах *input.fss*. Прием в качестве входных параметров только файла модальных координат для всего упругого тела позволяет отказаться от ввода историй изменения напряжений в каждом узле, которых в упругом теле может насчитываться тысячи и десятки тысяч.

модальные координаты подаются на вход в Мастер расчета долговечности, см. п. 1.2.2.1. "Описание режимов нагружения", с. 1-24.

#### Подготовка файлов модальных координат в проекте сканирования

Опишите проект сканирования с моделью, для которой хотите провести расчет долговечности. Желательно описать проект сканирования таким образом, чтобы каждый численный эксперимент представлял собой моделирование частного блока нагружения, это упростит передачу данных в проект расчета долговечности. Выполните проект сканирования. Перейдите на закладку Результаты | Долговечность. В списке выберите упругую подсистему для анализа долговечности и нажмите кнопку Экспорт данных, см. рис. 1.4. Будет открыт Мастер расчета долговечности, в котором будет инициализирован список режимов нагружения. В случае, когда список режимов нагружения насчитывает десятки и сотни вариантов, гораздо удобнее при подготовке данных пользоваться проектом сканирования, чем проводить все необходимые численные эксперименты вручную.

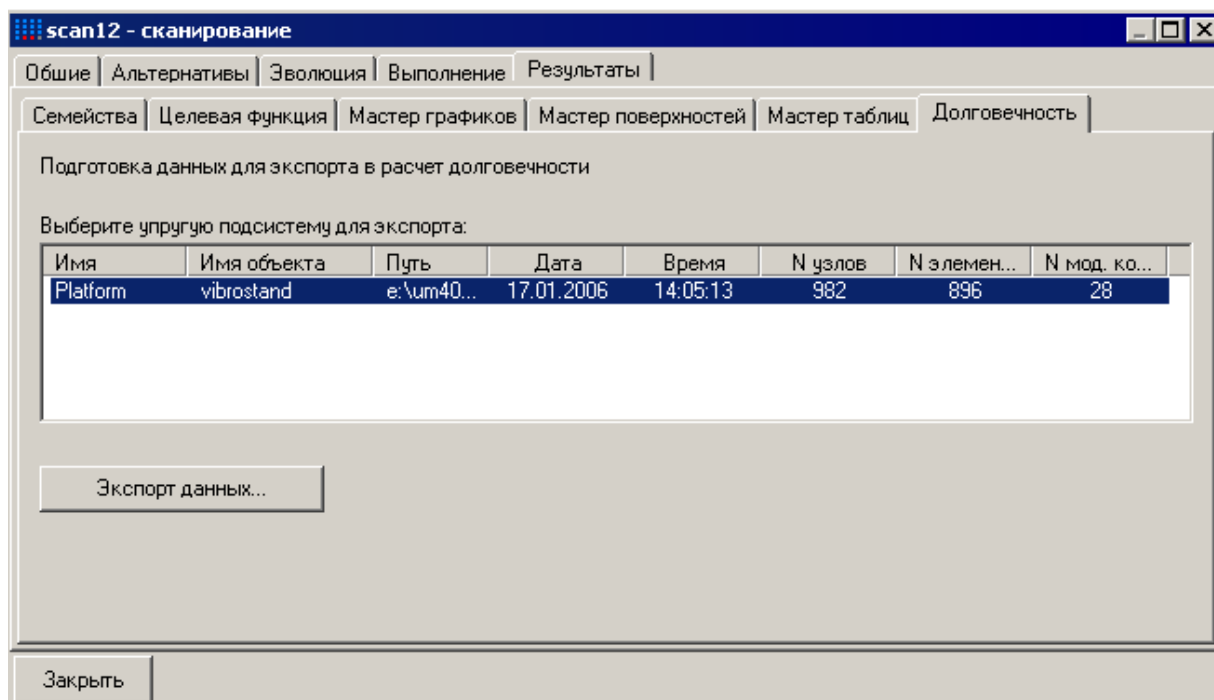
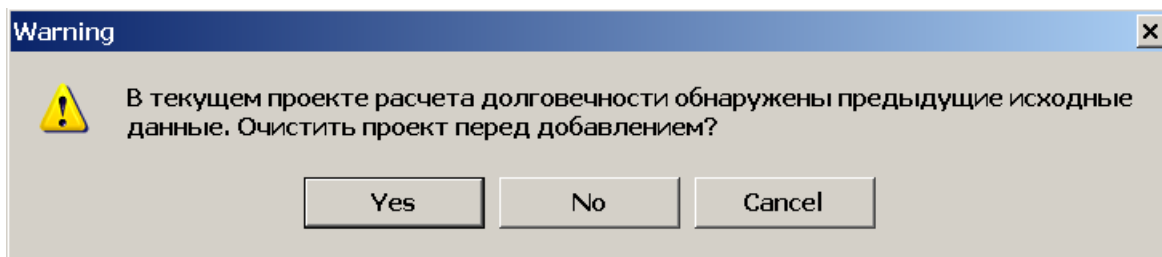


Рис. 1.4. Сканирование: экспорт результатов для расчета долговечности

Если в Мастере расчета долговечности открыт другой проект, на экран выводится соответствующее сообщение.



При выборе опции «Да» текущий проект расчета долговечности удаляется и по результатам многовариантного расчета создается новый проект.

Для достоверного описания нагруженности условия численного эксперимента должны быть максимально приближены к эксплуатационным и являться статистически достоверными. Например, требования, заложенные в ГОСТ 25.101-83, предписывают, выбирать длину реализации процесса изменения напряжений таким образом, чтобы в ней содержалось не менее 1000 экстремумов.

В большинстве случаев нельзя описать условия эксплуатации одним режимом работы. Модуль **UM Durability** позволяет моделировать эксплуатационный режим набором *частных режимов*, которые в некоторых *относительных* долях входят в общий режим эксплуатации.

### 1.2.2.1. Описание режимов нагружения

Редактирование списка частных режимов нагружения осуществляется на закладке Исходные данные | Режимы нагружения.

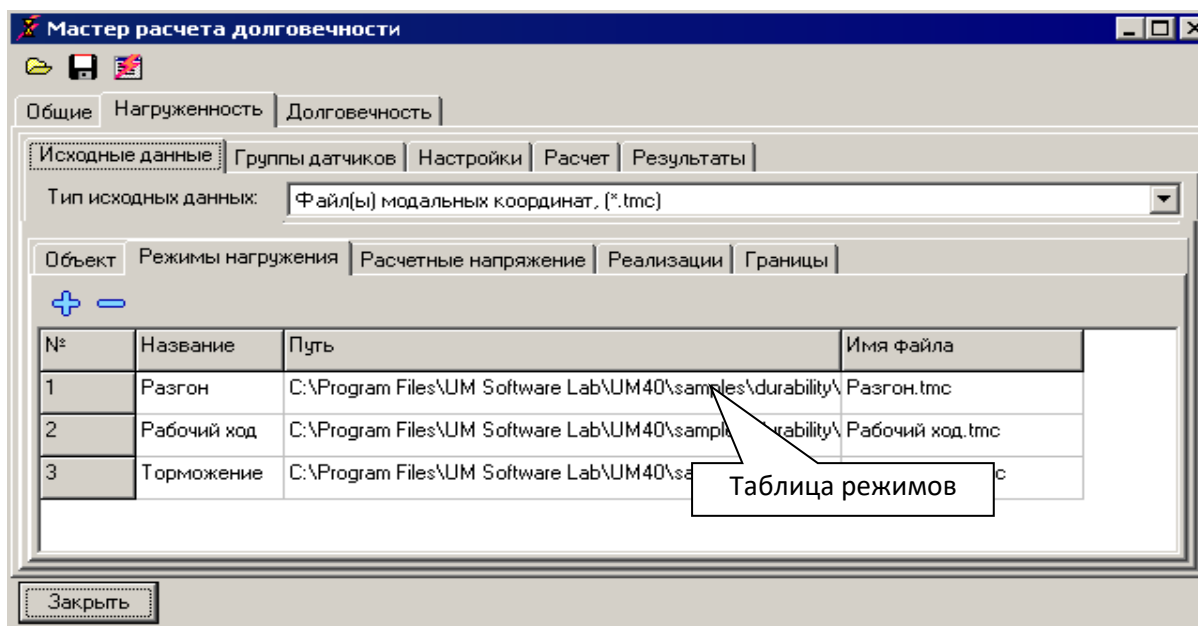
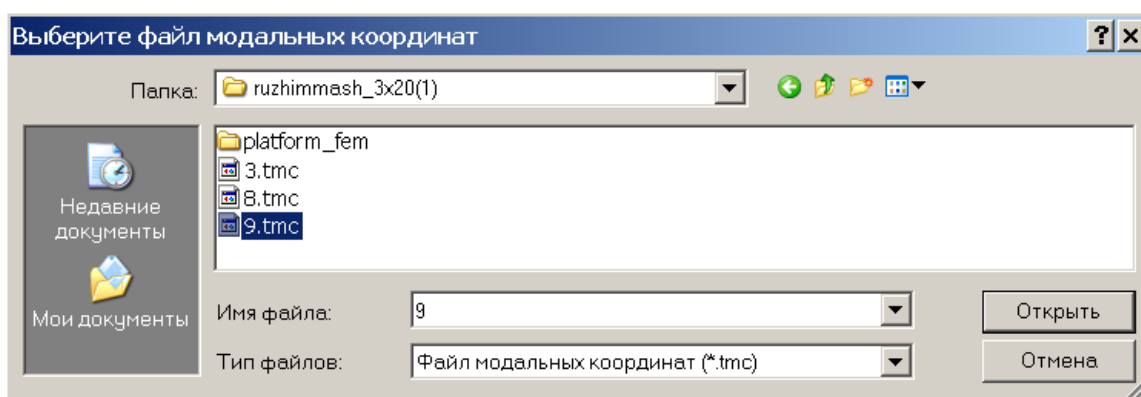


Рис. 1.5. Режимы нагружения

Закладка содержит следующие элементы управления:

- «Добавить режим нагружения» В открывшемся окне необходимо выбрать файл \*.tmc, созданный по результатам моделирования динамики исследуемого упругого тела.



Если выбранный файл (\*.tmc) сформирован по результатам моделирования гибридной системы, содержащей несколько упругих подсистем, открывается окно позволяющее сделать соответствующий выбор.

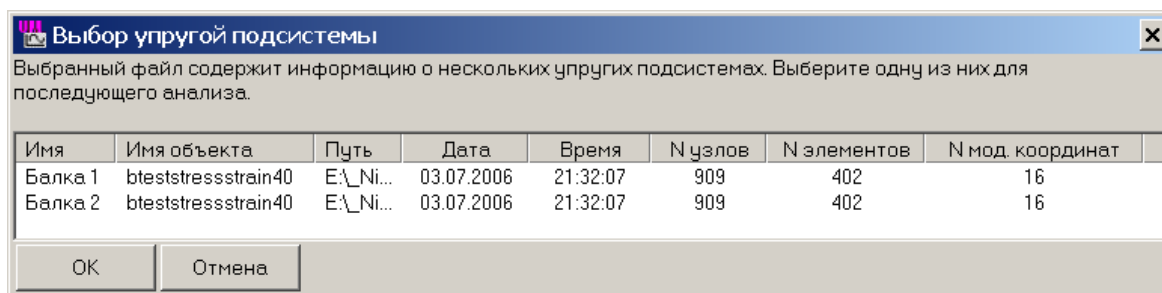


Рис. 1.6. Выбор упругой подсистемы

Если хотя бы один режим нагружения определен (в таблице режимов заполнена хотя бы одна строка), то все добавляемые файлы проверяются на идентичность упругих подсистем. Если выбранный файл содержит ссылку на упругое тело, отличное от тела, указанного в ранее добавленных файлах, на экран выводится соответствующее сообщение:

Если в данной ситуации добавляемый файл содержит данные для нескольких упругих подсистем, то выбор производится автоматически.

Если путь к выбранному файлу не может быть определен относительно текущего рабочего каталога, на экран будет выведен запрос на смену рабочего каталога.

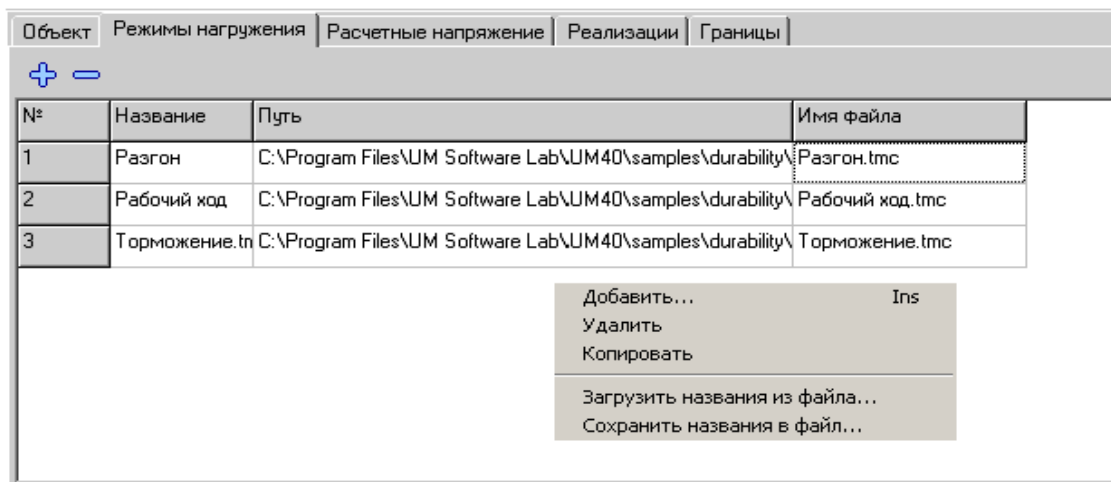
В случае успешного добавления режима в новой строке таблицы отображается следующая информация:

**№** – номер режима нагружения в списке;

**Название** – название добавленного режима (может быть скорректировано пользователем);

**Путь** – путь к файлу с описанием добавленного режима;

**Имя файла** – имя .tmc файла с описанием режима.



*Контекстное меню таблицы* позволяет добавлять и удалять режимы, сохранять в текстовые файлы их названия и множители, а также загружать названия и множители режимов из текстовых файлов.

- **«Удалить режим нагружения»** Удаляется режим, соответствующий выделенной строке **Таблицы режимов**.

### 1.2.2.2. Выбор расчетных напряжений

Модели накопления усталостных повреждений при многоцикловой усталости позволяют оценивать показатели долговечности при одноосном напряженно-деформированном состоянии детали. В то же время, материал большинства конструкций в ходе эксплуатации испытывает плоское или объемное напряженное состояние.

Закладка **Группа узлов | Расчетное напряжение** позволяет выбрать способ приведения тензора напряжений, рассчитанного в узле детали, к одноосному напряженному состоянию, см. рис. 1.7.

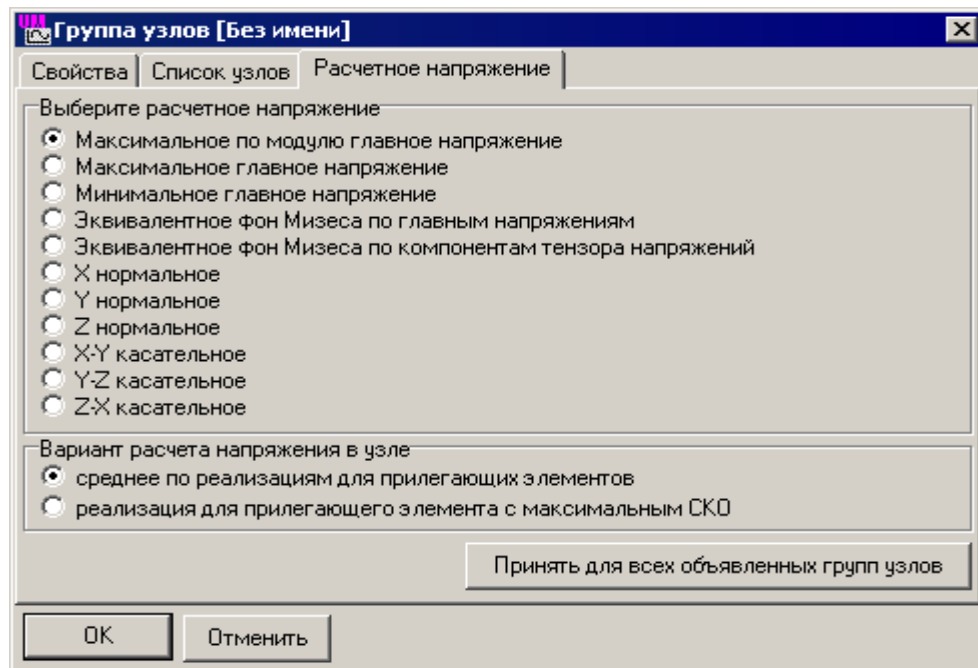


Рис. 1.7. Выбор расчетного напряжения

В качестве расчетного  $\sigma_{расч}$  может быть принято:

*Максимальное по модулю главное напряжение*

$$\sigma_{расч} = |\sigma_1|, \text{ при } |\sigma_1| \geq |\sigma_3|$$

$$\sigma_{расч} = |\sigma_3|, \text{ при } |\sigma_1| < |\sigma_3|$$

*Максимальное главное напряжение:*  $\sigma_{расч} = \sigma_1$

*Минимальное главное напряжение:*  $\sigma_{расч} = \sigma_3$

*Эквивалентное фон Мизеса по главным напряжениям*

$$\sigma_{расч} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]}$$

*Эквивалентное фон Мизеса по компонентам тензора напряжений*

$$\sigma_{расч} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot ((\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 6 \cdot (\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2))}$$

*Компонента тензора напряжений* (например,  $\sigma_x$  в СК подсистемы)

$$\sigma_{\text{расч}} = \sigma_x$$

### 1.2.2.3. Просмотр реализаций напряжений в узлах

Для просмотра реализаций напряжений в узлах конечно-элементной модели упругого тела для частных режимов эксплуатации, на закладке **Исходные данные | Реализации** создан соответствующий интерфейс.

Для построения реализации необходимо выбрать *напряжение*, *режим нагружения* и указать *номер узла*.

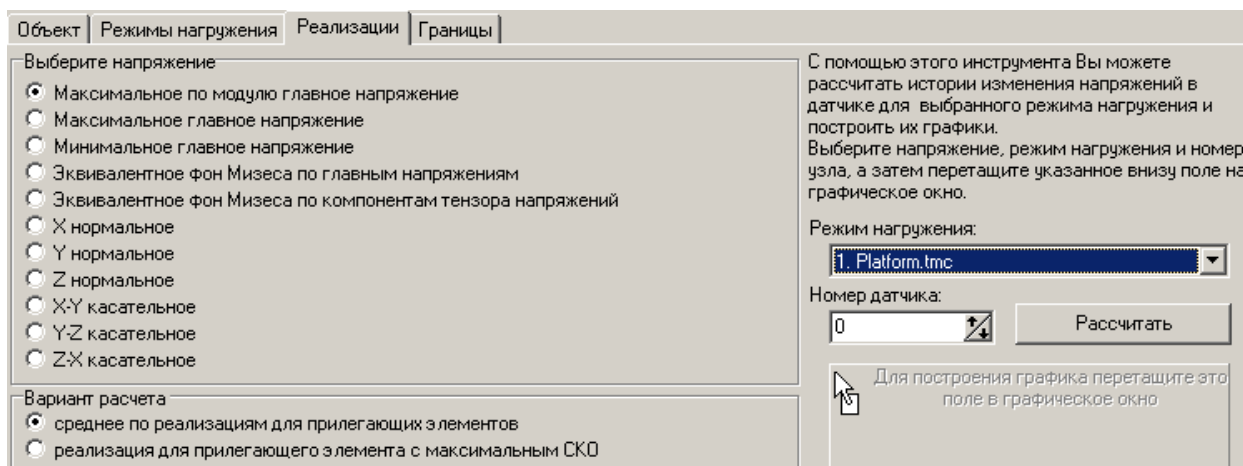
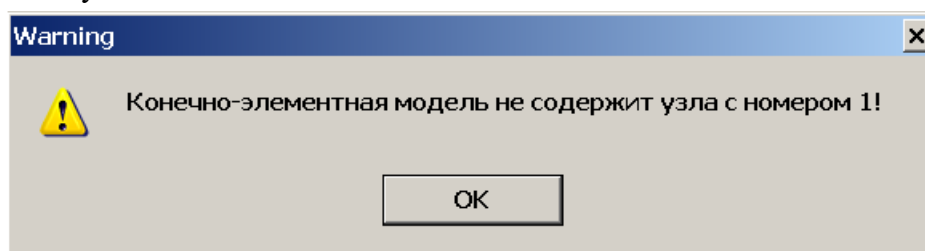


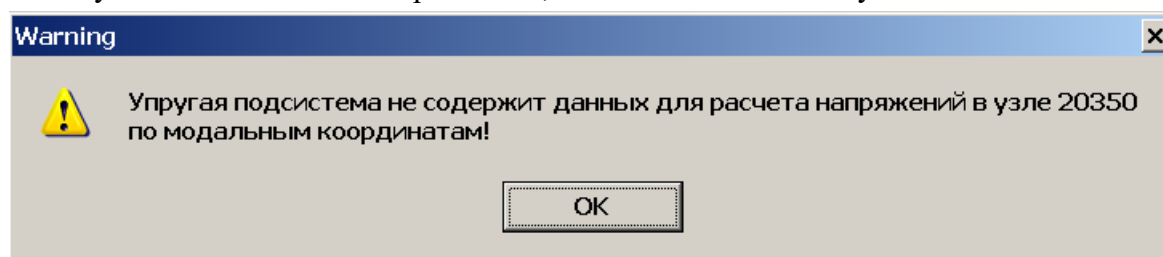
Рис. 1.8. Построение реализации напряжения в узле


При нажатии на кнопку «**Рассчитать**» происходит чтение \*.imc файла, соответствующего выбранному режиму, и расчет истории изменения выбранного напряжения в узле.

Если конечно-элементная модель упругого тела не содержит указанного узла, выводится соответствующее сообщение.



Если файл упругой подсистемы не содержит данных для расчета напряжений в выбранном узле по модальным координатам, выводится соответствующее сообщение.



Для построения графика рассчитанной реализации необходимо открыть стандартное графическое окно и перетащить на него поле, помеченное значком . Полученная реали-

зация является стандартной переменной и может быть использована также для расчета статистики, либо в процессоре переменных.

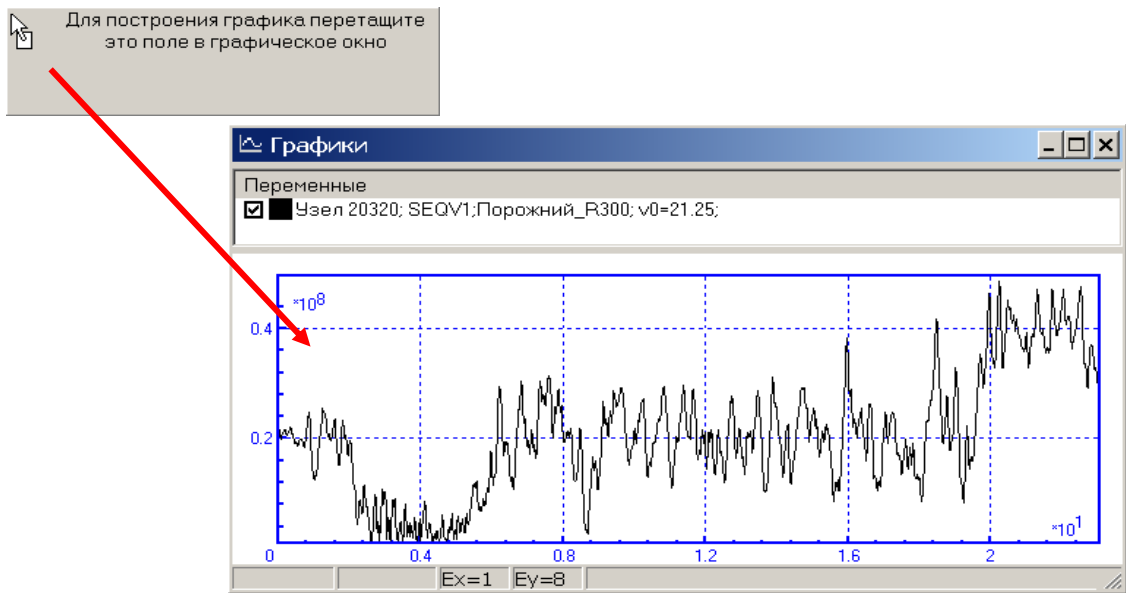


Рис. 1.9. Осциллограмма напряжения в узле

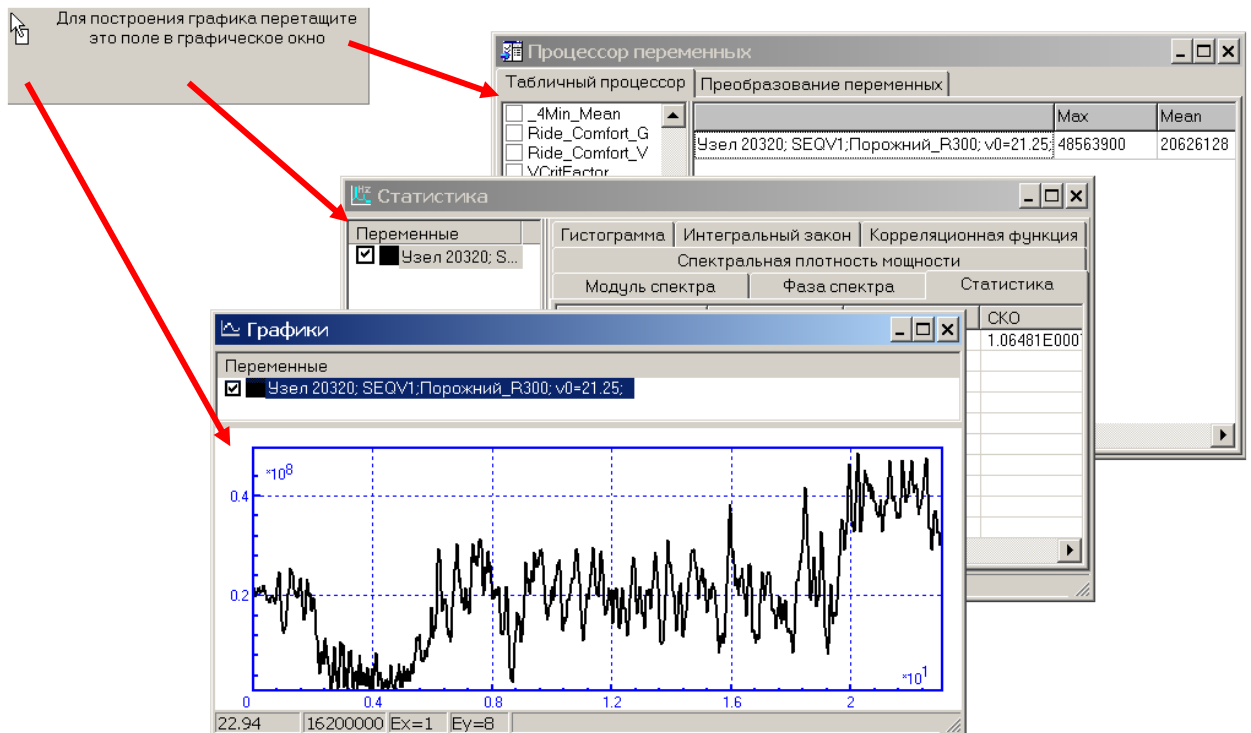
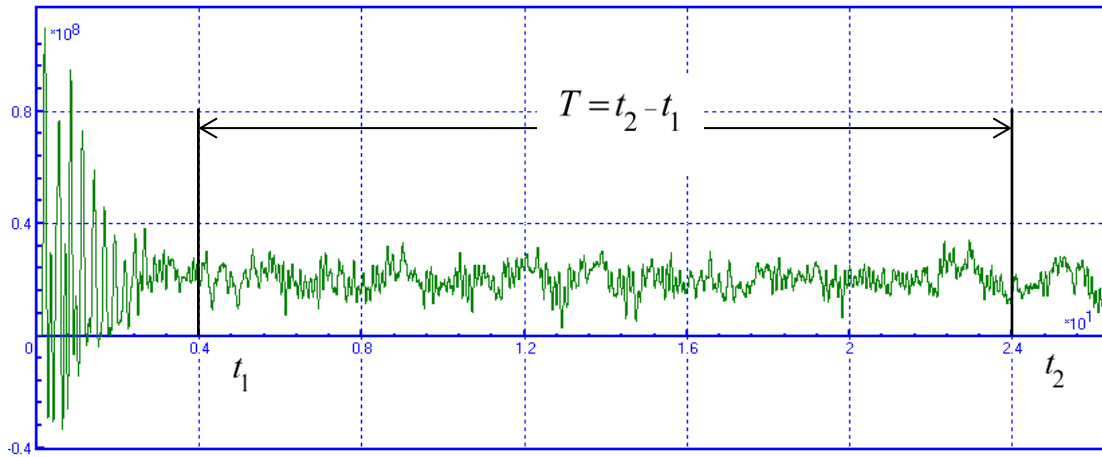


Рис. 1.10. Использование стандартных инструментов для анализа графика напряжения

### 1.2.2.4. Задание границ реализаций режимов по времени

Файл \*.imc содержит последовательность значений модальных координат упругой подсистемы, рассчитанных в процессе моделирования.

В качестве реализации, характеризующей режим нагружения, может быть выбрана часть истории изменения напряжений, ограниченная моментами времени  $t_1$  и  $t_2$ .



Примерами использования этой опции могут служить:

- отсечение начала реализации, содержащей переходный процесс, если режим характеризует установившийся режим работы;
- отсечение окончания реализации, соответствующей установившемуся процессу, если режим характеризует переходный процесс (например, режим пуска) и пр.

**Замечание.** Длина реализации по времени  $T = t_2 - t_1$  используется при расчете числа циклов нагружения, возникающих за 1 сек работы. Эта величина играет существенную роль при расчете показателей долговечности.

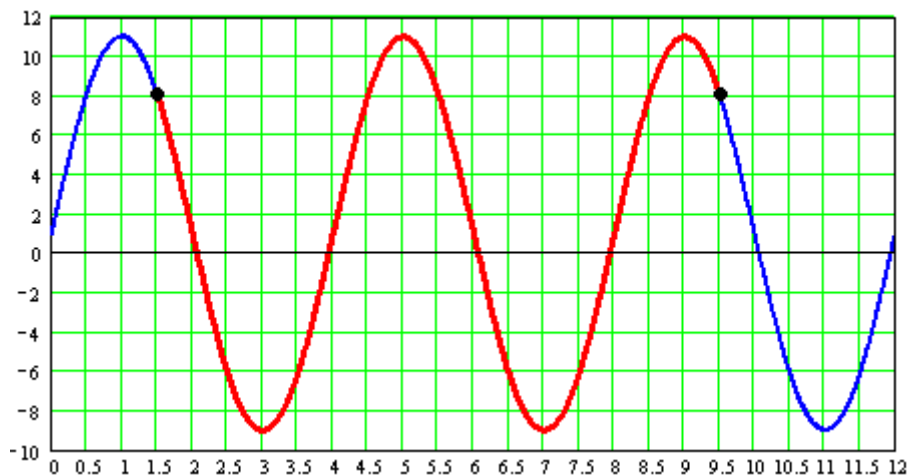
Для задания границ реализаций, характеризующих режимы работы, используется закладка **Исходные данные | Границы**. Задание границ происходит в полях таблицы.

Объект	Режимы нагружения	Реализации	Границы
№	Название	Левая граница, с	Правая граница, с
1	Разгон	1	4.8
2	Рабочий режим	4.8	6.8
3	Остановка	7	10

Опция «**Назначить для всех...**» позволяет установить границы реализации всех режимов по значениям, принятым для активного режима (режима, описываемого в активной строке таблицы).

**Замечание.** При отсечении части реализации граничные ординаты процесса –  $y(t_1)$ ,  $y(t_2)$  – не включаются в список выделяемых экстремумов.

В качестве примера, рассмотрим ситуацию, при которой реализация напряжений представляет собой регулярный процесс с амплитудой равной **10** МПа и средним значением **1** МПа.



Пусть некоторый режим нагружения задается интервалом реализации по времени [1.5 сек, 9.5сек]. Если при выделении экстремумов крайние ординаты выделенной части процесса включить в список экстремумов, при последующей схематизации будут выделены «дополнительные» полуциклы, не возникающие в процессе нагружения, со следующими параметрами:

Граница	Амплитуда полуцикла, МПа	Среднее значение полуцикла, МПа
Левая (1.5 сек)	<b>8.536</b>	<b>-0.464</b>
Правая (9.5 сек)	<b>1.464</b>	<b>9.536</b>

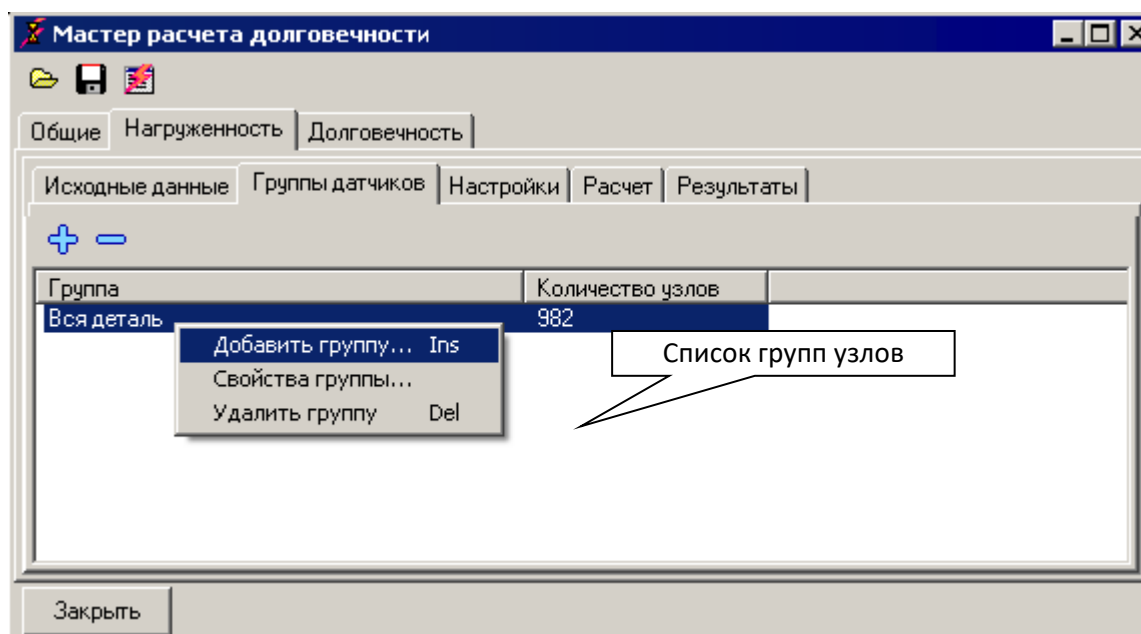
Для того чтобы избежать возникновения подобных ситуаций, крайние ординаты не включаются в список экстремумов. В этом случае «дополнительных» полуциклов нагружения, вносящих указанную погрешность, не возникает.

### 1.2.3. Работа с группами узлов



Оценка усталостной прочности элементов конструкции связана с необходимостью предварительного описания ресурсоограничивающих зон. Для каждой из зон определяется набор контрольных точек (узлов конечно-элементной модели упругого тела, в которых измеряются номинальные напряжения) и свойства сопротивления усталости.

Вследствие этого, в **Мастере расчета долговечности** введено понятие *группа узлов* – набор контрольных точек, свойства сопротивления усталости для которых совпадают. Предварительно, выбор групп осуществляется на основании анализа конструктивных и технологических особенностей конструкции, согласно рекомендациям, приведенным в нормативных документах расчетов на усталостную прочность.

Предварительное задание групп узлов производится на закладке **Нагруженность | Группы**.



При создании нового проекта все узлы конечно-элементной модели по умолчанию помещаются в группу «Вся деталь».

Добавление/удаление группы узлов осуществляется посредством элементов управления («Добавить группу»  и «Удалить группу» ) , а также через контекстное меню таблицы групп узлов.

Окно свойств группы открывается по двойному щелчку в списке групп и содержит закладки **Свойства** и **Узлы**. Закладка **Свойства** (см. рис. 1.11) позволяет задать название группы. На закладке **Узлы** (см. рис. 1.12) располагается список узлов группы. Элементы управления (кнопки «Добавить», «Удалить»), а также опции контекстного меню позволяют корректировать список узлов, сохранять его в тестовый файл и производить чтение номеров узлов из текстового файла.

Каждый узел конечно-элементной схемы упругой подсистемы может одновременно находиться только в одной группе. При попытке добавления узла в другую группу выво-

дится сообщение и предлагается выбор действия: удалить узел из исходной группы либо отменить добавление узла в новую группу.

**Замечание.** Во многих случаях выбор набора контрольных точек до расчета нагруженности бывает затруднен. Вследствие этого, на закладке **Долговечность | Сопротивление усталости** реализована возможность корректировки групп узлов. Пользователь может перегруппировать или удалить узлы, вошедшие в исходный список.

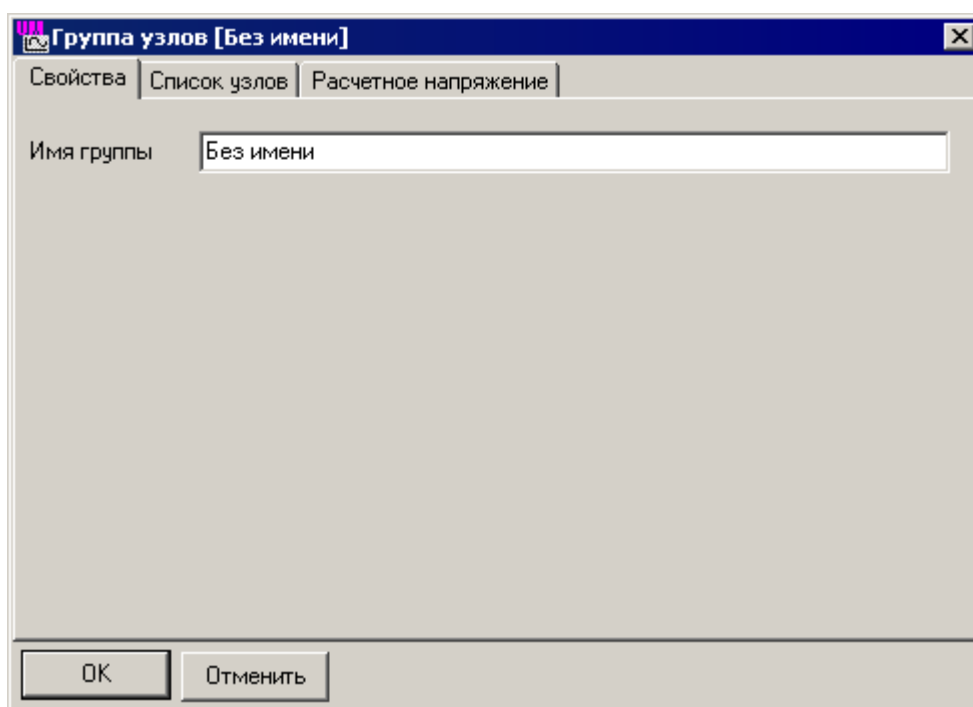


Рис. 1.11. Редактирование названия группы

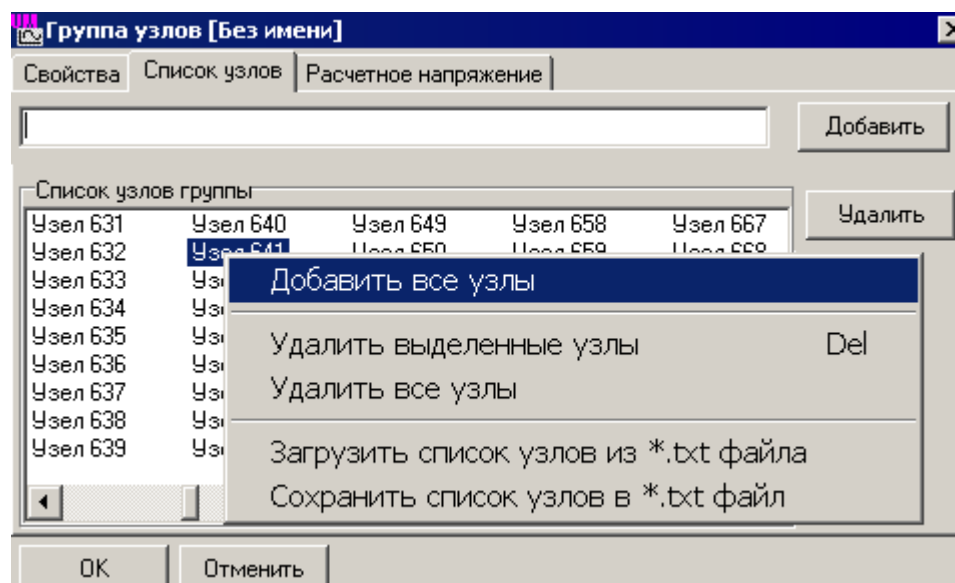
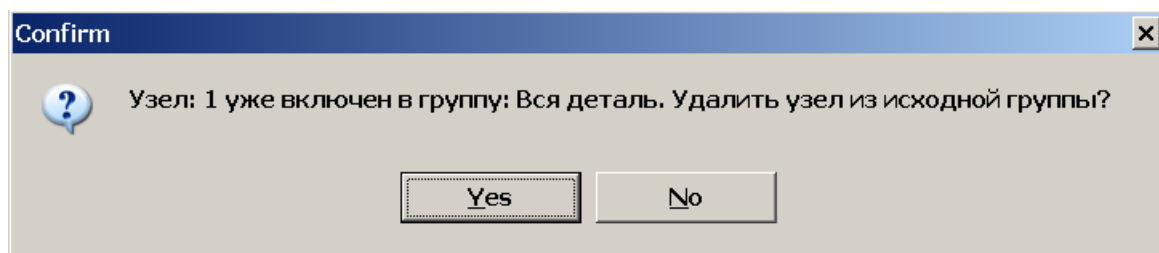


Рис. 1.12. Редактирование списка узлов



## 1.2.4. Настройки расчета нагруженности

Процедура расчета нагруженности включает расчет статистических характеристик процесса изменения напряжений и схематизацию процесса нагружения.

Расчет нагруженности производится для всех узлов, включенных в группы.

По результатам расчета, в зависимости от выбранных настроек, для множества частных режимов работы, а также эксплуатационного режима строятся двухпараметрические блоки нагружения.

### 1.2.4.1. Общие настройки

Элементы управления параметрами расчета нагруженности расположены на закладке **Нагруженность | Настройки**.

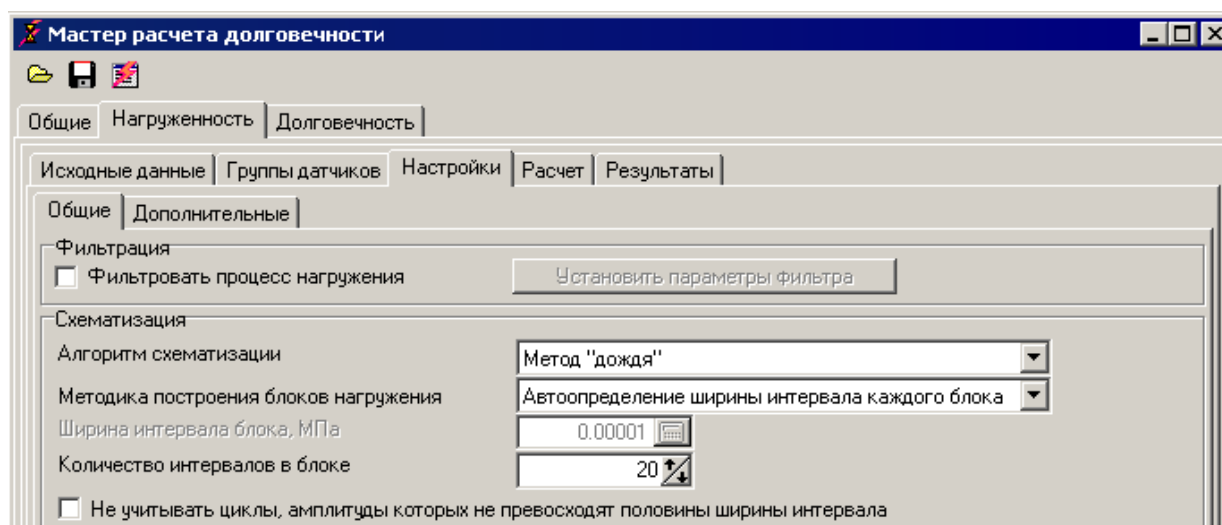


Рис. 1.13. Настройки расчета долговечности

Закладка **Общие** позволяет настроить следующие опции расчета нагруженности:

- **Фильтрация**

Данная опция позволяет производить обработку реализаций динамических напряжений, используемых в качестве исходных данных при описании нагруженности.

Включение опции позволяет задать параметры стандартного фильтра процесса.

#### Внимание

Результаты фильтрации можно проконтролировать на закладке **Исходные данные | Реализации**. Фильтрация применяется при расчете графических переменных.

- Схематизация

Алгоритм схематизации (опция доступна во второй версии программы, в первой – по умолчанию используется метод «дождя»).

Методика построения блоков нагружения позволяет выбрать один из двух подходов, использующихся при формировании блоков нагружения частных режимов, см. РП.

Количество интервалов в блоке нагружения определяет количество интервалов блока. С увеличением числа интервалов, возрастает точность описания распределения параметров нагружения. Согласно ГОСТ 25.101-83, число интервалов должно составлять от 14 до 32.

Ширина интервала блока, МПа позволяет задать фиксированную ширину интервала для всех блоков нагружения и применяется при использовании соответствующей методики построения блока.

Не учитывать циклы, амплитуды которых не превосходят половины ширины интервала Опция позволяет отсеивать циклы с заведомо малыми амплитудами и не рассматривать их при описании параметров нагружения. Данный подход регламентируется ГОСТ 25.101-83.

**Замечание.** Не рекомендуется использовать данную опцию при использовании автоопределения ширины интервала блока, поскольку вследствие различий в ширине интервалов, величина минимальной учитываемой амплитуды для частных режимов может существенно различаться.

### 1.2.4.2. Специализированные настройки расчета нагруженности

На форме **Нагруженность | Настройки** расположены также закладки, позволяющие настроить опции расчета нагруженности, использующиеся для частных методик расчета показателей усталостной долговечности.

#### 1.2.4.2.1. Настройки расчета нагруженности для вагонной методики

Закладка **Нагруженность | Настройки | Дополнительные** позволяет задать алгоритмы расчета центральной частоты, величина которой используется при расчете показателей усталостной долговечности, регламентированной нормами вагоностроения.

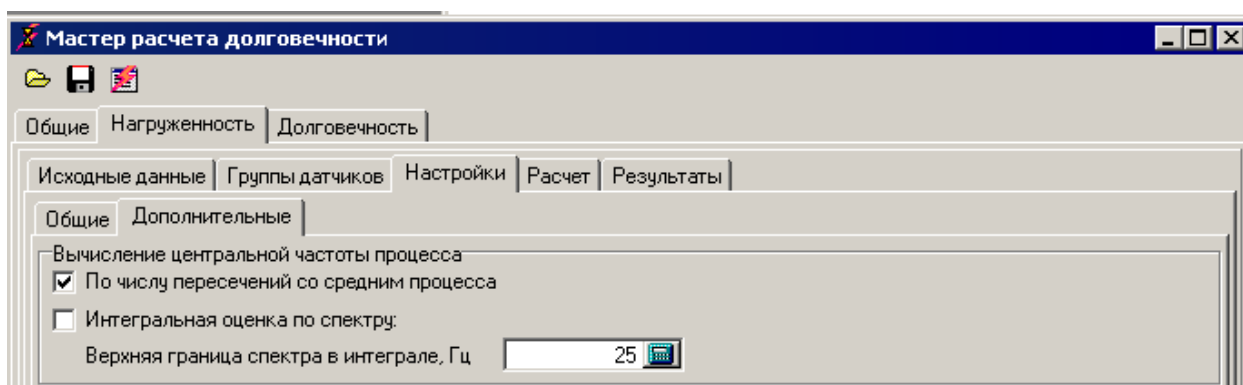


Рис. 1.14. Настройки расчета долговечности по вагонным нормам

В программе реализовано несколько алгоритмов вычисления центральной частоты.

По числу пересечений со средним процессом. Расчет ведется по формуле

$$f_e = \frac{n_m}{2 \cdot T}, \text{ где}$$

$n_m$  – число «нулей» реализации, т.е. число пересечений реализацией напряжений среднего уровня реализации  $\sigma = \bar{\sigma}$ ;

$T$  – длина реализации.

Интегральная оценка по спектру. Расчет ведется по формуле

$$f_e = \sqrt{\int_0^{f^{max}} f^2 \cdot g(f) df}, \text{ где}$$

$g(f)$  – нормированная функция спектральной плотности процесса;

$f^{max}$  – верхняя граница интеграла, задается в соответствующем поле.

## 1.2.5. Результаты расчета нагруженности

Результаты расчета нагруженности представлены на закладке **Нагруженность | Результаты** и включают в себя статистику процесса изменения расчетных напряжений, а также распределения параметров нагружения, полученные в ходе схематизации

### 1.2.5.1. Список датчиков

Закладка **Нагруженность | Результаты | Список датчиков** позволяет получить информацию о наиболее общих характеристиках силовой нагруженности в узлах конечно-элементной модели, как для отдельных режимов работы, так и для эксплуатационного нагружения, включающего их комбинацию.

Номер узла	Группа датчиков	Расчетное напр...	Мин. напр., МПа	Макс. напр., М...	Среднее напр., ...	Цен
1	Вся деталь	SEQV2	0.003	1.457	0.333	(нет)
2	Вся деталь	SEQV2	0.013	7.013	1.721	(нет)
3	Вся деталь	SEQV2	0.007	3.184	0.732	(нет)
4	Вся деталь	SEQV2	0.004	5.307	1.271	(нет)
5	Вся деталь	SEQV2	0.008	8.168	1.993	(нет)
6	Вся деталь	SEQV2	0.021	16.523	3.613	(нет)
7	Вся деталь	SEQV2	0.022	5.609	1.395	(нет)
8	Вся деталь	SEQV2	0.019	3.940	1.008	(нет)
9	Вся деталь	SEQV2	0.022	3.441	0.892	(нет)
10	Вся деталь	SEQV2	0.022	3.287	0.852	(нет)
11	Вся деталь	SEQV2	0.031	3.395	0.876	(нет)
12	Вся деталь	SEQV2	0.043	3.585	0.922	(нет)
13	Вся деталь	SEQV2	0.045	3.788	0.975	(нет)
14	Вся деталь	SEQV2	0.047	3.978	1.028	(нет)

Рис. 1.15. Результаты расчета для списка узлов

Каждая строка таблицы соответствует узлу конечно-элементной модели, для которого производился расчет нагруженности. Для выбранного из списка режима работы в строках таблицы отображаются следующие данные.

#### Статистика по реализации

- Минимальное напряжение
- Среднее напряжения
- Максимальное напряжение
- Среднеквадратическое отклонение процесса
- Центральная частота процесса нагружения

#### Результаты схематизации

- Комментарий (вид распределения, см. Нагруженность)
- Минимальная амплитуда полуцикла нагружения
- Максимальная амплитуда полуцикла нагружения
- Минимальное медианное значение полуцикла нагружения
- Максимальное медианное значение полуцикла нагружения
- Минимальная приведенная амплитуда полуцикла нагружения
- Максимальная приведенная амплитуда полуцикла нагружения
- Число циклов нагружения<sup>2</sup>
- Число циклов нагружения за 1 секунду\*
- Число циклов нагружения, приведенное к км пройденного пути\*

Нажатие на заголовок столбца таблицы приводит к сортировке узлов по убыванию/возрастанию выбранной величины.

Контекстное меню позволяет настраивать список параметров, отображаемых в таблице, а также экспортировать ее в текстовый файл.

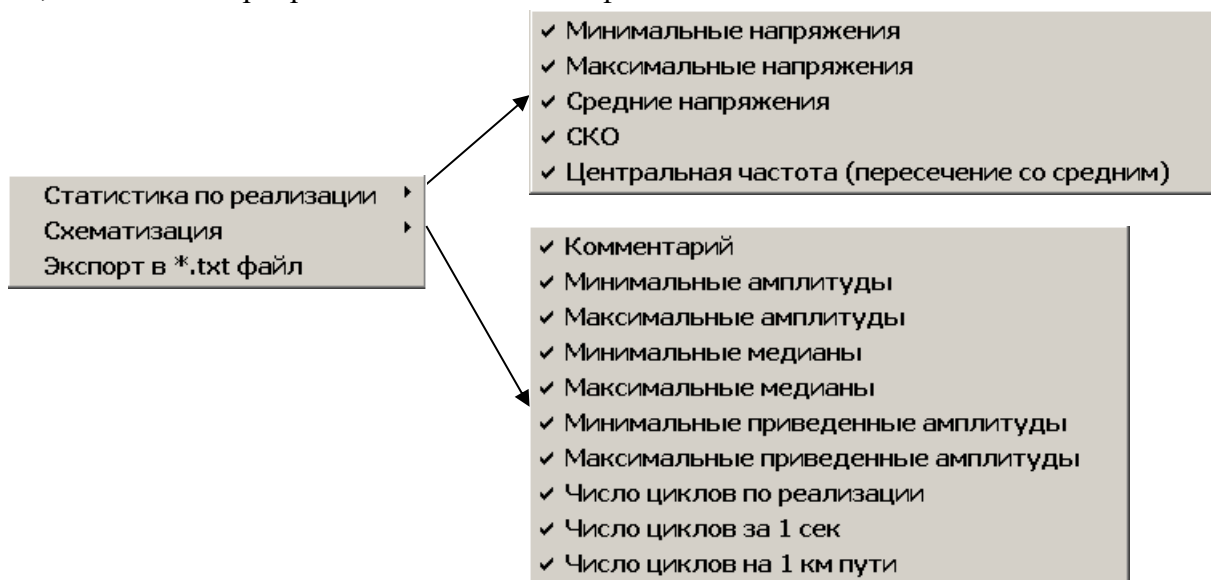


Рис. 1.16. Настройка столбцов

<sup>2</sup> См. гл. 1.2.1.5.

Приведение результатов схематизации к единицам срока службы

### 1.2.5.2. Отдельный датчик

Результаты на закладке **Нагруженность | Результаты | Отдельный датчик** позволяют исследователю проанализировать структуру нагружения данного узла по режимам нагружения и сравнить интенсивность нагружения узла в различных режимах нагружения.

Набор отображаемых параметров совпадает с набором параметров таблицы **Нагруженность | Результаты | Список датчиков**.

Режим нагруж...	Группа датчиков	Расчетное нап...	Мин. напр., МПа	Макс. напр., М...	Среднее напр., ...	Центр.
Разгон	Вся деталь	SEQV2	0.003	1.457	0.333	(нет да
Рабочий режим	Вся деталь	SEQV2	0.010	1.454	0.873	(нет да
Остановка	Вся деталь	SEQV2	0.001	1.418	0.223	(нет да
Смешанный бло...	Вся деталь	SEQV2	0.001	1.457	0.000	0.000

### 1.2.5.3. Распределения

Закладка **Нагруженность | Результаты | Распределения** позволяет получить информацию о распределениях параметров нагружения в узлах конечно-элементной модели тела. Здесь отображается информация о следующих распределениях параметров нагружения для выбранного частного, либо эксплуатационного режима работы в узле с указанным номером:

	Амплитуды	№	1	2	3	4
Медианы		Интервал, МПа	[0.000..0.036]	[0.036..0.073]	[0.073..0.109]	[0.109..0.145]
№	Интервал, МПа	Значение, МПа	0.018	0.055	0.091	0.127
1	[0.006..0.047]	0.026	6.751	0	0	0
2	[0.047..0.088]	0.067	4.219	3.797	0.844	0
3	[0.088..0.129]	0.108	6.329	2.110	4.641	2.
4	[0.129..0.170]	0.149	0	0	0	5.

Рис. 1.17. Двухпараметрическое распределение

### Двухпараметрическое распределение

На закладке отображается корреляционная таблица амплитуд и средних значений циклов нагружения, см. рис. 1.17. В ячейках таблицы приведены относительные доли числа циклов нагружения, амплитуды и медианы которых попадают в соответствующие интервалы.

#### Распределение амплитуд

В таблице приведено распределение циклов нагружения по амплитудам, сформированное на основании двухпараметрического распределения параметров нагружения.

Двухпараметрическое распределение		Распределение амплитуд		Распределение медиан	
№	Интервал напр...	Среднее напря...	Вероятность, %	Число циклов	
1	[0.000..0.036]	0.018	17.300	20.500	
2	[0.036..0.073]	0.055	5.907	7.000	
3	[0.073..0.109]	0.091	5.485	6.500	
4	[0.109..0.145]	0.127	8.439	10.000	
5	[0.145..0.182]	0.164	2.532	3.000	
6	[0.182..0.218]	0.200	2.532	3.000	
7	[0.218..0.254]	0.236	1.688	2.000	
8	[0.254..0.291]	0.273	3.376	4.000	
9	[0.291..0.327]	0.309	3.376	4.000	
10	[0.327..0.363]	0.345	0.000	0.000	
11	[0.363..0.400]	0.382	3.376	4.000	
12	[0.400..0.436]	0.418	1.688	2.000	
13	[0.436..0.473]	0.454	0.844	1.000	


#### Распределение медиан

В таблице приведено распределение циклов нагружения по медианам, сформированное на основании двухпараметрического распределения параметров нагружения.

Двухпараметрическое распределение		Распределение амплитуд		Распределение медиан	
№	Интервал напр...	Среднее напря...	Вероятность, %	Число циклов	
1	[0.006..0.047]	0.026	6.751	8.000	
2	[0.047..0.088]	0.067	8.861	10.500	
3	[0.088..0.129]	0.108	15.612	18.500	
4	[0.129..0.170]	0.149	5.907	7.000	
5	[0.170..0.211]	0.190	0.844	1.000	
6	[0.211..0.251]	0.231	3.376	4.000	
7	[0.251..0.292]	0.272	2.532	3.000	
8	[0.292..0.333]	0.313	3.376	4.000	
9	[0.333..0.374]	0.354	2.532	3.000	
10	[0.374..0.415]	0.395	0.844	1.000	
11	[0.415..0.456]	0.436	2.532	3.000	
12	[0.456..0.497]	0.477	0.844	1.000	
13	[0.497..0.538]	0.518	1.688	2.000	

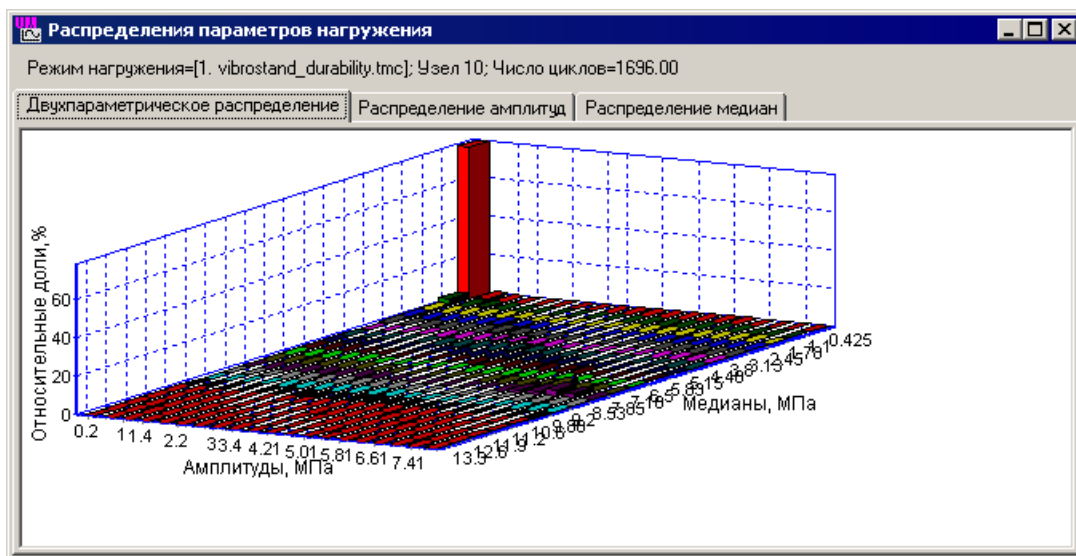
### 1.2.5.3.1. Графическое представление

Для отображения распределений параметров, характеризующих заданные режимы нагружения, необходимо:

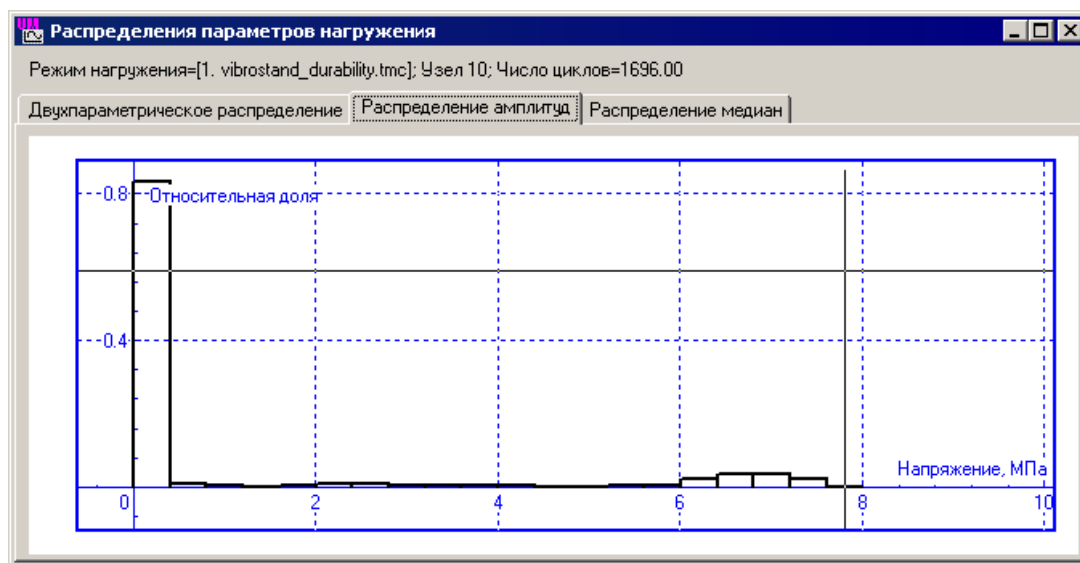
- перейти на закладку **Нагруженность | Результаты | Распределения**;
- выбрать номер узла и режим работы;
- нажать на кнопку  на верхней панели закладки, или выбрать в контекстном меню таблицы опцию «Показать как гистограмму».

Отображение распределений осуществляется в отдельном окне, содержащем следующие закладки:

- Закладка **Двухпараметрическое распределение**.



- Закладки **Распределение амплитуд**, **Распределение медиан** и **Распределение приведенных амплитуд** содержат стандартные графические окна с гистограммами распределений параметров.



#### 1.2.5.4. Визуализация результатов расчета

Элементы управления, расположенные на закладке **Нагруженность | Результаты | Визуализация** используются для получения визуального представления о распределении параметров нагружения, а также для формирования на основании этой информации списков узлов. Списки узлов могут быть использованы при формировании групп узлов.

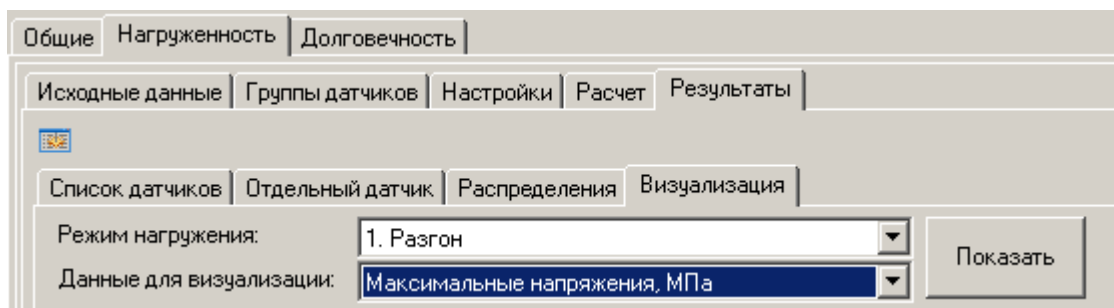


Рис. 1.18. Результаты расчета: визуализация величин

Для визуализации может быть выбран любой из параметров таблицы **Нагруженность | Результаты | Список узлов** для частного или эксплуатационного режима работы.

После нажатия кнопки «Показать» открывается новое анимационное окно, содержащее изображение конечноэлементной модели исследуемого тела. Цвета соответствуют распределению величины выбранного параметра.

На рисунке представлено распределение максимальных амплитуд эквивалентных напряжений.

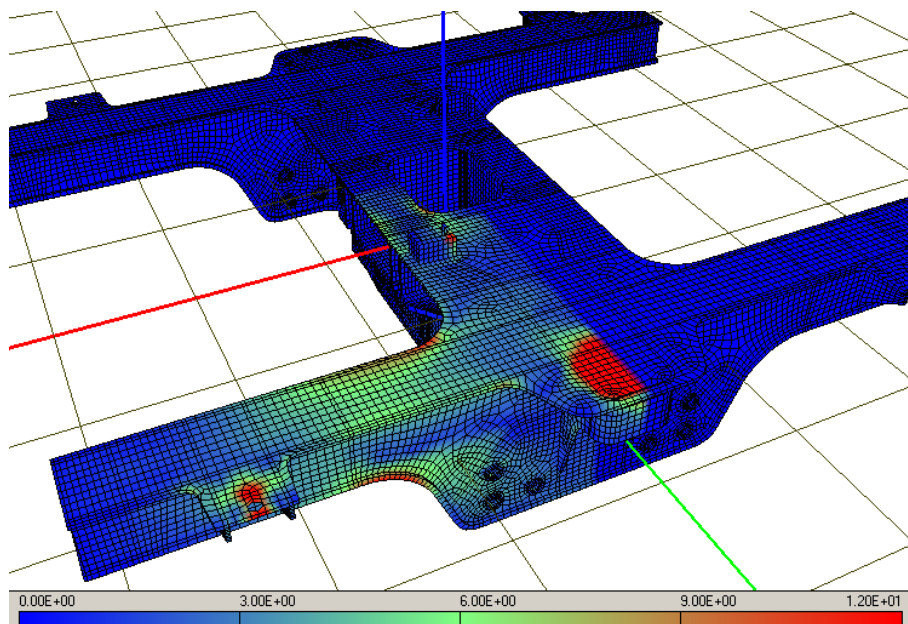


Рис. 1.19. Результаты расчета: визуализация величин

Доступ к настройкам анимационного окна осуществляется через опции контекстного меню. Кроме набора стандартных опций контекстное меню анимационного окна позволяет выполнять следующие действия.

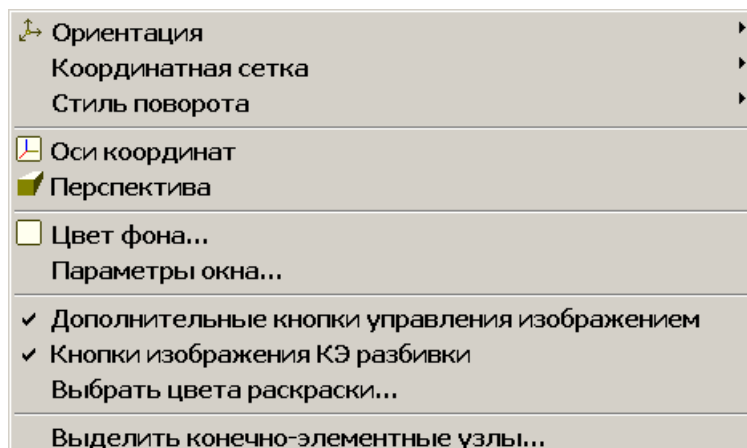


Рис. 1.20. Контекстное меню анимационного окна

○ «**Выбрать цвета раскраски...**»

Данная опция позволяет привязать цвета к конкретным значениям отображаемой величины и настроить вид шкалы.

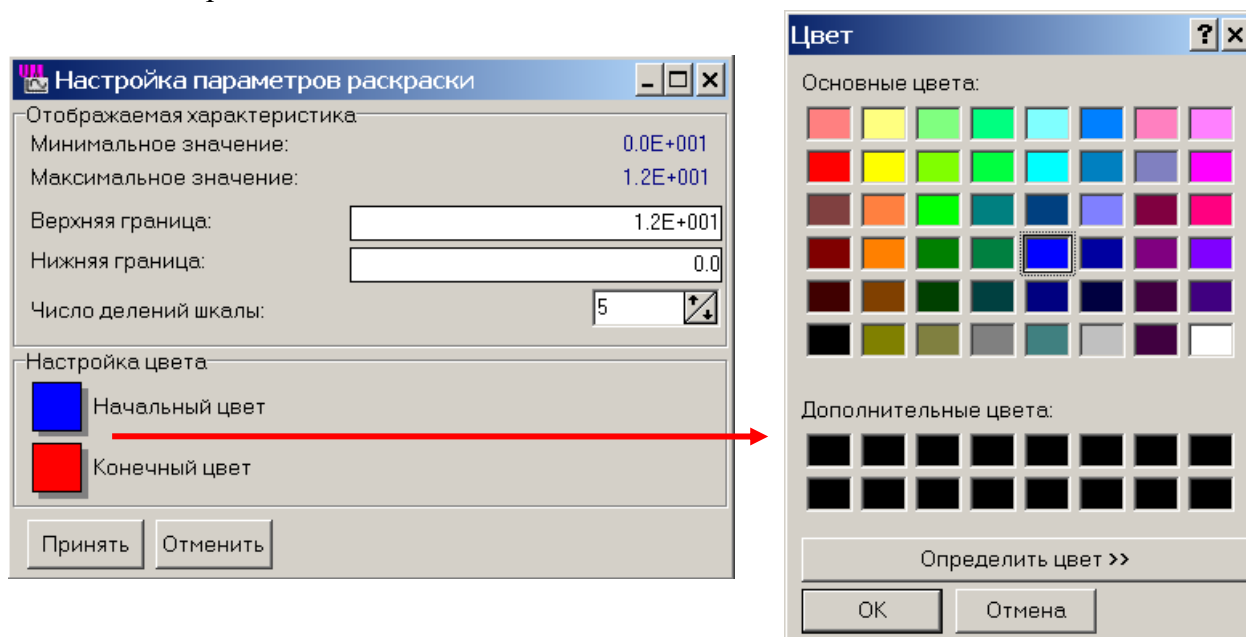


Рис. 1.21. Настройка параметров визуализации

○ «**Выделить конечно-элементные узлы...**»

Данная опция позволяет визуально выбирать набор узлов, определять номера узлов по координатам и наоборот.

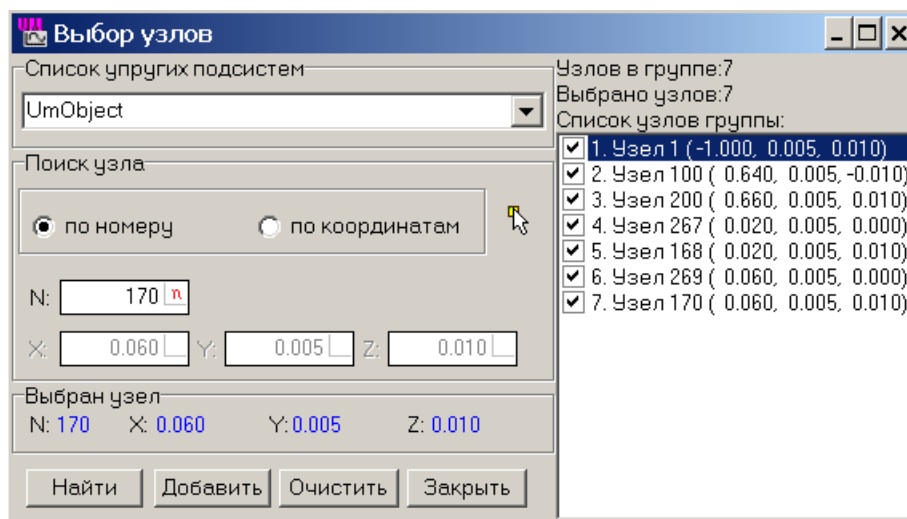



Рис. 1.22. Настройка параметров визуализации

Поиск узла может осуществляться:

- по номеру (номер узла вводится в поле «N:»)
- по координатам (координаты узла в системе координат упругой подсистемы вводятся в полях «X:», «Y:», «Z:»)

После задания условий поиска необходимо нажать кнопку «Найти». Для добавления узла в список необходимо нажать кнопку «Добавить».

Для визуального добавления необходимо активизировать кнопку  и щелкнуть на узле в анимационном окне.

Для выделения выбранных узлов в анимационном окне необходимо установить напротив номера узла в списке галочку и закрыть окно.

Контекстное меню списка узлов позволяет:

- «Выделить все узлы»
- «Сбросить выделение»
- «Сохранить в \*.txt файл»

Список узлов может быть сохранен в текстовый файл для последующего задания в качестве списка узлов группы, см. Группы узлов.

- «Прочитать из \*.txt файла»

Список узлов может быть загружен из текстового файла для отображения в анимационном окне.

**Замечание.** На стадии расчета нагруженности группы включают большое количество узлов, вследствие недостатка данных для выбора наиболее опасных. Используя опцию выбора узлов, по результатам расчета нагруженности можно сформировать список узлов для последующего исследования с точки зрения усталостной долговечности.

### 1.3. Оценка показателей усталостной долговечности

Модуль **UM Durability** позволяет производить оценку параметров усталостной долговечности в рамках теории многоциклового усталости согласно следующим методикам:

- Методика расчета по вагоностроительным нормам

Расчет ведется в соответствии с [1]. Наряду с нормативными, реализованы дополнительные опции расчета, основанные на использовании норм общего машиностроения, см. ниже.

- S-N метод (общемашиностроительная методика)

Расчет усталостной долговечности ведется с использованием линейной модели накопления усталостных повреждений. Используется модель кривой усталости с двумя участками.

Далее приводятся краткие теоретические основы методик расчета усталостной долговечности при многоциклового усталости, реализованных в программе, излагается общая последовательность расчета, и подробно описывается интерфейс каждой из предложенных методик.

### 1.3.1. Процедура анализа усталостной долговечности

Расчет усталостной долговечности элементов конструкций, подвергающихся действию силовых воздействий, включает несколько основных этапов.



Модуль **UM Durability** предлагает следующую последовательность операций:

- Анализ эксплуатационной нагруженности

Производится оценка динамической нагруженности. По результатам строятся распределения параметров процессов нагружения, соответствующих различным режимам работы объекта, см. п. 1.2. "Анализ эксплуатационной нагруженности", с. 1-7.

- Выбор параметров расчета усталостной долговечности
- Задание свойств сопротивление усталости для групп узлов

Наиболее точные сведения о свойствах сопротивления усталости объекта могут быть получены посредством проведения серии натуральных экспериментов. Для случая, когда проведение подобных исследований не представляется возможным, оценка свойств производится по приближенным зависимостям, регламентированных нормативными и руководящими документами. Описание свойств сопротивление усталости в различных методиках расчета имеет существенные различия. Соответствующие методики приближенного расчета реализованы в программе.

- Расчет показателей усталостной долговечности

Показателями усталостной долговечности объекта могут служить коэффициенты запаса по амплитудам нагружения, сроки службы, пробег до отказа и пр. Конкретный набор показателей определяется выбранной методикой расчета.

- Анализ результатов расчета

### 1.3.1.1. Выбор методики расчета усталостной долговечности

Каждая из предложенных методик расчета показателей усталостной долговечности имеет ряд характерных особенностей. Выбор методики осуществляется пользователем на основании требований, предъявляемых к методическому обоснованию проводимого исследования.

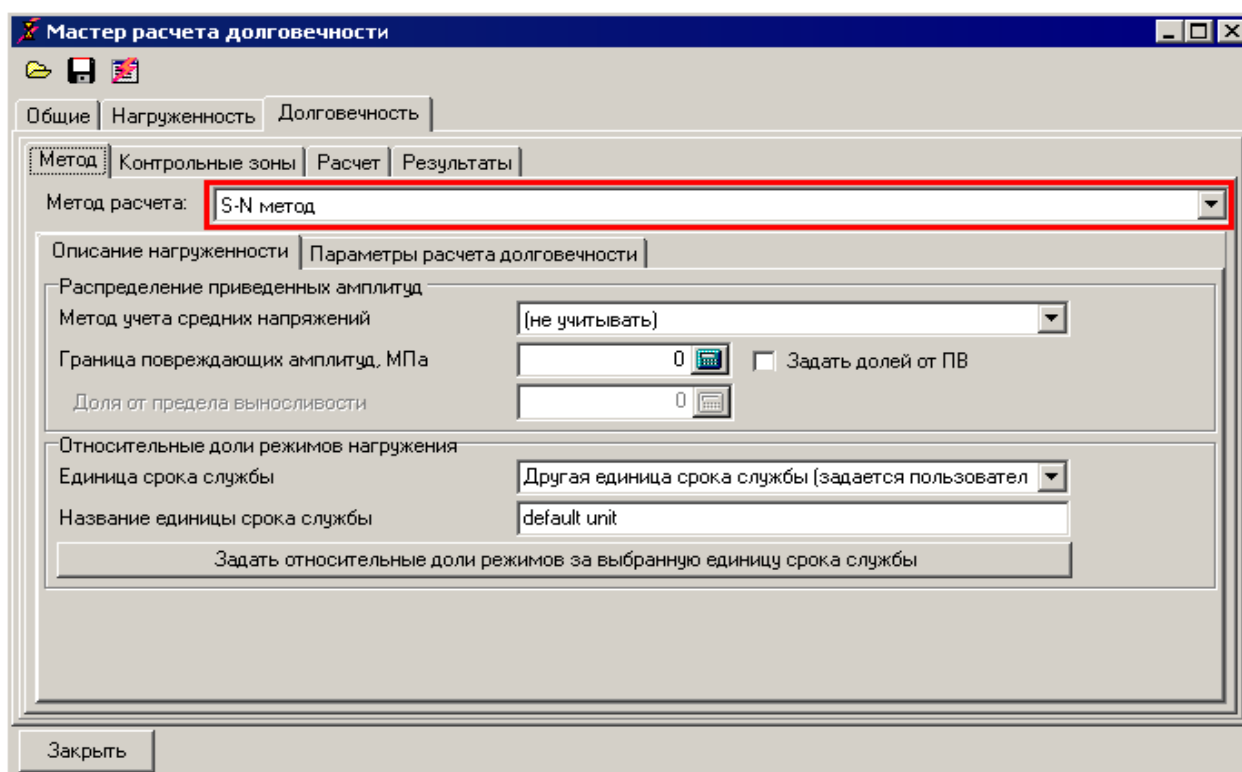


Рис. 1.23. Выбор метода расчета долговечности

### 1.3.1.2. Приведение к сроку службы

Любой метод расчета долговечности требует предварительного анализа динамической нагруженности. Такой анализ выполняется для всех выбранных узлов.

Для оценки величин сопротивления усталости исследователь должен определить единицы срока службы и определить относительную долю каждого режима нагружения для последующего анализа, см. рис. 1.23, поле Долговечность | Метод | Описание нагруженности | Единица срока службы.

UM Durability допускает использование нескольких типов единиц срока службы, которые подробно рассмотрены ниже.

**Секунда работы**

В этом случае относительные доли режимов работы выражаются через время работы на каждом режиме.

Пусть  $n_{real}^{<k>}$  – число циклов нагружения, обнаруженных для k-го режима нагружения.

Число циклов нагружения в секунду работы механизма в k-ом режиме нагружения вычисляется как

$$n_{sec}^{<k>} = \frac{n_{real}^{<k>}}{t_2^{<k>} - t_1^{<k>}}, \text{ где}$$

$t_1^{<k>}$ ,  $t_2^{<k>}$  начальный и конечный момент времени, заданный для k-го режима нагружения при оценке нагруженности. Моменты времени задаются ранее при настройках параметров расчета нагруженности, см. п. 1.2.2.4. "Задание границ реализаций режимов по времени", с. 1-30, и не могут быть изменены на данном этапе.

Число циклов нагружения в секунду работы  $n_{sec}^{<CLB>}$  вычисляется следующим образом:

$$n_{sec}^{<CLB>} = \sum_k C^{<k>} \cdot n_{sec}^{<k>}, \text{ где}$$

$C^{<k>}$  – доля k-го режима нагружения.

Относительные доли нагружения для каждого режима задается нажатием кнопки «**Задать относительные доли режимов...**», см. рис. 1.23. Используйте загрузку коэффициентов из текстового файла с помощью команды контекстного меню или введите коэффициенты вручную.

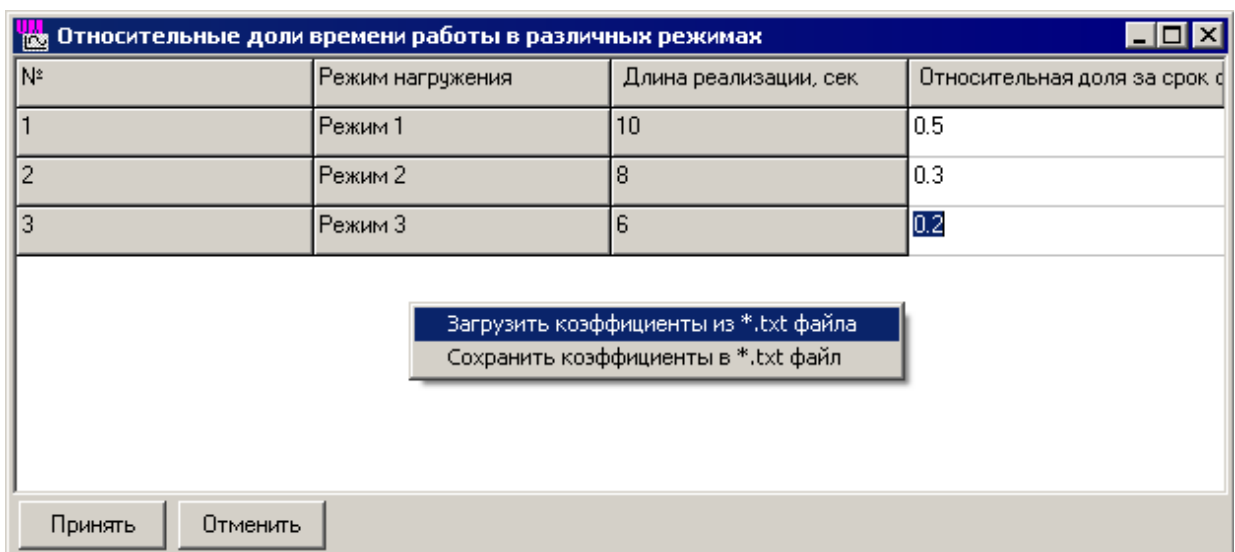


Рис. 1.24. Задание относительных долей работы для каждого режима нагружения

### Километр пробега

Число циклов нагружения на километр пути для k-го режима нагружения вычисляются по следующей формуле

$$n_{km}^{<k>} = \frac{n_{real}^{<k>}}{L^{<k>} \cdot 10^{-3}}, \text{ где}$$

$L^{<k>}$  – длина пути в метрах, соответствующая истории нагружения для k-го режима.

Число циклов на километр пути  $n_{km}^{<CLB>}$  вычисляется как

$$n_{km}^{<CLB>} = \sum_k C^{<k>} \cdot n_{km}^{<k>}$$

Длина пути  $L^{<k>}$  и относительная доля каждого режима нагружения в общей структуре нагружения задаются в диалоговом окне рис. 1.25

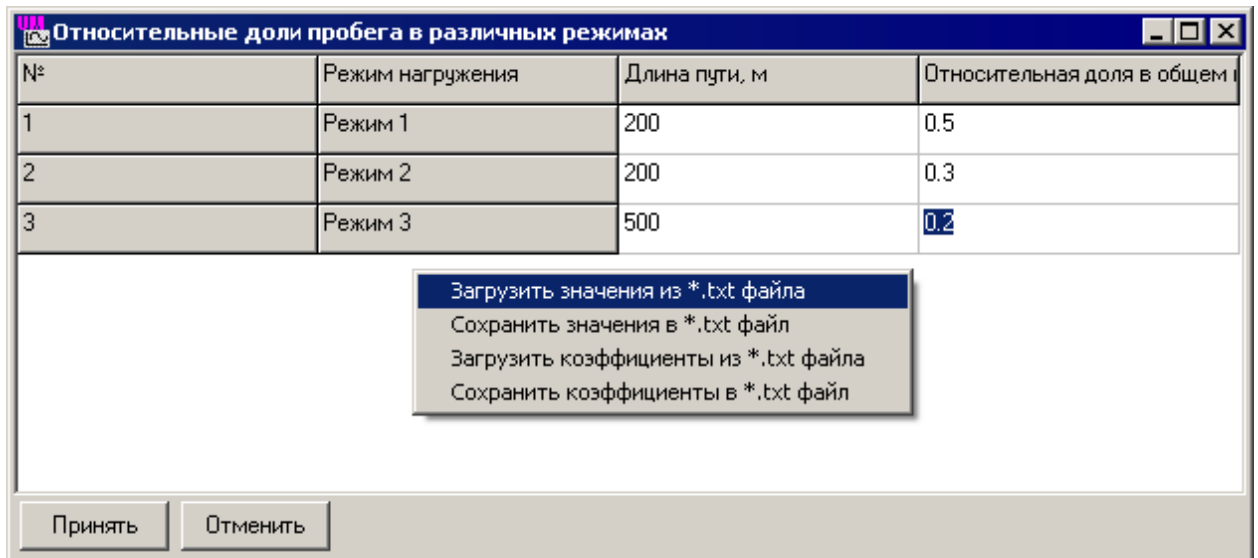


Рис. 1.25. Задание относительных долей пробега для каждого режима нагружения

**Единицы пользователя**

Пользователь может определить собственные единицы приведения к сроку службы (только для **S-N метода**). В этом случае пользователь должен описать долю каждого режима в условиях функционирования системы.

Число циклов нагружения в единицу срока службы  $n_R^{<k>}$  для k-го режима нагружения вычисляется по формуле

$$n_R^{<k>} = R^{<k>} \cdot n_{real}^{<k>}, \text{ где}$$

$R^{<k>}$  – число циклов для k-го режима нагружения.

Число циклов нагружения в единицу срока службы  $n_R^{<CLB>}$  определяется как

$$n_R^{<CLB>} = \sum_k n_R^{<k>}$$

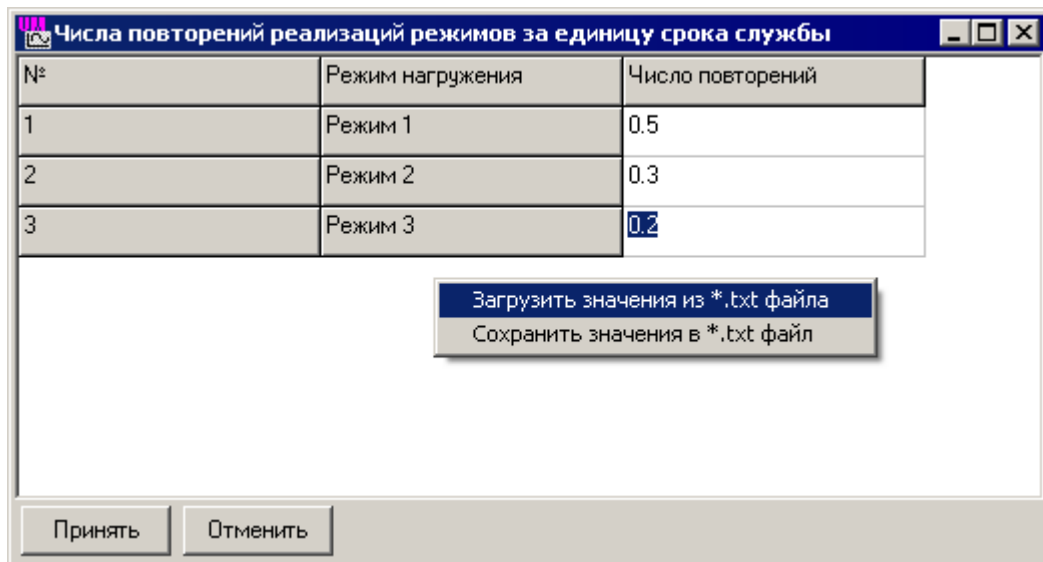


Рис. 1.26. Задание относительных долей режимов нагружения. Единицы пользователя

### 1.3.1.3. Задание свойств контрольных зон для групп узлов

Группы узлов предварительно определяются на стадии подготовки расчета нагруженности, см. п. 1.2.3. "Работа с группами узлов", с. 1-32. Для расчета усталостной долговечности для каждой группы необходимо дополнительно задать свойства сопротивления усталости.

Свойства сопротивления усталости определяются многими факторами: свойствами материала, типом нагружения, расположением датчика (узла, по результатам расчета нагруженности в котором производится расчет) и т.д.

Свойства сопротивления усталости материалов описываются в **Справочнике материалов**. Для каждой группы узлов задаются свойства материала, которые либо вводятся вручную, либо выбираются из справочника материалов. Если свойства сопротивления усталости, заданные в справочнике для материала, соответствуют испытаниям на знакопеременный изгиб стандартного образца, то для перехода к свойствам группы пользователь может воспользоваться набором поправочных коэффициентов. Набор коэффициентов определяется выбранной методикой расчета усталостной долговечности и может включать коэффициенты, учитывающие влияние размеров детали, неоднородности материала, качества поверхности и упрочняющей обработки.

Для работы с группами узлов в рамках расчета усталостной долговечности применяется закладка **Долговечность | Контрольные зоны**.

Группы узлов	Всего узлов ...	Материал	ПВ ...	ОКС...	ПВ г...	КВ ...	КЗ ...	Доп...
Группа А	788	09Г2СД толщина 10-20 мм	210	4.511	46.563	0.12	2.20	21.168
Группа В	11	09Г2Д толщина 5-9 мм	210	1.000	210....	0.00	1.00	210....
Группа С	110	15ХСНД 10-20 мм	240	1.000	240....	0.00	1.00	240....

Для задания и корректировки свойств группы необходимо дважды щелкнуть на соответствующей строке списка. Описание свойств группы определяется выбранной методикой расчета параметров усталостной долговечности.

Список узлов, относящихся к той или иной группе, может быть скорректирован. Кроме того, могут быть добавлены новые или удалены группы узлов, заданные ранее (см. п. 1.2.3. "Работа с группами узлов", с. 1-32).

**Замечание.** Оценка показателей усталостной долговечности производится по результатам расчета нагруженности. Следовательно, в группы не могут быть добавлены узлы, не вошедшие ни в одну группу при расчете нагруженности.

### 1.3.1.3.1. Справочник материалов

**Справочник материалов** позволяет исследователю сохранить в базе данных механические свойства наиболее часто встречающихся в его практике материалов. По умолчанию **Справочник материалов** пустой.

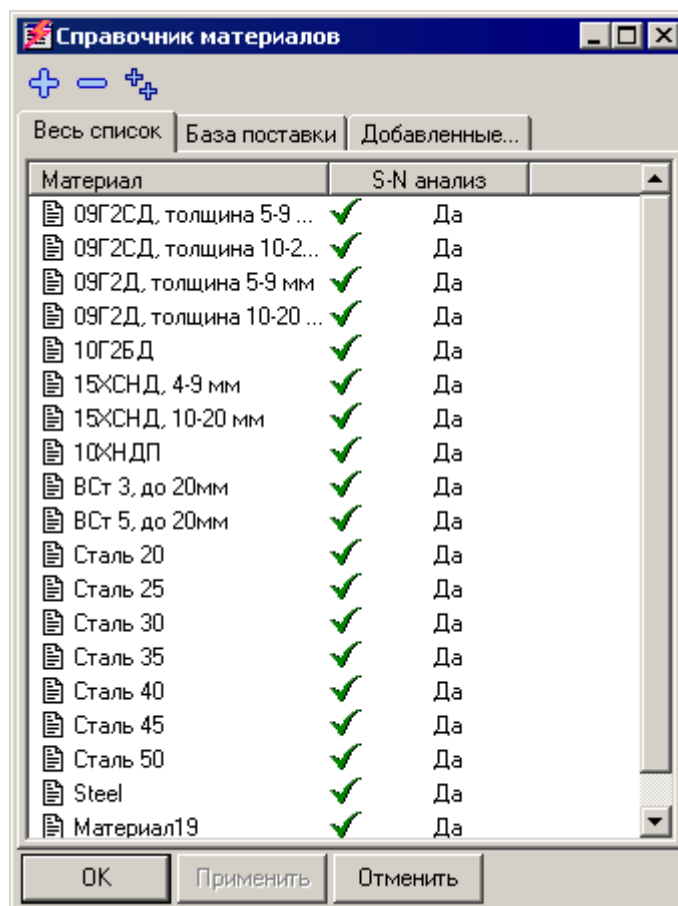





Рис. 1.27. Справочник материалов

Элементы управления расположенные на верхней панели формы позволяют добавлять новые , а также удалять  и копировать записи .

Для задания и корректировки свойств группы необходимо дважды щелкнуть на соответствующей строке списка.

На закладке **Общие** описываются механические свойства материала, определяемые по результатам испытаний на одноосное растяжение.

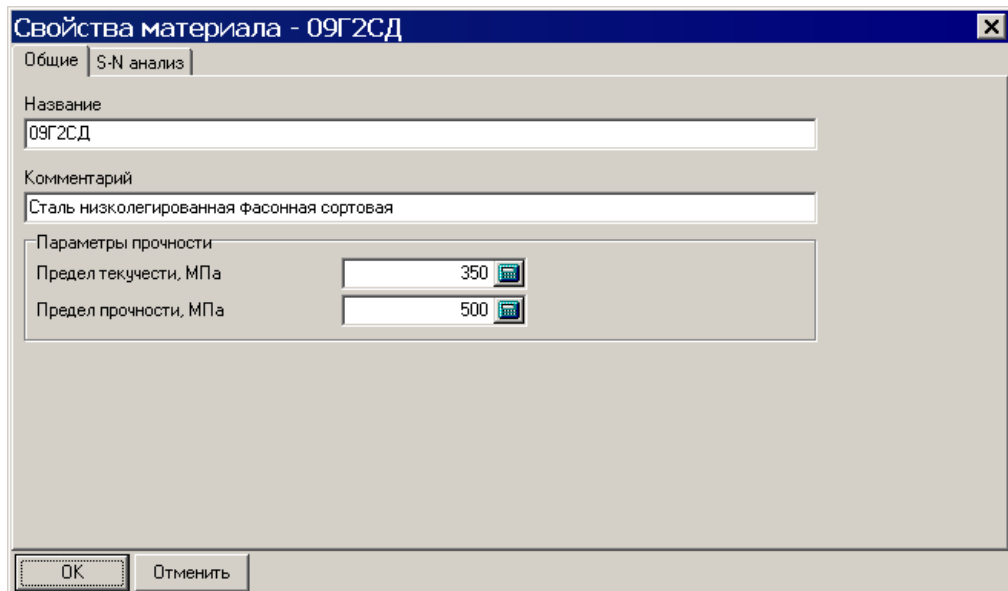


Рис. 1.28. Свойства материалов: общие

Сопротивление материала деталей в многоцикловой области описывается экспериментальными кривыми, задающими зависимость между параметрами регулярного нагружения и числом циклов до разрушения. Испытания проводятся на гладких стандартных образцах в условиях нагружения различных видов. Различают кривые усталости, полученные в ходе испытаний на **Изгиб**, **Растяжение/сжатие** и **Кручение**. На окне **S-N анализ** расположены три соответствующие закладки. В качестве параметров нагружения рассматривают амплитуды или размахи процесса изменения напряжений

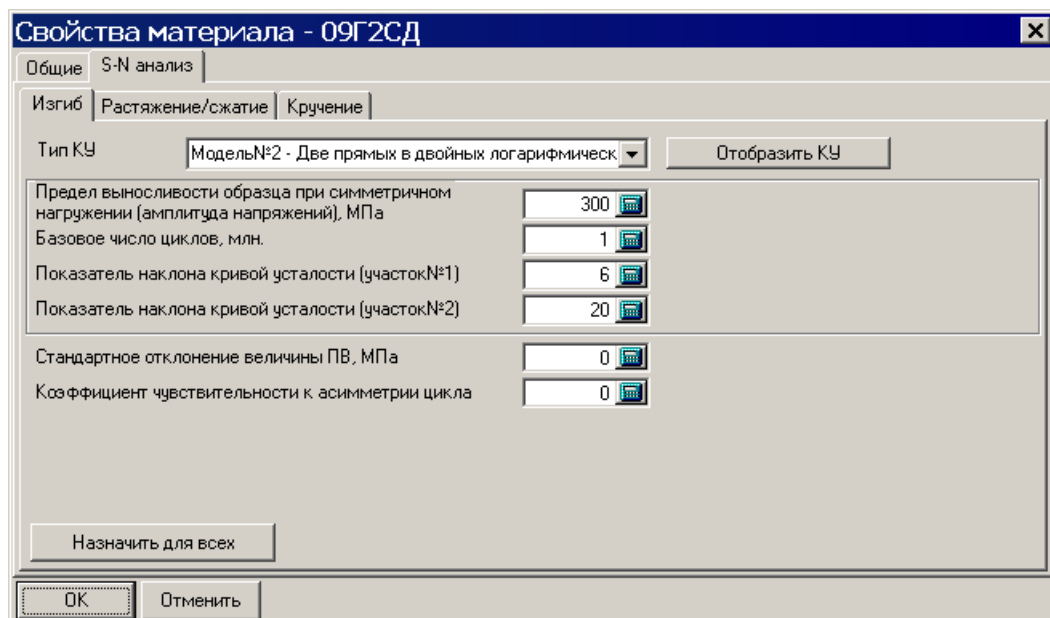


Рис. 1.29. Свойства материалов: S-N анализ

### 1.3.1.3.2. Модели кривой усталости

Существует множество математических моделей кривой усталости, основанных на различных способах аппроксимации и статистической обработки экспериментальных данных. Реализованные в программе UM Durability методики оценки показателей усталостной долговечности используют следующие модели кривой усталости.

#### *Модель №1 – Прямая в двойных логарифмических координатах*

Данная модель применяется при расчете согласно российских норм вагоностроения [1] и описывается следующей зависимостью:

$$\sigma^m \cdot N = const, \text{ где}$$

$\sigma$  – величина амплитуды регулярного процесса нагружения;

$N$  – число циклов нагружения, приводящего к возникновению усталостной трещины определенных размеров либо разрушению детали;

$m$  – показатель наклона кривой усталости в двойных логарифмических координатах.

Для определения числа циклов регулярного симметричного нагружения ( $N$ ) от величины амплитуды цикла нагружения ( $\sigma$ ) используется зависимость:

$$N = N_0 \cdot \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma}\right)^m, \text{ где}$$

$N_0$  – базовое число циклов;

$\sigma_{-1}$  – предел выносливости детали при регулярном симметричном нагружении.

Окно задания параметров кривой усталости имеет следующий вид

Тип КУ	Модель№1 - Прямая в двойных логарифмических коорд
Предел выносливости образца при симметричном нагружении (амплитуда напряжений), МПа	210
Базовое число циклов, млн.	10
Показатель наклона кривой усталости	6

*Модель №2 – Две прямых в двойных логарифмических координатах*

Данная модель применяется при расчете по общемашиностроительной методике и описывается следующей зависимостью:

$$N = \begin{cases} N_0 \cdot \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma}\right)^{m_1}, & \text{при } \sigma \geq \sigma_{-1} \\ N_0 \cdot \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma}\right)^{m_2}, & \text{при } \sigma < \sigma_{-1} \end{cases}, \text{ где}$$

$N$  – число циклов нагружения, приводящего к возникновению усталостной трещины определенных размеров либо разрушению детали;

$\sigma$  – величина *амплитуды* регулярного процесса нагружения;

$N_0$  – базовое число циклов;

$m_1, m_2$  – показатели наклона ветвей кривой усталости в двойных логарифмических координатах.

Окно задания параметров кривой усталости имеет следующий вид

Предел выносливости образца при симметричном нагружении (амплитуда напряжений), МПа	210
Базовое число циклов, млн.	10
Показатель наклона кривой усталости (участок№1)	6
Показатель наклона кривой усталости (участок№2)	0.01

*Модель №3 – Гиперболическая аппроксимация*

Данная модель применяется при расчете согласно российских норм локомотивостроения и описывается следующей зависимостью:

$$N = \beta \cdot \frac{\sigma_B - \sigma}{\sigma - \sigma_{-1}}, \text{ где}$$

$N$  – число циклов нагружения, приводящего к возникновению усталостной трещины определенных размеров либо разрушению детали;

$\sigma$  – величина *амплитуды* регулярного процесса нагружения;

$\sigma_B$  – предел прочности материала, полученный в ходе испытаний на одноосное растяжение;

$\beta$  – постоянная образца.

Окно задания параметров кривой усталости имеет следующий вид

Предел выносливости образца при симметричном нагружении (амплитуда напряжений), МПа	210
Постоянная КУ для образца, 1e5	0.56

*Модель №4 – Описание согласно РД-50-694-90*

Данная модель применяется при вероятностных расчетах на усталость сварных конструкций, регламентированных руководящим документом РД-50-694-90.

Характеристики сопротивления усталости сварных соединений и элементов конструкции определяются с учетом вероятности отказа и включают параметры  $\overline{\sigma}_R$ ,  $S_{\sigma_R}$  распределения предела выносливости и параметры  $\overline{\sigma}_R$ ,  $A_R$ ,  $B_R$  уравнения медианной кривой усталости вида

$$\sigma = \overline{\sigma}_R \cdot e^{\frac{A_R}{N+B_R}}$$

Кривая усталости по параметру вероятности отказа выражается уравнением

$$\sigma(P, N) = \sigma_R(p) \cdot e^{\frac{A_R}{N^{(P)}+B_R}}$$

в котором параметры  $A_R$  и  $B_R$  от вероятности отказа  $P$  не зависят.

Для определения числа циклов регулярного нагружения ( $N$ ) от величины амплитуды цикла нагружения ( $\sigma$ ) используется зависимость:

$$N(P) = \frac{A_R}{\ln(\sigma) - \ln(\sigma_R(P))} - B_R$$

Окно задания параметров кривой усталости имеет следующий вид

Предел выносливости образца при симметричном нагружении (амплитуда напряжений), МПа	210
Параметр А, 1е5	1
Параметр В, 1е5	1

*Модель №5*

Данная модель соответствует *Модели №2*. Отличие заключается в описании параметров кривой усталости. Вместо набора величин  $\sigma_{-1}$ ,  $m_1$ ,  $m_2$  используются параметры:  $b_1$ ,  $b_2$ .

$SAI1$  – виртуальная точка пересечения первого участка кривой усталости с осью амплитуд (в логарифмических координатах):

$$SAI1 = S_f \cdot N_0^{b_1}$$

$b_1$ ,  $b_2$  – показатели наклона ветвей кривой усталости в двойных логарифмических координатах:

$$b_1 = \frac{1}{m_1}, \quad b_2 = \frac{1}{m_2}$$

Окно задания параметров кривой усталости имеет следующий вид

SAI: Точка пересечения кривой с осью амплитуд, МПа	1 000
B1: Тангенс угла наклона КЧ (участок 1)	0.17
Nc1: Точка перелома кривой усталости, млн. циклов	10
B2: Тангенс угла наклона КЧ (участок 2)	0.02
Sf: Точка перелома кривой усталости, МПа	64.57

### 1.3.1.3.3. Расчет приведенных амплитуд

Свойства сопротивления усталости стандартного образца обычно исследуются для регулярного цикла нагружения. В этом случае кривая усталости описывает зависимость между амплитудой напряжений симметричного цикла нагружения и сроком службы образца. Вместе с тем в реальных условиях эксплуатации детали машин подвергаются несимметричному нагружению.

Для учета несимметрии циклов нагружения обычно применяются следующие два подхода.

- Первый метод используется в случае регулярного нагружения. Характеристики усталостной прочности определяются с использованием диаграммы предельных амплитуд, нагруженность определяется с учетом распределения амплитуд.
- Второй метод базируется на формировании однопараметрического распределения приведенных амплитуд. Вместо амплитуд несимметричного цикла рассматриваются эквивалентные по повреждающему воздействию амплитуды симметричного цикла. Приведение используется только в случае положительного среднего напряжения. Таким образом, предполагается, что сжимающие напряжения не меняют свойств сопротивления усталости. Именно этот метод и реализован в модуле UM Durability.

В UM Durability реализованы следующие методы коррекции среднего<sup>3</sup>:

- *Модель Кинасошвилли*

Формула для вычисления приведенной амплитуды:

$$\sigma_{a_{np}} = \sigma_a + \psi \cdot \sigma_m, \text{ где}$$

$\psi$  – коэффициент чувствительности к асимметрии цикла нагружения.

- *Модель Зодерберга*

Формула для вычисления приведенной амплитуды:

$$\sigma_{a_{np}} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_T}\right)\right)}, \text{ где}$$

$\sigma_T$  – предел текучести материала при растяжении.

---

<sup>3</sup> Фактически это методы приведения амплитуд несимметричного цикла (с ненулевым средним значением процесса) к амплитудам симметричного цикла, которые используются при экспериментальном определении кривой усталости.

- Модель Гербера

Формула для вычисления приведенной амплитуды:

$$\sigma_{a_{np}} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B}\right)^2\right)}, \text{ где}$$

$\sigma_B$  – предел прочности материала при растяжении.

- Модель Гудмана

Формула для вычисления приведенной амплитуды:

$$\sigma_{a_{np}} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B}\right)\right)}.$$

*Распределение приведенных амплитуд* формируется по следующему алгоритму.

- Формируется двухпараметрическая таблица циклов нагружения в зависимости от среднего напряжения цикла и амплитуды цикла. В каждую ячейку таблицы записывается относительная доля количества циклов нагружения для данного среднего значения и амплитуды.
- Могут быть учтены остаточные или температурные напряжения. В этом случае они добавляются к расчетному среднему значению интервалов.
- Если указана нижняя граница повреждающих  $\sigma_a^{lim}$  напряжений, то амплитуды напряжений ниже этой границы не рассматриваются.
- Для каждой ненулевой ячейки таблицы распределения запускается процедура коррекции среднего с помощью одного из методов, описанных выше, что в результате дает приведенную амплитуду.

### 1.3.1.4. Анализ результатов расчета долговечности

Результаты расчета долговечности представлены на закладке **Долговечность | Результаты**.

Результаты расчета можно просмотреть в разрезе узлов конечно-элементной сетки и в разрезе частных и смешанного блоков нагружения.

### 1.3.1.5. Список узлов

Закладка **Долговечность | Результаты | Список узлов** позволяет исследователя получить таблицу с основными характеристиками нагруженности и долговечности для узлов конечно-элементной сетки для выделенного частного или смешанного блока нагружения.

Номер...	Группы узлов	Максимальная амплитуда, МПа	Эквив. ампл. блока, МПа	Циклов/сек	Повреждение за 1 сек. *1e8	секунды	Срок службы, лет
99	Верхняя пластина	6.321	0.431	180	1.69E03	5.92E04	0.0185
98	Верхняя пластина	10.742	0.724	182	1.71E03	5.84E04	0.0183
97	Верхняя пластина	16.164	1.070	189	1.78E03	5.61E04	0.0175
96	Верхняя пластина	2.836	0.194	181	1.69E03	5.93E04	0.0185
95	Верхняя пластина	28.501	2.014	163	1.55E03	6.44E04	0.0201
94	Верхняя пластина	26.850	1.912	161	1.54E03	6.51E04	0.0203
93	Верхняя пластина	25.616	1.831	161	1.53E03	6.53E04	0.0204
92	Верхняя пластина	24.842	1.777	161	1.53E03	6.53E04	0.0204
91	Верхняя пластина	24.309	1.730	162	1.54E03	6.51E04	0.0203
90	Верхняя пластина	23.907	1.690	163	1.54E03	6.48E04	0.0202
89	Верхняя пластина	23.561	1.656	164	1.56E03	6.42E04	0.02
88	Верхняя пластина	23.247	1.624	165	1.57E03	6.37E04	0.0199
87	Верхняя пластина	22.886	1.595	165	1.57E03	6.38E04	0.0199
86	Верхняя пластина	22.423	1.552	168	1.6E03	6.27E04	0.0196
85	Верхняя пластина	21.812	1.500	171	1.63E03	6.15E04	0.0192
84	Верхняя пластина	21.015	1.446	172	1.63E03	6.13E04	0.0192
83	Верхняя пластина	20.030	1.369	175	1.66E03	6.02E04	0.0188
82	Верхняя пластина	18.886	1.291	176	1.67E03	6E04	0.0187
81	Верхняя пластина	17.684	1.194	183	1.73E03	5.77E04	0.018
80	Верхняя пластина	16.910	1.136	185	1.75E03	5.7E04	0.0178
79	Верхняя пластина	16.692	1.130	180	1.7E03	5.88E04	0.0184
78	Верхняя пластина	27.319	1.923	164	1.56E03	6.42E04	0.0201
77	Верхняя пластина	25.908	1.845	161	1.53E03	6.53E04	0.0204
76	Верхняя пластина	24.751	1.776	160	1.52E03	6.59E04	0.0206

Рис. 1.30. Результаты расчета долговечности. Список узлов.

- **Максимальная амплитуда, МПа**

Правая граница распределения приведенных амплитуд циклов нагружения в узле для выбранного режима нагружения. При автоматическом расчете ширины интервала соответствует максимальной приведенной амплитуде, при заданной ширине интервала – правая граница крайнего интервала, относительная доля циклов для которого не равна нулю.

- **Эквив. ампл. блока, МПа**

Амплитуда регулярного нагружения с тем же числом циклов нагружения, эквивалентная по повреждающему воздействию.

- Циклов в единицу срока службы, см. п. 1.2.1.5. "Приведение результатов схематизации к единицам срока службы", с. 1-19.
- Повреждение за единицу срока службы
- Срок службы в выбранных единицах срока службы
- Срок службы, лет
- Коэф. запаса по сроку службы
- Комментарий

### 1.3.1.6. Результаты расчета долговечности для отдельного узла

Закладка Долговечность | Результаты | Отдельный узел. Список выводимых параметров аналогичен предыдущему пункту, см. п. 1.3.1.5. "Список узлов", с. 1-60.

### 1.3.1.7. Результаты расчета нагруженности

Результаты расчета нагруженности в табличной и графической форме представлены на закладке Долговечность | Результаты | Нагруженность.

#### 1.3.1.7.1. Табличное представление


В таблице приведены данные по приведенным напряжениям, полученным в соответствии с п. 1.3.1.3.3. "Расчет приведенных амплитуд", с. 1-58.

№	Интервал напряжений, МПа	Среднее напряжение, МПа	Вероятность, %	Число циклов
1	[0.0715741..0.208523]	0.140049	85.91	141.20
2	[0.208523..0.345472]	0.276998	0.64	1.05
3	[0.345472..0.482421]	0.413947	0.32	0.53
4	[0.482421..0.61937]	0.550896	0.16	0.26
5	[0.61937..0.756319]	0.687845	0.32	0.53
6	[0.756319..0.893269]	0.824794	0.32	0.53
7	[0.893269..1.03022]	0.961743	0.64	1.05
8	[1.03022..1.16717]	1.09869	0.80	1.32
9	[1.16717..1.30412]	1.23564	1.28	2.11
10	[1.30412..1.44106]	1.37259	0.32	0.53
11	[1.44106..1.57801]	1.50954	0.48	0.79
12	[1.57801..1.71496]	1.64649	0.32	0.53
13	[1.71496..1.85191]	1.78344	0.16	0.26
14	[1.85191..1.98886]	1.92039	0.32	0.53
15	[1.98886..2.12581]	2.05734	0.32	0.53
16	[2.12581..2.26276]	2.19428	0.48	0.79
17	[2.26276..2.39971]	2.33123	1.92	3.16
18	[2.39971..2.53666]	2.46818	1.76	2.89

Рис. 1.31. Результаты расчета нагруженности

### 1.3.1.7.2. Графическое представление

Для визуализации распределения приведенных амплитуд для некоторого узла конечно-элементной сетки в том или ином режиме нагружения выполните следующие шаги:

- выберите закладку **Долговечность | Результаты | Нагруженность**;
- на закладке выберите номер узла и режим нагружения для визуализации;
- щелкните кнопку  или выберите пункт **Показать как гистограмму** из контекстного меню, см. рис. 1.32.

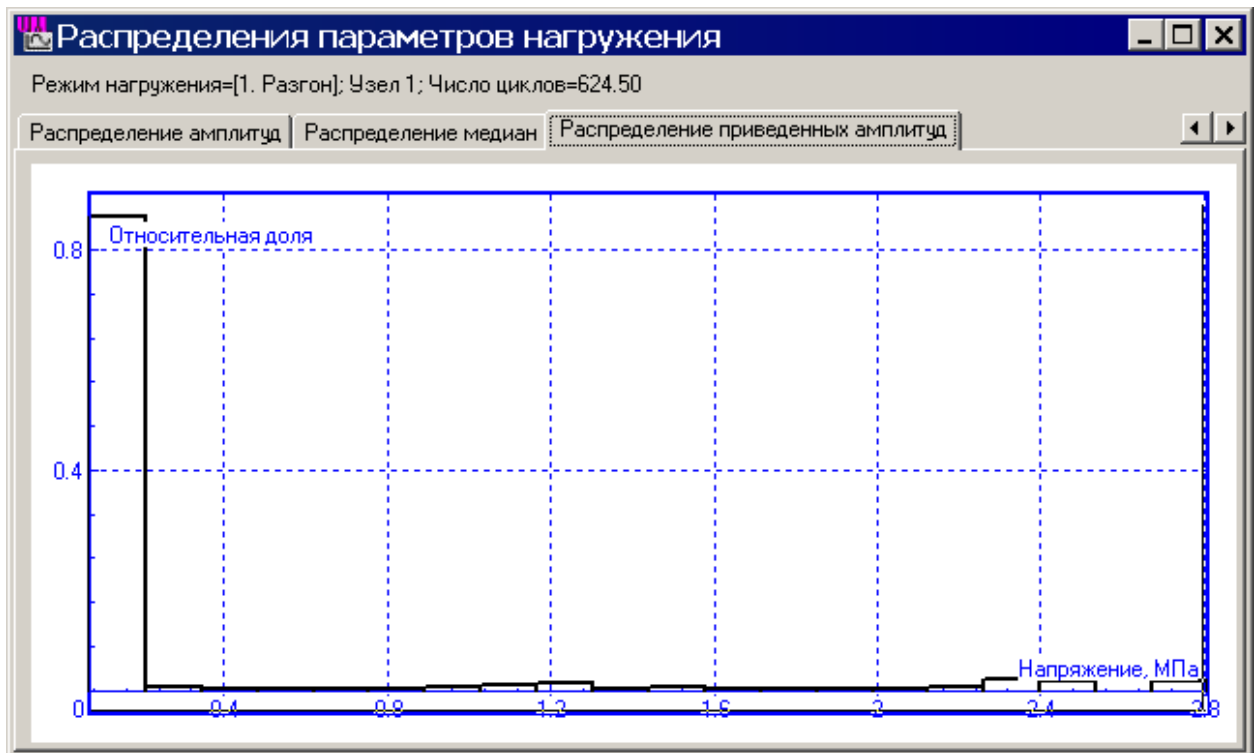


Рис. 1.32. Распределение приведенных амплитуд

### 1.3.1.8. Визуализация результатов на конечно-элементной сетке

Для визуализации результатов расчета долговечности на конечно-элементной сетке выберите закладку **Долговечность | Результаты | Визуализация**, выберите данные для визуализация, частный или смешанный режим нагружения и нажмите кнопку **Показать**. Откроется анимационное окно, в котором можно управлять параметрами раскраски, а также визуально выбирать наиболее нагруженные узлы. Подробнее о функциях анимационного окна см. п. 1.2.5.4. *"Визуализация результатов расчета"*, с. 1-43.

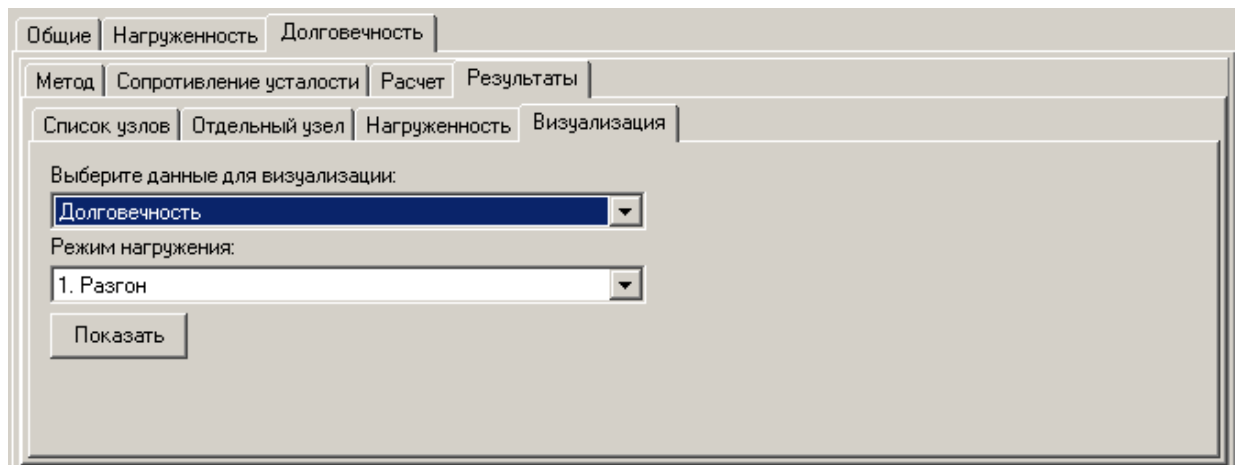


Рис. 1.33. Визуализация результатов расчета долговечности

## 1.4. Методики оценки усталостной долговечности

### 1.4.1. Вагонная методика

Данная методика основывается на положениях норм [1]. Исходная процедура расчета, регламентированная нормами, расширена рядом дополнительных вариантов расчета.

В качестве краткой характеристики можно выделить следующие особенности методики:

- В качестве исходных данных по нагруженности могут использоваться как распределения приведенных амплитуд циклов, так и спектральные характеристики процесса нагружения.
- Расчет основывается на линейной модели накопления усталостных повреждений.
- Кривая усталости описывается прямой в двойных логарифмических координатах.
- Расчетными единицами являются коэффициент запаса по приведенным эквивалентным амплитудам, срок службы объекта либо пробег до отказа.

В данном разделе приводится описание настроек, расчетных параметров и алгоритмов расчета.

#### 1.4.1.1. Описание нагруженности

Описание основывается на результатах предшествующего расчета, см. п. 1.2. "Анализ эксплуатационной нагруженности", с. 1-7 и имеет ряд характерных особенностей.

Задание параметров осуществляется на закладке **Долговечность | Метод | Нагруженность**.

Общие | Нагруженность | Долговечность

Метод | Контрольные зоны | Расчет | Результаты

Метод расчета: **Расчёт на многоцикловую усталость по вагонным нормам**

Описание нагруженности | Параметры расчета долговечности

Тип данных о нагруженности: Распределение приведенных амплитуд

Распределение приведенных амплитуд

Метод учета средних напряжений: (не учитывать)

Граница повреждающих амплитуд, МПа: 0  Задать долей от ПВ

Доля от предела выносливости: 0

Единицы срока службы

Расчетная единица срока службы: Секунда работы

Задать относительные доли режимов за выбранную единицу срока службы

Алгоритм определения числа циклов нагружения

Алгоритм определения: Центральная частота: задание для эксплуатационного

Алгоритм вычисления центральной частоты

Центральная частота процесса нагружения, Гц: 2.3

Закреть

Рис. 1.34. Параметры учета нагруженности

### Тип исходных данных

Нормы предусматривают использование двух типов *исходных данных по нагруженности*.

В первом случае нагруженность описывается *распределением амплитуд процесса* эксплуатационного нагружения. Во втором случае используются данные *спектрального анализа* реализаций напряжений, а именно – значения среднеквадратических отклонений процессов. Каждому из вариантов соответствуют собственные алгоритмы расчета показателей усталостной долговечности.

**Замечание.** Нормативные документы [1] предписывают использовать описание нагруженности по спектрам только в тех случаях, если процесс нагружения является узкополосным, а распределение динамических напряжений – нормальным. В прочих случаях следует применять описание в форме распределений амплитуд нагружения.

**Внимание** Расчет усталостной долговечности с приведением к километру пути доступен только при использовании в качестве исходных данных по нагруженности результатов схематизации процесса нагружения.

Назначение типа исходных данных осуществляется путем выбора из выпадающего списка на закладке **Метод | Нагруженность**.

### Метод учета средних напряжений<sup>4</sup>

Нормативные документы [1] предписывают использовать в качестве исходных данных по нагруженности распределение амплитуд циклов нагружения. При этом влиянием средних значений циклов предложено пренебречь.

В большинстве литературных источников отмечается значительное влияние средних напряжений циклов нагружения на свойства сопротивления усталости. Вследствие этого в программе предусмотрен выбор типа приведения амплитуд несимметричного нагружения к амплитудам эквивалентного симметричного, см. п. 1.2.1.3. "*Частные блоки нагружения*", с. 1-13.

Пользователь может отказаться от формирования распределения приведения амплитуд, выбрав опцию «**Не учитывать**».

### Граница повреждающих амплитуд\*

Данное значение используется при формировании *однопараметрических распределений приведенных амплитуд процесса* нагружения, см. п. 1.2.1.3. "*Частные блоки нагружения*" с. 1-13.

---

<sup>4</sup>Данная опция доступна при описании нагруженности в виде распределением амплитуд процесса, см. **Тип исходных данных**

Граница может быть задана как значением, так и долей от значения предела выносливости, определенного для группы узлов. Для этого необходимо пометить флажком опцию **Задать доли от ПВ**.

### **Определение числа циклов нагружения**

В вагонной методике число циклов нагружения может быть определено по нескольким алгоритмам.

Нормативные документы [1] в качестве расчетной единицы предписывают использовать срок службы объекта и принимать число циклов нагружения за секунду движения равным центральной частоте процесса нагружения.

Значение центральной частоты эксплуатационного режима может быть задано пользователем в поле **Центральная частота эксплуатационного процесса нагружения, Гц**, либо рассчитано в соответствии с алгоритмами, описанными в п. 1.2.4.2.1. *"Настройки расчета нагруженности для вагонной методики"*, с. 1-37.

**Замечание.** Значения центральных частот процесса определяются только в процессе расчета нагруженности. Следовательно, для использования этих данных необходимо, чтобы при расчете нагруженности соответствующие опции были выбраны на закладке **Нагруженность | Настройки | Вагонная методика**.

Альтернативой определению числа циклов по центральной частоте является использование результатов схематизации процессов нагружения. В этом случае, в зависимости от выбранного типа результатов расчета, используются алгоритмы приведения числа циклов нагружения либо к секунде движения (при расчете долговечности), либо к километру пройденного пути (при расчете пробега до отказа), см. п. 1.2.1.5. *"Приведение результатов схематизации к единицам срока службы"*, с. 1-19.

### 1.4.1.2. Параметры расчета долговечности

Задание параметров осуществляется на закладке **Долговечность** | **Метод** | **Долговечность**.

Рис. 1.35. Параметры долговечности

#### Вероятность безотказной работы

Данный параметр определяет значение величины предела выносливости. Принимается, что величина предела выносливости детали распределена по нормальному закону. Для описания распределения используется медианное значение  $\bar{S}_f$  (соответствующее вероятности разрушения 50%) и коэффициент вариации предела выносливости  $v_{S_f}$ . Эти значения задаются для каждой из групп узлов (см. п. 1.4.1.3. "Задание свойств сопротивления усталости", с. 1-69) и позволяют определить расчетную величину предела выносливости  $S_f$  по формуле:

$$S_f = \bar{S}_f \cdot (1 - Z_p \cdot v_{S_f}), \text{ где}$$

$Z_p$  – квантиль нормального распределения, соответствующий вероятности  $P$

#### Модель накопления усталостных повреждений

Вагонная методика использует линейную модель накопления усталостных повреждений Пальмгрена-Майнера.

#### Единица срока службы

В качестве единицы срока службы может выступать секунда работы либо километр пробега.

Если число циклов нагружения определяется по результатам схематизации, то выбор расчетной единицы определяет способ приведения, см. п. 1.2.1.5. *"Приведение результатов схематизации к единицам срока службы"*, с. 1-19.

Если расчетной единицей является секунда, то расчет ведется по числу циклов на секунду работы, если километр пробега – по числу циклов на километр пути.

**Внимание.** Поскольку при описании эксплуатационного нагружения используются значения относительных долей режимов нагружения, то к их заданию нужно относиться с особым вниманием. Значения относительных долей режимов движения по времени и относительные доли пробега в заданном режиме во многих случаях не совпадают.

### Коэффициент перевода

Данный коэффициент используется для перевода расчетных единиц срока службы в календарные годы.

Если расчетной величиной является пробег до отказа, то задается коэффициент, определяющий годовой пробег.

Если расчетной величиной является долговечность, то задается коэффициент, определяющий число секунд непрерывной работы за календарный год. Нормы вагоностроения для оценки числа секунд движения за год службы  $B$  предлагают следующую формулу:

$$B = 365 \cdot \frac{10^3 \cdot \overline{\mathfrak{S}}_c}{\overline{V}}, \text{ где}$$

$\overline{\mathfrak{S}}_c$  – проектный среднесуточный пробег вагона, км/сутки;

$\overline{V}$  – средняя техническая скорость движения вагона, м/с.

### Расчет коэффициента запаса

Для расчета коэффициента запаса необходимо указать проектный срок службы объекта в годах эксплуатации. Это значение наряду с коэффициентом перевода позволяет получить проектный срок службы в выбранных единицах приведения.

Описание алгоритмов расчета коэффициента запаса приводится в п. 1.4.1.4. *"Процедура расчета"*, с. 1-71.

### 1.4.1.3. Задание свойств сопротивления усталости

В вагонной методике используется *Модель №1* кривой усталости, стр. 1-55 .

Задание свойств групп осуществляется на закладке **Долговечность | Сопротивление усталости**.

Окно **Свойства группы** вагонной методики позволяет выбрать материал группы, скорректировать значение и коэффициент вариации предела выносливости, а также задать допускаемое значение коэффициента запаса и величину остаточных/температурных напряжений.

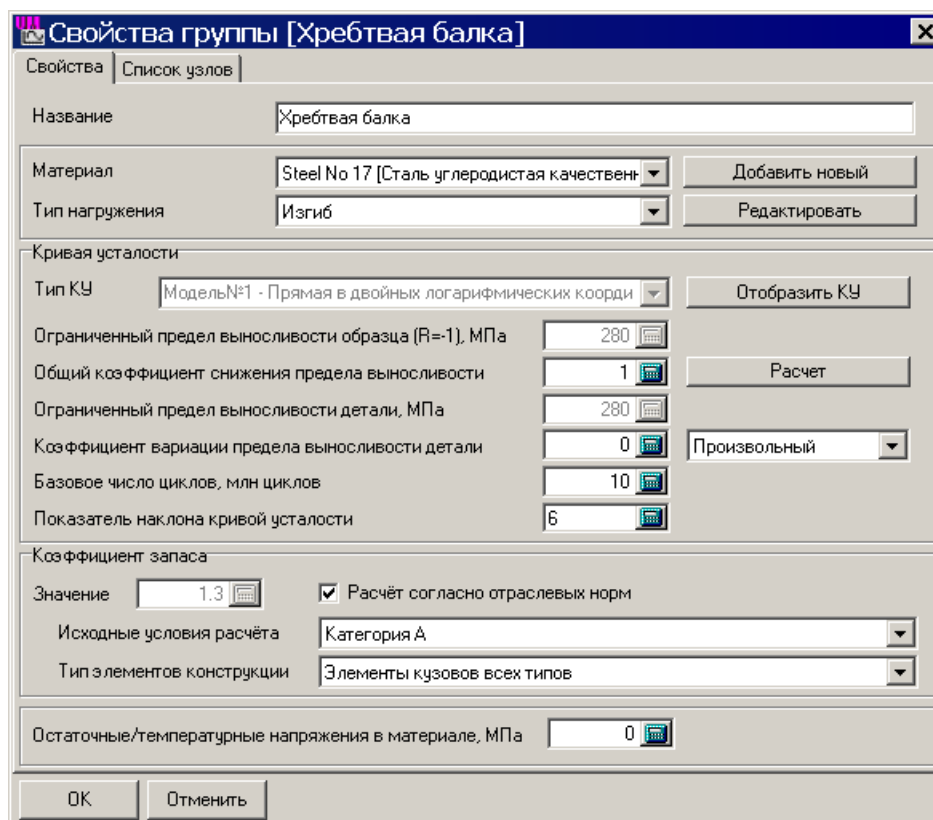


Рис. 1.36. Свойства сопротивления усталости

Поля **Ограниченный предел выносливости образца**, **Базовое число циклов**, **Показатель наклона кривой усталости** автоматически инициализируются в соответствии с описанием выбранного материала и его типа работы, см. п. 1.3.1.3.1. "*Справочник материалов*", с. 1-53.

**Общий коэффициент снижения предела выносливости** может быть задан значением либо рассчитан в соответствии с приближенной формулой:

$$K_f = \overline{K_\sigma} \cdot \frac{K_H \cdot K_y}{K_M \cdot K_{пов}} \cdot M, \text{ где}$$

$\overline{K_\sigma}$  – эффективный коэффициент концентрации напряжений, учитывающий снижение свойств сопротивления усталости в связи с местными изменениями формы и размеров детали;

$K_H$  – коэффициент неоднородности материала;

$K_y$  – коэффициент влияния упрочняющей обработки;

$K_M$  – коэффициент влияния размеров детали;

$K_{пов}$  – коэффициент влияния качества поверхности детали;

$M$  – множитель, который позволяет учесть влияние других факторов.

Для задания указанных коэффициентов необходимо нажать кнопку **«Расчет»** и в открывшемся окне задать принятые значения.

Параметр	Значение
Результат	4.48443
Эффективный коэффициент концентрации напряжений	1
Коэффициент неоднородности материала	1.2
Коэффициент влияния упрочняющей обработки	0.9
Коэффициент влияния размеров детали	0.85
Коэффициент влияния качества поверхностной обработки	0.85
Множитель	3

Рис. 1.37. Коэффициент снижения предела выносливости

Значение коэффициента запаса может быть задано вручную (в поле **«Значение»**), либо выбрано в соответствии с положениями норм вагоностроения. Для этого необходимо установить метку в поле **«Расчет согласно отраслевым норм»**

Значение, указанное в поле **«Остаточные/температурные напряжения в материале»** учитывается при вычислении распределений приведенных амплитуд в узлах группы, см. п. 1.2.1.3 *«Частные блоки нагружения»*, с. 1-13.

#### 1.4.1.4. Процедура расчета

В данном разделе приведены алгоритмы расчета показателей усталостной долговечности, описаны промежуточные и основные результаты расчета по вагонной методике.

##### Внимание

Расчет ведется в соответствии с *линейной моделью накопления усталостных повреждений*. Для описания свойств сопротивления усталости применяется *Модель №1*.

Рассмотрим основные этапы расчета при использовании в качестве исходных данных по нагруженности распределений приведенных амплитуд:

- Формирование *распределений приведенных амплитуд* нагружения. Распределения формируются на основании рассчитанных заранее *двухпараметрических распределений параметров нагружения* (см. п. 1.2.1.3. "*Частные блоки нагружения*", с. 1-13) в узлах группы с учетом выбранного алгоритма учета средних напряжений цикла (см. п. 1.4.1.1. "*Описание нагруженности*", с. 1-64) и заданных для группы *остаточных/температурных напряжений* (см. п. 1.4.1.3. "*Задание свойств сопротивления усталости*", с. 1-69). При формировании учитывается значение *границы повреждающих амплитуд* (см. п. 1.4.1.1. "*Описание нагруженности*", с. 1-64).
- Вычисление *эквивалентных амплитуд блоков нагружения*  $\sigma_{a,\varepsilon}^{<k>}$  – амплитуд регулярного нагружения, вносящих за число циклов, содержащихся в блоке, такое же повреждение, что и блок с заданным распределением амплитуд.

$$\sigma_{a,\varepsilon}^{<k>} = \sqrt[m]{\sum_i t_i^{<k>} \cdot \sigma_i^{<k>}}, \text{ где}$$

$\sigma_i^{<k>}$  – характерное значение *i*-ого интервала распределения приведенных амплитуд ЧБН<k>;

$t_i^{<k>}$  – относительная доля циклов нагружения, параметры которых позволяют отнести их к *k*-ому интервалу распределения приведенных амплитуд ЧБН<k>;

*m* – показатель наклона кривой усталости в логарифмических координатах.

- Расчет *повреждения, накопленного на каждом из режимов работы за единицу срока службы* (секунда работы, километр пути).

Используется две оценки:

- по значению предела выносливости взятого без коэффициента запаса (используется для расчета *приведенной эквивалентной амплитуды*)

$$P_{ед}^{<k>} = \frac{n_{ед}^{<k>}}{N_0} \cdot \left( \frac{\sigma_{a,\varepsilon}^{<k>}}{\sigma_{-1}} \right)^m.$$

- по значению предела выносливости взятого с коэффициентом запаса (используется при расчете показателей срока службы)

$$P_{ед}^{<k>} [n] = \frac{n_{ед}^{<k>}}{N_0} \cdot \left( \frac{\sigma_{a,э}^{<k>}}{\sigma_{-1}} \cdot [n] \right)^m, \text{ где}$$

$n_{ед}^{<k>}$  – число циклов k-ого режима за единицу срока службы;

$\sigma_{-1}$  – предел выносливости;

$N_0$  – базовое число циклов нагружения;

$[n]$  – коэффициент запаса (см. п. 1.4.1.3. "Задание свойств сопротивления усталости", с. 1-69).

- Расчет *повреждения, накопленного в условиях эксплуатации, описанных набором частных режимов, за единицу срока службы* (секунда работы, километр пути).

$$P_{ед}^{<СБН>} = \sum_k C^{<k>} \cdot P_{ед}^{<k>}, P_{ед}^{<СБН>} [n] = \sum_k C^{<k>} \cdot P_{ед}^{<k>} [n], \text{ где}$$

$C^{<k>}$  – относительная доля k-ого рабочего режима во времени эксплуатации объекта, либо в пробеге за единицу срока службы.

- Расчет *числа циклов эксплуатационного нагружения* за единицу срока службы

$$n_{ед}^{<СБН>} = \sum_k C^{<k>} \cdot n_{ед}^{<k>}$$

- Расчет *приведенной эквивалентной амплитуды* – амплитуды динамического напряжения условного симметричного цикла, приведенной к базе  $N_0$ , эквивалентная по повреждающему действию реальному режиму эксплуатационных случайных напряжений за проектный срок службы.

$$\begin{aligned} \sigma_{R,э} &= \sqrt[m]{B \cdot [T_k] \cdot P_{ед}^{<СБН>} \cdot \sigma_{-1}} = \sqrt[m]{B \cdot [T_k] \cdot \sum_k C^{<k>} \cdot P_{ед}^{<k>} \cdot \sigma_{-1}} = \\ &= \sqrt[m]{\frac{B \cdot [T_k]}{N_0} \cdot \sum_k C^{<k>} \cdot n_{ед}^{<k>} \cdot \sum_i t_i^{<k>} \cdot (\sigma_i^{<k>})^m}, \text{ где} \end{aligned}$$

$B$  – коэффициент, равный числу единиц срока службы за год эксплуатации;

$[T_k]$  – календарный срок службы объекта, заданный пользователем.

- Расчет *коэффициента запаса по приведенной эквивалентной амплитуде*

$$n_{R,э} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{R,э}}$$

- Расчет *срока службы* в выбранных единицах

$$T_{\text{сек}} = \frac{1}{\Pi_{\text{сек}}^{<\text{СБН}> [n]}} = \frac{\left(\frac{\sigma_{-1}}{[n]}\right)^m \cdot N_0}{\sum_k C^{<k>} \cdot n_{\text{сек}}^{<k>} \cdot \sum_i t_i^{<k>} \cdot (\sigma_i^{<k>})^m}$$

$$L_{\text{км}} = \frac{1}{\Pi_{\text{км}}^{<\text{СБН}> [n]}} = \frac{\left(\frac{\sigma_{-1}}{[n]}\right)^m \cdot N_0}{\sum_k C^{<k>} \cdot n_{\text{км}}^{<k>} \cdot \sum_i t_i^{<k>} \cdot (\sigma_i^{<k>})^m}$$

- Расчет *календарного срока службы*

$$T_k = \frac{T_{\text{сек}}}{B_{\text{сек/год}}}, \quad T_k = \frac{L_{\text{км}}}{B_{\text{км/год}}}$$

- Расчет *коэффициента запаса по сроку службы*

$$n_T = \frac{T_k}{[T_k]}$$

Рассмотрим основные этапы расчета при использовании в качестве исходных данных по нагруженности значений СКО процесса нагружения:

- Расчет *приведенной эквивалентной амплитуды* – амплитуды динамического напряжения условного симметричного цикла, приведенной к базе  $N_0$ , эквивалентная по повреждающему действию реальному режиму эксплуатационных случайных напряжений за проектный срок службы.

$$\sigma_{R,\text{э}} = \sqrt{\frac{B \cdot [T_k]}{N_0} \cdot A \cdot \sum_k C^{<k>} \cdot n_{\text{эд}}^{<k>} \cdot (S_{\sigma}^{<k>})^m}, \text{ где}$$

$A = 2^{\frac{m}{2}} \cdot \Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right)$  – функция показателя  $m$  кривой усталости;

$S_{\sigma}^{<k>}$  – значение СКО, рассчитанное по реализации  $k$ -ого режима работы.

- Расчет *коэффициента запаса по приведенной эквивалентной амплитуде*

$$n_{R,\text{э}} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{R,\text{э}}}$$

- Расчет *срока службы* в секундах движения

$$T_{\text{сек}} = \frac{\left(\frac{\sigma_{-1}}{[n]}\right)^m \cdot N_0}{A \cdot \sum_k C^{<k>} \cdot n_{\text{сек}}^{<k>} \cdot (S_{\sigma}^{<k>})^m}$$

- Расчет *календарного срока службы*

$$T_k = \frac{T_{\text{сек}}}{B_{\text{сек/год}}}$$

- Расчет *коэффициента запаса по сроку службы*

$$n_T = \frac{T_k}{[T_k]}$$

## 1.4.2. S-N методика

Данную методику характеризуют следующие особенности:

- Исходными данными по нагруженности являются распределения приведенных амплитуд циклов.
- Расчет основывается на линейной модели накопления усталостных повреждений.
- Кривая усталости описывается двумя прямыми в двойных логарифмических координатах.
- Результатами расчета являются срок службы объекта в выбранных единицах. Пользователь может использовать в качестве единицы срока службы стандартные (секунду работы, километр пробега), либо определить собственную единицу.

В данном разделе приводится описание настроек, расчетных параметров и алгоритмов расчета.

### 1.4.2.1. Описание нагруженности

Описание основывается на результатах предшествующего расчета, см. п. 1.2. "Анализ эксплуатационной нагруженности", с. 1-7 и имеет ряд характерных особенностей.

Задание параметров осуществляется на закладке **Долговечность | Метод | Нагруженность**.

Общие | Нагруженность | Долговечность

Метод | Контрольные зоны | Расчет | Результаты

Метод расчета: S-N метод

Описание нагруженности | Параметры расчета долговечности

Распределение приведенных амплитуд

Метод учета средних напряжений: (не учитывать)

Граница повреждающих амплитуд, МПа: 0.5  Задать долей от ПВ

Доля от предела выносливости: 0

Относительные доли режимов нагружения

Единица срока службы: Другая единица срока службы (задается пользователем)

Название единицы срока службы: default unit

Задать относительные доли режимов за выбранную единицу срока службы

### Метод учета средних напряжений<sup>5</sup>

В программе предусмотрен выбор типа приведения амплитуд несимметричного нагружения к амплитудам эквивалентного симметричного.

Пользователь может отказаться от формирования распределения приведения амплитуд, выбрав опцию «Не учитывать».

---

<sup>5</sup>Данная опция доступна при описании нагруженности в виде распределения амплитуд процесса, см. **Тип исходных данных**

### Граница повреждающих амплитуд\*

Данное значение используется при формировании *однопараметрических распределений приведенных амплитуд процесса нагружения*, см. п. 1.2.1.3. "*Частные блоки нагружения*", с. 1-13.

Граница может быть задана как значением, так и долей от значения предела выносливости, определенного для группы узлов. Для этого необходимо пометить флажком опцию **Задать долей от ПВ**.

#### 1.4.2.2. Параметры расчета долговечности

Задание параметров осуществляется на закладке **Долговечность | Метод | Долговечность**.

The screenshot shows a software interface for setting durability parameters. It includes tabs for 'General', 'Load', and 'Durability'. Under 'Durability', there are sub-tabs for 'Method', 'Resistance to fatigue', 'Calculation', and 'Results'. The 'Calculation' sub-tab is active, showing the 'S-N method' selected. Below this, there are two sub-tabs: 'Description of loading' and 'Durability calculation parameters'. The 'Probability of failure-free operation' is set to 50% on a scale from 1 to 99.9. Under 'Parameters', the 'Damage accumulation model' is set to 'Linear damage accumulation model'. The 'Conversion coefficient' is 3 200 000. The 'Calculate safety factor' checkbox is checked. The 'Design service life' is set to 32 years.

Рис. 1.38. Параметры расчета долговечности

#### Вероятность безотказной работы

Данный параметр определяет значение величины предела выносливости. Принимается, что величина предела выносливости детали распределена по нормальному закону. Для описания распределения используется медианное значение  $\overline{S}_f$  (соответствующее вероятности разрушения 50%) и коэффициент вариации предела выносливости  $v_{S_f}$ . Эти значения задаются для каждой из групп узлов (см. п. 1.4.1.3. "*Задание свойств сопротивления усталости*", с. 1-69) и позволяют определить расчетную величину предела выносливости  $S_f$  по формуле:

$$S_f = \overline{S}_f \cdot (1 - Z_p \cdot v_{S_f}), \text{ где}$$

$Z_p$  – квантиль нормального распределения, соответствующий вероятности  $P$

### Модель накопления усталостных повреждений

SN методика использует линейную модель накопления усталостных повреждений Пальмгрена-Майнера.

#### Расчетная величина

Результатом расчета является долговечность объекта, выраженная в единицах срока службы.

В качестве единицы срока службы может выступать:

- секунда работы;
- километр пробега;
- условная величина, определяемая пользователем.

Календарный срок службы может быть получен, посредством задания числа расчетных единиц приходящихся на год эксплуатации, см. далее **Коэффициент перевода**.

Выбор расчетной величины определяет способ приведения числа циклов блока нагружения, см. п. 1.2.1.5. "*Приведение результатов схематизации к единицам срока службы*", с. 1-19.

#### Коэффициент перевода

Данный коэффициент используется для перевода расчетных единиц срока службы в календарные годы.

Если расчетной величиной является пробег до отказа, то задается коэффициент, определяющий годовой пробег.

Если расчетной величиной является долговечность, то задается коэффициент, определяющий число секунд непрерывной работы за календарный год. Нормы вагоностроения для оценки числа секунд движения за год службы  $V$  предлагают следующую формулу:

$$V = 365 \cdot \frac{10^3 \cdot \overline{S}_c}{\overline{V}}, \text{ где}$$

$\overline{S}_c$  – проектный среднесуточный пробег вагона, км/сутки;

$\overline{V}$  – средняя техническая скорость движения вагона, м/с.

#### Расчет коэффициента запаса

Для расчета коэффициента запаса необходимо указать проектный срок службы объекта в годах эксплуатации. Это значение наряду с коэффициентом перевода позволяет получить проектный срок службы в выбранных единицах приведения.

Описание алгоритмов расчета коэффициента запаса приводится в п. 1.4.2.4. "*Процедура расчета*", с. 1-80.

### 1.4.2.3. Задание свойств сопротивления усталости

В вагонной методике используется *Модель №5* кривой усталости.

Задание свойств групп осуществляется на закладке **Долговечность | Контрольные зоны**.

Окно **Свойства группы** вагонной методики позволяет выбрать материал группы, скорректировать значение и коэффициент вариации предела выносливости, а также задать значение коэффициента запаса и величину остаточных/температурных напряжений.

Рис. 1.39. Свойства сопротивления усталости

Поля **Ограниченный предел выносливости образца материала**, **Базовое число циклов нагружения**, **Показатель наклона кривой усталости** автоматически инициализируются в соответствии с описанием выбранного материала и его типа работы, см. п. 1.3.1.3.1. "*Справочник материалов*", с. 1-53.

**Общий коэффициент снижения предела выносливости  $K_f$**  может быть задан значением либо рассчитан в соответствии с приближенной формулой:

$$K_f = \overline{K_\sigma} \cdot \frac{K_y}{K_M \cdot K_{пов}} \cdot M, \text{ где}$$

$\overline{K_\sigma}$  – эффективный коэффициент концентрации напряжений, учитывающий снижение свойств сопротивления усталости в связи с местными изменениями формы и размеров детали;

$K_y$  – коэффициент влияния упрочняющей обработки;

$K_m$  – коэффициент влияния размеров детали;

$K_{пов}$  – коэффициент влияния качества поверхности детали;

$M$  – множитель, который позволяет учесть влияние других факторов.

Для задания указанных коэффициентов необходимо нажать кнопку «Расчет» и в открывшемся окне задать принятые значения.

Параметр	Значение
Результат	1.125
Эффективный коэффициент концентрации напряжений	Произвольный / 1
Коэффициент влияния упрочняющей обработки	Обдвка дробью (0.9) / 0.9
Коэффициент влияния размеров детали	Произвольный / 1
Коэффициент влияния поверхностной обработки	Для черновой поверхности с литей / 0.8
Множитель	1

### Коэффициент запаса по пределу выносливости

Значение коэффициента запаса задается в поле «Значение» и используется для вычисления расчетного предела выносливости группы. Полученное значение используется при расчете срока службы.

Значение, указанное в поле «Остаточные/температурные напряжения в материале» учитывается при вычислении распределений приведенных амплитуд в узлах группы, см. п. 1.2.1.3. "Частные блоки нагружения", с. 1-13.

#### 1.4.2.4. Процедура расчета

В данном разделе приведены алгоритмы расчета показателей усталостной долговечности, описаны промежуточные и основные результаты расчета по вагонной методике.

##### Внимание

Расчет ведется в соответствии с *линейной моделью накопления усталостных повреждений*. Для описания свойств сопротивления усталости применяется *Модель №5*.

Рассмотрим основные этапы расчета:

- Формирование *распределений приведенных амплитуд* нагружения. Распределения формируются на основании рассчитанных заранее *двухпараметрических распределений параметров нагружения* (см. п. 1.2.1.3. "*Частные блоки нагружения*", с. 1-13) в узлах группы с учетом выбранного *алгоритма учета средних напряжений цикла* (см. п. 1.4.2.1. "*Описание нагруженности*", с. 1-75) и заданных для группы *остаточных/температурных напряжений* (см. п. 1.4.2.3. "*Задание свойств сопротивления усталости*", с. 1-78). При формировании учитывается значение *границы повреждающих амплитуд* (см. п. 1.4.2.1. "*Описание нагруженности*", с. 1-75).
- Расчет *повреждения, накопленного на каждом из режимов работы за единицу срока службы* (секунда работы, километр пути).

$$P_{ед}^{<k>} = \sum_i \frac{n_{ед}^{<k>} \cdot t_i^{<k>}}{N(\sigma_i^{<k>})}, \text{ где}$$

$n_{ед}^{<k>}$  – число циклов нагружения k-ого режима за расчетную единицу срока службы;

$\sigma_i^{<k>}$  – характерное значение i-ого интервала распределения приведенных амплитуд ЧБН<k>;

$t_i^{<k>}$  – относительная доля циклов нагружения, параметры которых позволяют отнести их к i-ому интервалу распределения приведенных амплитуд ЧБН<k>;

$N(\sigma)$  – число циклов до разрушения детали при регулярном нагружении с амплитудой  $\sigma$ . Вычисляется в соответствии с Моделью №5 кривой усталости, см. п. 1.3.1.3.2. "*Модели кривой усталости*", с. 1-55.

Вычисление *эквивалентных амплитуд блоков нагружения*  $\sigma_{a,э}^{<k>}$  - амплитуд регулярно нагружения, вносящих за число циклов, содержащихся в блоке, такое же повреждение, что и блок с заданным распределением амплитуд.

$$P_{ед}^{<k>} = \frac{n_{ед}^{<k>}}{N(\sigma_{a,э}^{<k>})} = \sum_i \frac{n_{ед}^{<k>} \cdot t_i^{<k>}}{N(\sigma_i^{<k>})},$$

Тогда значение эквивалентной амплитуды блока вычисляется по формуле:

$$\sigma_{a,э}^{<k>} = \sigma \left( N_{\sigma_{a,э}^{<k>}} \right) = \sigma \left( \frac{1}{\frac{\sum_i t_i^{<k>}}{N(\sigma_i^{<k>})}} \right), \text{ где}$$

$\sigma(N)$  – амплитуда регулярного нагружения, приводящая к Разрушению объекта за число циклов  $N$ . Вычисляется в соответствии с Моделью №5 кривой усталости, см. п. 1.3.1.3.2. "Модели кривой усталости", с. 1-55.

- Расчет повреждения, накопленного в условиях эксплуатации, описанных набором частных режимов, за выбранную единицу срока службы.

$$П_{ед}^{<СБН>} = \sum_k C^{<k>} \cdot П_{ед}^{<k>}, \text{ где}$$

$C^{<k>}$  – относительная доля  $k$ -ого рабочего режима за единицу срока службы (секунду работы, километра пробега), либо число повторений реализации  $k$ -ого рабочего режима за условную единицу срока службы.

- Расчет числа циклов эксплуатационного нагружения за единицу срока службы

$$n_{ед}^{<СБН>} = \sum_k C^{<k>} \cdot n_{ед}^{<k>}$$

- Расчет срока службы (в выбранных единицах)

$$T = \frac{1}{П_{ед}^{<СБН>}}$$

- Расчет срока службы (в календарных годах)

$$T_k = \frac{T}{B}, \text{ где}$$

$B$  – коэффициент, равный числу единиц срока службы за год эксплуатации.

- Расчет коэффициента запаса по сроку службы

$$n_T = \frac{T_k}{[T_k]}$$

## Список литературы

- [1] Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). ГосНИИВ-ВНИИЖТ, Москва, 1996. 346 С.
- [2] Методические указания. Надежность в технике. Вероятностный метод расчета на усталость сварных конструкций. РД 50-694-90. Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам. Москва, 1991.
- [3] Шлюшников А.П. Механика разрушения и расчеты на прочность и долговечность элементов машин и конструкций с трещинами. Брянск, 1996.
- [4] Шлюшников А.П. Механика многоциклового усталостного разрушения. Брянск, 1990.
- [5] Исследование и производство транспортных конструкций. Научно-технический сборник. Издательство «Звайгзне», Рига, 1972.
- [6] Болотин В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М., 1971.
- [7] Труфяков В.И. Усталость сварных соединений. Киев: «Наукова думка», 1973.
- [8] Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. М.: «Машиностроение», 1985.
- [9] Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. М.: Высшая школа, 1991.