



Руководство пользователя



Прогнозирование износа профилей колес и рельсов

Рассматриваются алгоритмы и математические модели, используемые в программном комплексе «Универсальный механизм» для прогнозирования износа профилей ж.-д. колес и рельсов, а также описывается применение соответствующих инструментов

Оглавление

16. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗНОСА ПРОФИЛЕЙ КОЛЕС И РЕЛЬСОВ	16-3
16.1. ИНСТРУМЕНТ UM LOCO/WHEEL PROFILE WEAR EVOLUTION: ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗНОСА ПРОФИЛЕЙ Ж.-Д. КОЛЕС	16-9
16.1.1. Моделирование износа профилей ж.-д. колес	16-11
16.1.1.1. Создание набора конфигураций	16-12
16.1.1.2. Весовые коэффициенты конфигураций и скоростей	16-12
16.1.1.3. Параметры изнашивания	16-13
16.1.1.4. Условия завершения	16-16
16.1.1.5. Сохранение результатов	16-17
16.1.1.6. Процесс моделирования износа	16-18
16.1.2. Пример создания проекта эволюции профиля ж.-д. колеса	16-21
16.1.2.1. Описание проекта	16-21
16.1.2.2. Создание набора конфигураций и назначение весовых коэффициентов	16-21
16.1.2.3. Настройка параметров изнашивания	16-24
16.1.2.4. Настройка условий завершения	16-25
16.1.2.5. Настройка сохранения результатов	16-25
16.1.3. Анализ результатов	16-26
16.1.4. Расчеты на многопоточных процессорах	16-28
16.2. ИНСТРУМЕНТ UM LOCO/RAIL PROFILE WEAR EVOLUTION: ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗНОСА ПРОФИЛЕЙ Ж.-Д. РЕЛЬСОВ	16-29
16.2.1. Моделирование износа профилей рельсов	16-30
16.2.2. Пример создания проекта эволюции профиля рельса	16-34
16.2.2.1. Описание проекта	16-34
16.2.2.2. Создание проекта	16-35
16.2.3. Анализ результатов	16-40
16.3. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	16-42

16. Прогнозирование износа профилей колес и рельсов

Изменение геометрии профилей ж.-д. колес и рельсов из-за изнашивания приводит к значительному изменению характера взаимодействия колесо-рельс. Это, в свою очередь, оказывает влияние на множество показателей, основными из которых являются показатели безопасности движения, плавности хода и силового воздействия на путь.

Существует два подхода к моделированию износа профилей колес и рельсов [1]: совместное и раздельное моделирование. При совместном моделировании учитывается взаимное влияние процессов изнашивания и динамики экипажа, т.е. малые изменения формы профиля из-за износа происходят непосредственно при моделировании движения. В раздельном подходе не учитывается влияние износа профилей на динамику – изменение формы профилей происходит после окончания моделирования. Для получения значимого износа последовательное моделирование необходимо выполнить довольно большое число раз.

Алгоритмы изменения формы профиля из-за износа основаны на полученных экспериментально соотношениях между объемом удаляемого материала и работой сил трения в контакте [2] [3] [4]. В ПК «Универсальный механизм» (УМ) реализованы следующие модели изнашивания: *модель Фляйшера* [5], *модель Крузе-Поля* [4] и *модель Арчарда* [2] [3].

- Модель Фляйшера

В модели Фляйшера используется линейная зависимость между объемным износом и работой сил трения:

$$W = k_V A, \quad (16.1)$$

где k_V – коэффициент пропорциональности (коэффициент износа), A – работа сил трения.

$$A = \int_0^t P dt, \quad (16.2)$$

где P – мощность сил трения.

$$P = \int_F \tau s dF, \quad (16.3)$$

где τ – касательные усилия, s – скорость скольжения, F – площадь пятна контакта.

- Модель Крузе-Поля

В модели Крузе-Поля также используется линейная зависимость между объемным износом и работой сил трения, но предполагается, что существуют режимы умеренного и интенсивного износа с разными коэффициентами износа:

$$k_V(p) = \begin{cases} k_V, & p < p_{кр}, \\ \gamma k_V, & p \geq p_{кр}, \end{cases} \quad (16.4)$$

где $p_{кр}$ – критическая плотность мощности сил трения, γ – коэффициент скачка.

- Модель Арчарда

Объемный износ рассчитывается следующим образом:

$$W = k \frac{Ns}{H}, \tag{16.5}$$

где N – нормальная сила в контакте, s – расстояние скольжения, H – твердость более мягкой из двух поверхностей. Коэффициент k определяется по карте, приведенной на рис. 16.1.

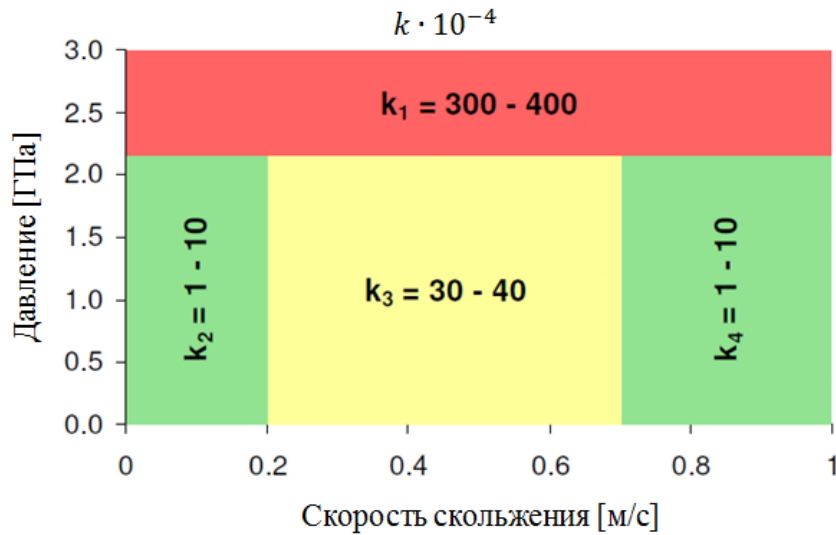


Рис. 16.1. Карта коэффициента износа для модели Арчарда

В модуле **UM Loco** для решения касательной контактной задачи используется алгоритм FASTSIM. В алгоритме FASTSIM пятно контакта делится на полосы равной ширины, параллельные оси x , которые, в свою очередь, делятся на равное количество элементов, рис. 16.2. Объемный износ вычисляется для каждого элемента согласно выражению (16.1) или (16.5) следующим образом:

$$W_{ij} = k_V(p) \tau_{ij} \mathbf{w}_{ij} v \Delta F_j \Delta t, \tag{16.6}$$

где v – скорость движения колесной пары, \mathbf{w}_{ij} – крип в центре элемента, ΔF_j – площадь элемента в полосе, Δt – шаг интегрирования;

$$W_{ij} = k \left(v_{s_{ij}}, p_{n_{ij}} \right) \frac{p_{n_{ij}} \Delta F_j}{H} |\mathbf{w}_{ij}| \Delta x_j, \tag{16.7}$$

где $p_{n_{ij}}$ – нормальные давления в центре элемента, $v_{s_{ij}}$ – скорость скольжения, Δx_j – размер элемента вдоль оси x .

Суммарный износ, накопленный в полосе, получается суммированием по всем элементам полосы.

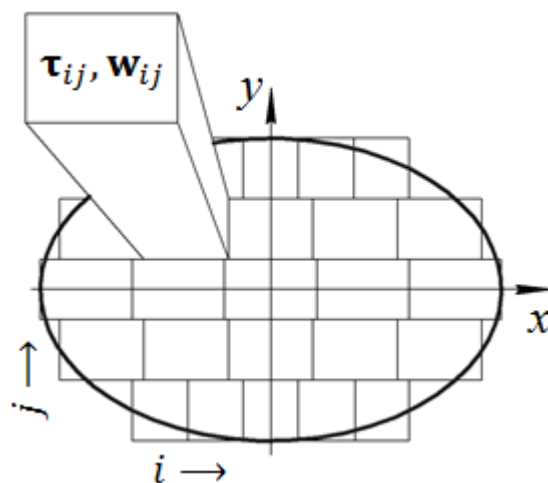


Рис. 16.2. Дискретизация пятна контакта в алгоритме FASTSIM

Приведенные выше соотношения позволяют вычислить съём материала в точках профиля. Перед началом моделирования профиль дискретизируется по дуговой координате на n сегментов равной длины. В процессе моделирования динамики рельсового экипажа на этой дискретизации строится гистограмма распределения объемного износа по профилю, рис. 16.3. Затем полученная гистограмма аппроксимируется В-сплайном.

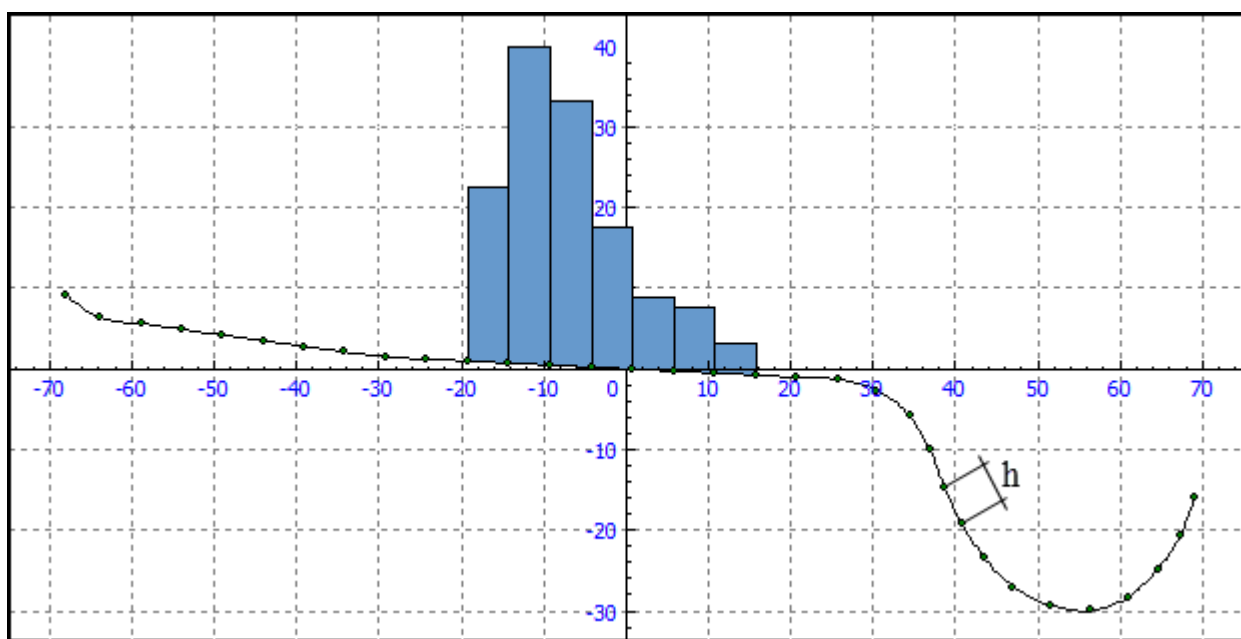


Рис. 16.3. Гистограмма распределения износа вдоль профиля колеса, h – шаг дискретизации профиля на сегменты

Съём материала для профиля колеса определяется выражением:

$$\delta_w(s) = \frac{w(s)}{2\pi R(s)h'} \tag{16.8}$$

где w – сглаженная эпюра объемного износа, R – радиус колеса, s – дуговая координата. Эпюрой износа называется распределение износа вдоль профиля. Величина износа может быть выражена в единицах длины, объема или массы.

При расчете износа профиля колеса полагается, что колесо в окружном направлении изнашивается равномерно, т.е. остается телом вращения.

Съем материала для профиля рельса:

$$\delta_r(s) = \frac{w(s)}{Lh}, \quad (16.9)$$

где L – длина участка изнашивания.

При расчете износа профиля рельса полагается, что рельс изнашивается равномерно в продольном направлении, т.е. профиль рельса не изменяется вдоль пути.

Изменение координат точек профиля за счет изнашивания:

$$(x_i \ y_i)^T = (x(s_i) \ y(s_i))^T - \delta(s_i)\mathbf{n}(s_i), \quad (16.10)$$

где \mathbf{n} – внешняя нормаль к профилю.

Замечание 1 В алгоритмах прогнозирования износа профилей колес и рельсов рассматривается изменение геометрии профилей только за счет абразивного износа. Изменения, связанные с усталостным выкрашиванием и пластическим деформированием, не учитываются.

Замечание 2 Результаты моделирования износа существенно зависят от совокупности конфигураций и параметров моделей изнашивания, положенных в основу расчета. Для получения надежных оценок фактического износа профилей требуются убедительные доказательства адекватности принятых исходных данных. Поэтому рекомендуется использовать инструменты прогнозирования износа для получения относительных оценок путем сравнения экипажей (профилей) при одинаковых исходных данных.

Количественно износ профилей характеризуется *показателями износа*. Показатели износа профилей колес показаны на рис. 16.4 и рис. 16.5.

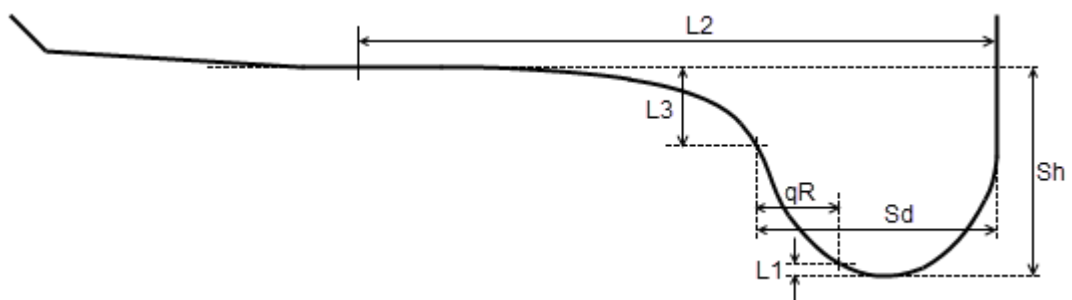


Рис. 16.4. Показатели износа Sd , Sh и qR [6]

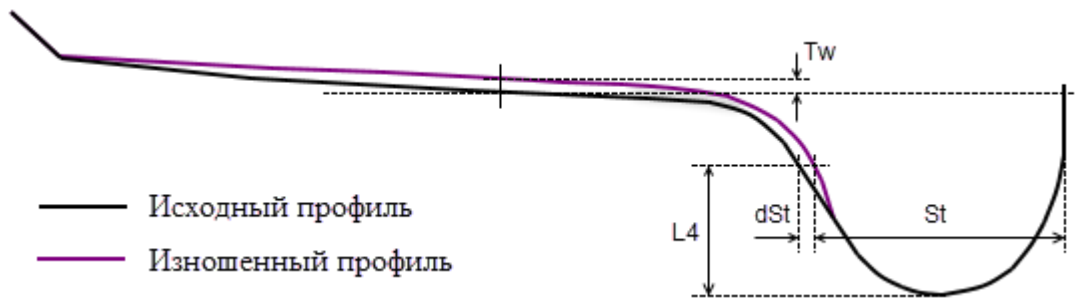


Рис. 16.5. Показатели износа T_w , St и dSt [7]

Показатели износа профилей колес:

- Sd – толщина гребня, измеренная от круга катания;
- Sh – высота гребня;
- qR – параметр крутизны гребня;
- T_w – износ профиля на круге катания (прокат);
- St – толщина гребня, измеренная от вершины гребня;
- dSd, dSt – разность показателей Sd и St между текущим и начальным профилями.

Замечание Методики определения показателей износа Sd и St отличаются выбранной базой измерений. Измерение Sd выполняется на некотором расстоянии от круга катания. Отметим, что круг катания в процессе эксплуатации изнашивается, т.е. база измерения меняется. С другой стороны, St измеряется от вершины гребня, где при нормальных условиях эксплуатации износа быть не должно. Этой особенностью и обусловлено введение двух понятий «толщина гребня»

Показатели износа профиля рельса показаны на рис. 16.6.

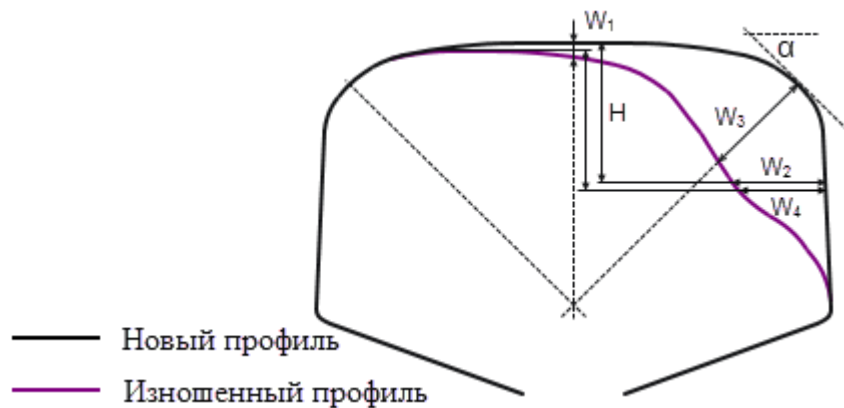


Рис. 16.6. Показатели износа профиля рельса: W_1 – вертикальный износ; W_2 – боковой износ; W_3 – износ рабочей выкружки; W_4 – боковой износ, измеренный от существующей поверхности катания.

Параметры $L1, L2, L3, L4, H$ и α задаются в настройках программы **UM Simulation** (Главное меню | Инструменты | Настройки... | Оценка износа ж.-д. профилей), рис. 16.7.

Общие	Автосохранение	Формат чисел	Экспорт в MS Excel
Отчеты об ошибках		Оценка износа ж.-д. профилей	
Параметр	Значение		
L1, мм	5		
L2, мм	70		
L3, мм	10		
L4, мм	20		
Sd	Толщина гребня		
Sh	Высота гребня		
qR	Параметр крутизны гребня		
Tw	Прокат		
St	Толщина гребня (от вершины гребня)		
dSd	Подрез гребня		
dSt	Подрез гребня (от вершины гребня)		
H, мм	12		
a, °	45		
W1	Вертикальный износ		
W2	Боковой износ		
W3	Износ рабочей выкружки		

Рис. 16.7. Настройки оценки износа ж.-д. профилей

16.1. Инструмент UM Loco/Wheel Profile Wear Evolution: прогнозирование износа профилей ж.-д. колес

Инструмент **Wheel Profile Wear Evolution** модуля **UM Loco** программного комплекса «Универсальный механизм» предназначен для прогнозирования износа профилей ж.-д. колес. Признаком наличия модуля или инструмента в текущей конфигурации УМ является знак «+» в соответствующей строке окна **О программе** (**Главное меню** | **Помощь** | **О программе ...**), рис. 16.8.

Замечание. Обратите внимание, что инструмент **Wheel Profile Wear Evolution** поддерживается только моделями контактных сил В. Кика и И. Пиотровского (инструмент **UM Loco/Multi-point Contact Model**) и CONTACT. Интерфейс к модели CONTACT реализован в инструменте **UM Loco/CONTACT add-on interface**.

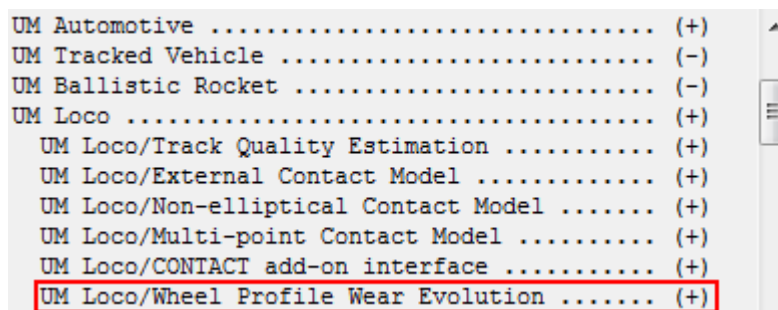


Рис. 16.8. Приznak наличия модуля или инструмента в текущей конфигурации УМ

Инструмент **Wheel Profile Wear Evolution** позволяет:

- прогнозировать износ профилей ж.-д. колес;
- сохранять профили и эпюры износа после каждого шага расчета износа;
- рассчитывать показатели износа профилей колес;
- создавать наборы исходных данных для модуля моделирования накопления контактно-усталостных повреждений в колесах **UM RCF Wheel** ([Глава 25](#)).

Инструмент **Wheel Profile Wear Evolution** недоступен для модели рельсового экипажа, если:

- число рельсовых экипажей в модели больше одного;
- модель включает внешние подсистемы;
- модель включает упругие тела;
- уравнения движения синтезированы в символьной форме.

Очевидно, что моделирование износа профиля колеса при движении экипажа по всей длине железнодорожной сети требует больших затрат машинного времени. Возможным решением является моделирование износа на наборе конфигураций (маршрутов движения), отражающем в определенной мере характер сети. *Совокупность конфигураций должна представлять собой репрезентативный набор условий, в которых функционирует рельсовый экипаж.* Для определения репрезентативного набора конфигураций используются методы статистического анализа, табл. 16.1.

Пример статистического анализа маршрута движение

Диапазон радиусов, м	Средний радиус, м	Средняя длина, м	Доля
<400	321	272.8	0.08
400-700	578	378.6	0.19
700-1000	847	344.1	0.06
>1000	1766	328.1	0.13
Прямые	-	-	0.54

В инструменте **Wheel Profile Wear Evolution** реализовано совместное моделирование износа с дискретным изменением профилей колес. В совместном подходе параллельно моделируются различные варианты движения экипажа – конфигурации (рис. 16.9). Конфигурации различаются геометрией пути, профилями рельсов, массой экипажа и т.д. Профили колес экипажа одинаковые для всех конфигураций в любой момент времени. Длина пути, проходимого экипажем при моделировании, делится на множество небольших интервалов – шагов износа. Число интервалов одинаковое для всех конфигураций. В течение одного шага износа профили не изменяются. После окончания шага износа накопленные за шаг потери материала суммируются для соответствующих колес с учетом весовых (статистических) коэффициентов конфигураций и симметрии износа, если такая учитывается. Затем профили модифицируются в соответствии с результирующей эпюрой износа (рис. 16.9).

Для ускорения процесса моделирования реализован расчет конфигураций в параллельных потоках на многопоточных процессорах.

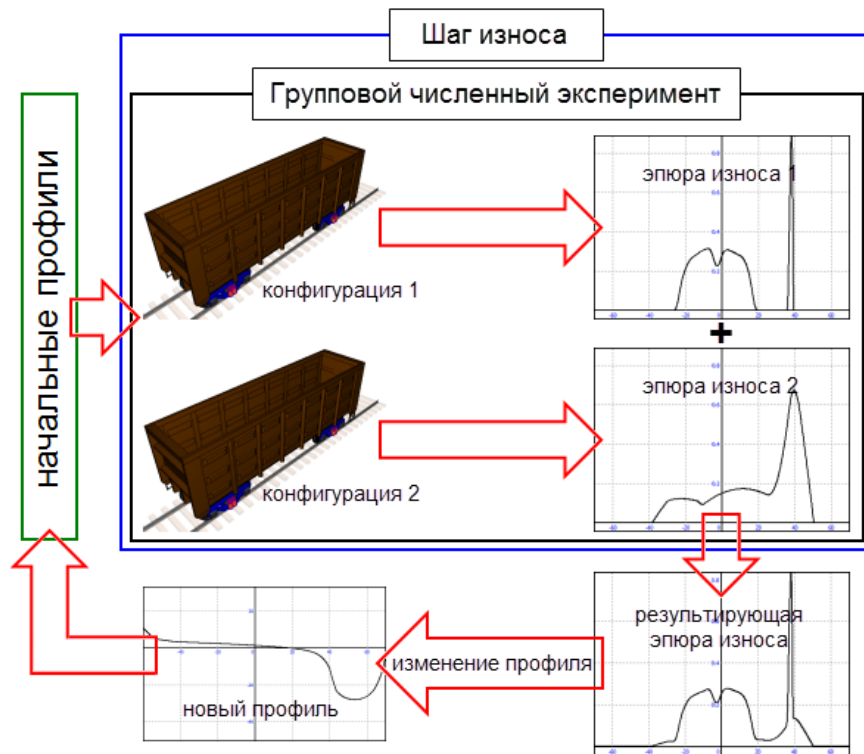


Рис. 16.9. Схема моделирования износа профилей колес

16.1.1. Моделирование износа профилей ж.-д. колес

Запустите программу **UM Simulation**. Откройте модель ж.-д. экипажа. Откройте **Инспектор моделирования объекта** и перейдите на вкладку **Ж.-д. экипаж | Износ профилей колес**, рис. 16.10.

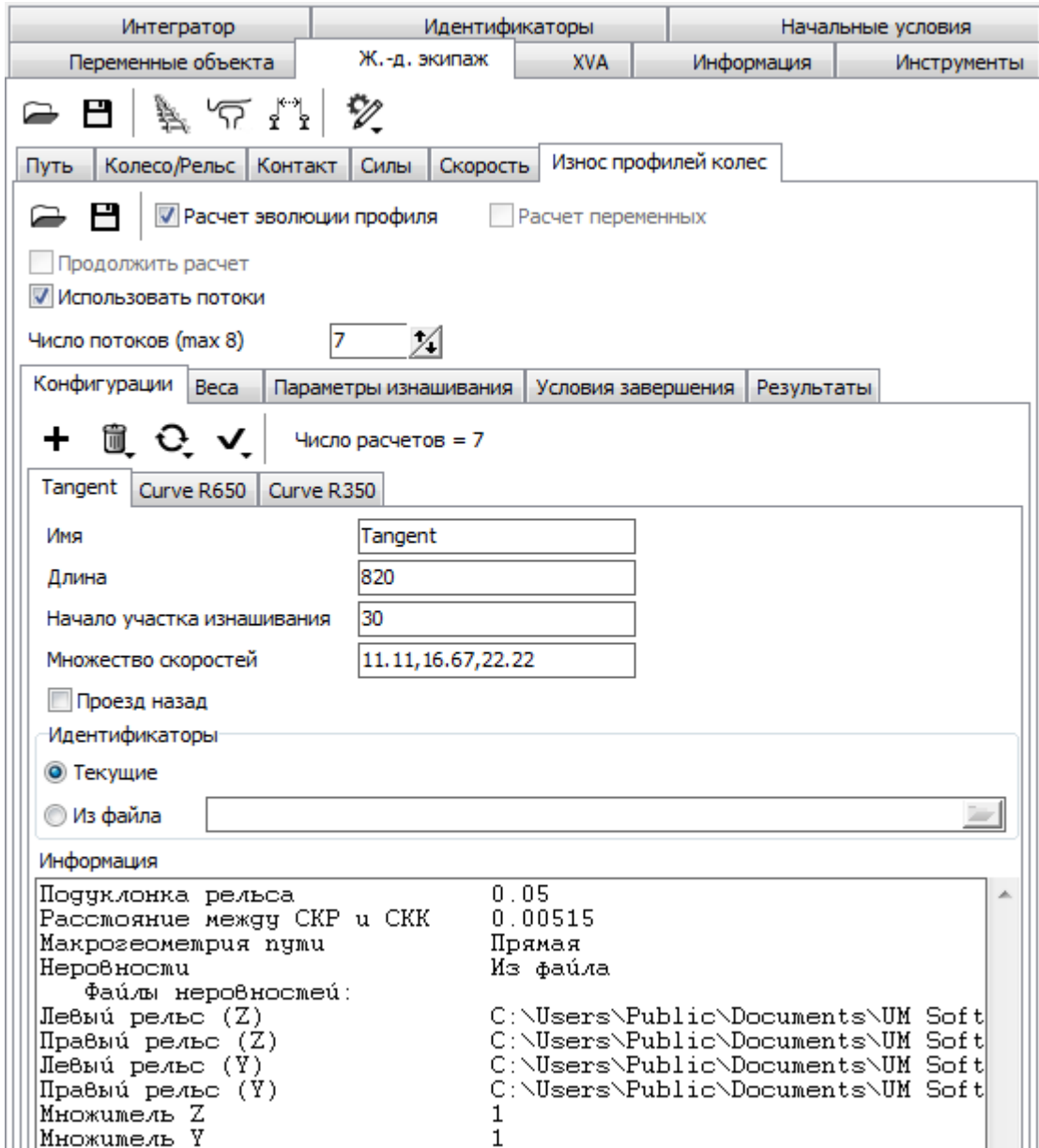


Рис. 16.10. Вкладка **Износ профилей колес**


Для перехода в режим прогнозирования износа профиля колеса включите опцию **Расчет эволюции профиля**. Обратите внимание, что при закрытии модели состояние опции не сохраняется. Чтобы загрузить или сохранить проект эволюции используйте кнопки и соответственно.




Опция **Продолжить расчет** служит для выполнения рестарта после того, как моделирование износа было полностью или частично завершено. Рестарт может потребоваться, например, в случае аварийного завершения расчета. Проект эволюции при рестарте не может быть изменен. При рестарте расчет будет продолжен с последними рассчитанными

профилями, найденными в каталоге сохранения результатов (п. 16.1.1.5. "Сохранение результатов", стр. 16-17). Рестарт недоступен, если каталог сохранения результатов пуст или не содержит файла *current.ecf*.

При включенной опции **Использовать потоки** расчет конфигураций производится в параллельных потоках на многопоточных процессорах.

16.1.1.1. Создание набора конфигураций

Для редактирования набора конфигураций перейдите на вкладку **Конфигурации**, рис. 16.10. Вкладка содержит кнопки для работы с конфигурациями и вкладки с именами конфигураций. Кнопка **Добавить конфигурацию**  добавляет к набору конфигурацию с текущими ж.-д. параметрами. Под текущими ж.-д. параметрами будем понимать параметры, установленные на вкладках **Путь**, **Колесо/Рельс**, **Контакт**. Для всех конфигураций в качестве начальных профилей колес используются профили, назначенные для первой конфигурации. Профили рельсов могут быть различными для разных конфигураций.

Кнопка **Удалить конфигурацию**  удаляет выбранную конфигурацию из набора. Кнопка **Обновить конфигурацию**  устанавливает параметры выбранной конфигурации по текущим параметрам, а кнопка  наоборот, устанавливает текущие параметры по параметрам выбранной конфигурации.

После добавления конфигурации заполните следующие поля:

Имя – имя конфигурации, по которому ее легко идентифицировать;

Длина (S_i) – длина пути, проходимого экипажем при моделировании;

Начало участка изнашивания (S_{b_i}) – расстояние, по прохождению которого начинается накопление износа. Этот параметр используется для того, чтобы исключить из расчета «заезд на неровности» ([Глава 8](#), п. *Неровности рельсовых нитей*), прямолинейный участок перед кривой ([Глава 8](#), п. *Макрогеометрия кривой*) и т.п.;

Множество скоростей – список скоростей движения экипажа для данной конфигурации, например, 15, 20, 25.

В группе **Идентификаторы** выберите способ задания значений идентификаторов:

- **Текущие** – в конфигурации будут использоваться текущие значения идентификаторов, т.е. заданные на вкладке **Идентификаторы Инспектора моделирования объекта**.
- **Из файла** – значения идентификаторов для данной конфигурации будут прочитаны из указанного файла. Назначая конфигурациям разные файлы со значениями идентификаторов, можно моделировать, например, груженное или порожнее состояние вагона.

В группе **Информация** приводится основная информация о параметрах конфигурации.

16.1.1.2. Весовые коэффициенты конфигураций и скоростей

Для назначения весового коэффициента конфигурации и весовых коэффициентов скоростей перейдите на вкладку **Вес**, рис. 16.11.

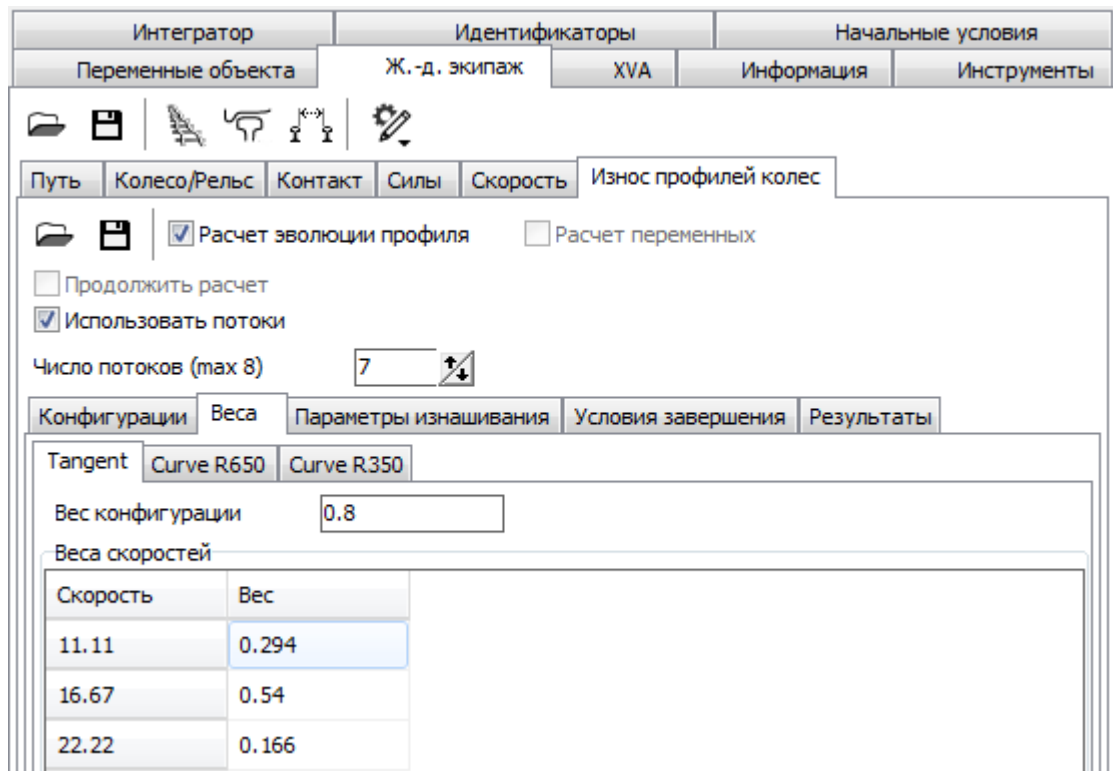


Рис. 16.11. Вкладка **Веса** – назначение весовых коэффициентов

16.1.1.3. Параметры изнашивания

Параметры моделирования изнашивания и модель изнашивания задаются на вкладке **Параметры изнашивания**, рис. 16.12. Параметры моделирования изнашивания включают в себя **Число итераций**, **Число шагов износа**, **Пробег**, **Ширину интервала накопления износа**, а также опции **Кососимметричный износ колесных пар** и **Симметричный износ профилей одной колесной пары**.

Число итераций (N_{it}) – число итераций моделирования износа. Итерации износа – это серия расчетов одинаковой структуры, отличающихся друг от друга только начальными профилями. Одна итерация – это однократный расчет совокупности конфигураций. Если заданы условия завершения (п. 16.1.1.4. *Условия завершения*, стр. 16-16), то итерации будут выполняться до выполнения условия завершения;

Число шагов износа (N_{ws}) – число изменений профиля за одну итерацию. Чем больше число шагов и меньше пробег (см. ниже) тем реалистичнее эволюция профиля, но и продолжительнее время моделирования;

Пробег (km_{step}) – это километраж, назначаемый одному шагу износа. Величина пробега используется для масштабирования эпюры износа в конце каждого шага износа. Целью масштабирования является получение значимого износа при небольшой длине моделируемого маршрута движения. Фактически эпюра износа умножается на масштабный коэффициент c_{scale} :

$$c_{scale} = \frac{N_{ws} km_{step}}{S_i - S_{b_i}}, \tag{16.11}$$

где i – номер конфигурации.

Процедура масштабирования применима, поскольку малые потери материала при износе практически линейно зависят от пройденного пути, что справедливо в пределах одного шага износа.

Общий пробег (km_{tot}) рассчитывается по формуле:

$$km_{tot} = N_{it}N_{ws}km_{step}. \tag{16.12}$$

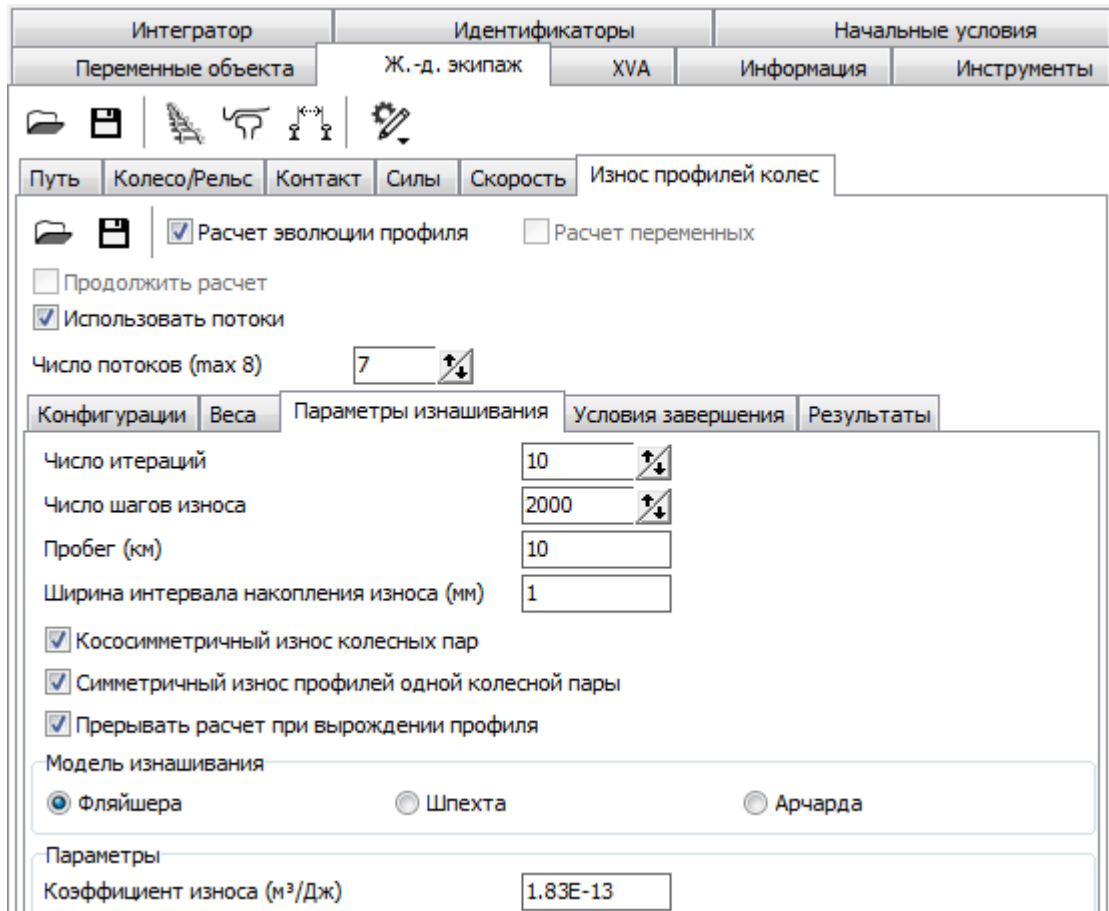


Рис. 16.12. Вкладка **Параметры изнашивания**

Ширина интервала накопления износа (h) – шаг дискретизации по дуговой координате поверхности колеса на кольцевые сегменты. Используется для построения гистограммы распределения износа по профилю колеса, рис. 16.3.

Опцию **Кососимметричный износ колесных пар** следует использовать, если экипаж движется по маршруту в прямом и обратном направлениях без разворота. В этом случае профили колес, расположенных кососимметрично относительно центра экипажа, изнашиваются одинаково, т.е. одинаково изнашиваются профиль левого колеса первой колесной пары и профиль правого колеса последней колесной пары и т.д. При включенной опции в набор конфигураций следует включить только конфигурации, соответствующие проезду экипажа вперед.

Опцию **Симметричный износ профилей одной колесной пары** следует использовать, если на исследуемом маршруте доли левых и правых кривых близкого радиуса примерно одинаковы. В этом случае одинаково изнашиваются профили колес одной колесной

пары, а для исследования движения в кривых следует ограничиться только конфигурациями с правыми кривыми.

Опции **Кососимметричный износ колесных пар** и **Симметричный износ профилей одной колесной пары** позволяют уменьшить число конфигураций и упростить расчет. На рис. 16.13 приведено сравнение результатов моделирования износа профиля колеса локомотива на полном и сокращенном наборах конфигураций. Под сокращенным набором подразумевается набор конфигураций только с правыми кривыми и маршрутами «вперед».

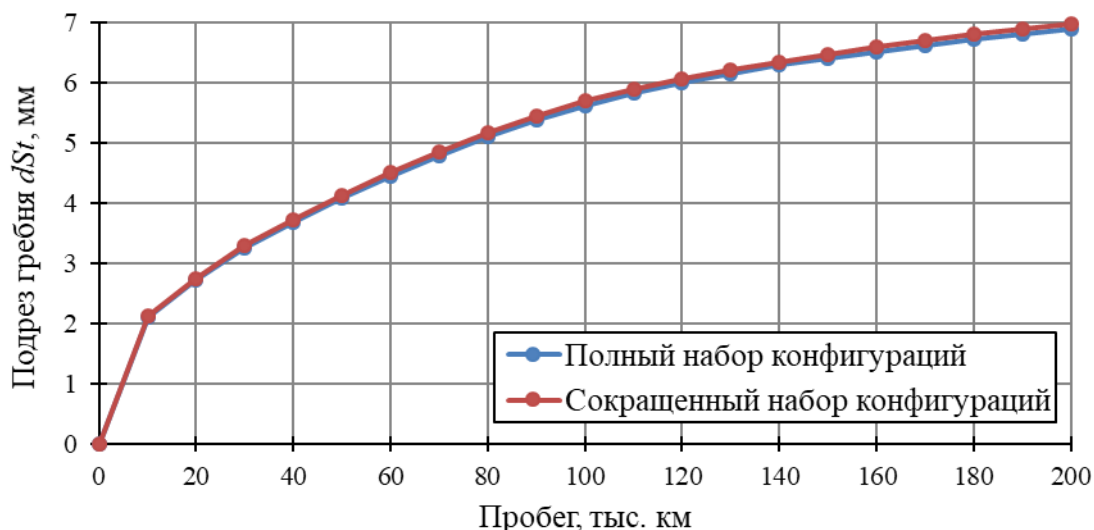


Рис. 16.13. Сравнение результатов моделирования двух наборов конфигураций

Опция **Прерывать расчет при вырождении профиля** отвечает за обработку вырождения профиля. Вырождение профиля – переход профиля от однозначной функции координаты x к многозначной, рис. 16.14. При включенной опции расчет будет прерван с выводом соответствующего сообщения. При выключенной – будет выполнен откат вырожденного участка профиля к предыдущему состоянию с продолжением моделирования. Типичная причина вырождения профиля колеса – большое значение параметра **Пробег**.

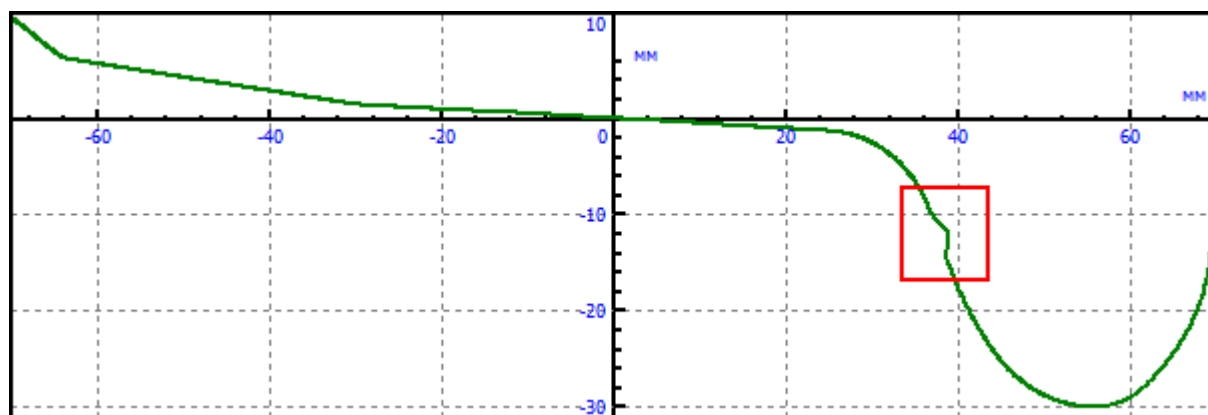


Рис. 16.14. Вырождение профиля

В группе **Модель изнашивания** выберите одну из доступных моделей и задайте ее параметры.

Рассмотрим методику изменения профиля колеса. Пусть $w_{ijk,l}$ и $w_{ijk,r}$ – эпюры износа для левого (l) и правого (r) колес колесной пары с номером k , рассчитанные для конфигурации i при движении со скоростью v_{ij} .

При симметричном износе профилей одной колесной пары эпюры износа для левого и правого колес колесной пары k усредняются:

$$w_{ijk,l} = w_{ijk,r} = \frac{1}{2}(w_{ijk,l} + w_{ijk,r}). \quad (16.13)$$

При кососимметричном износе колесных пар усредняются эпюры для колес колесных пар, расположенных кососимметрично относительно центра экипажа:

$$w_{ijk,l} = w_{ij(N-k+1),r} = \frac{1}{2}(w_{ijk,l} + w_{ij(N-k+1),r}), \quad l \Leftrightarrow r, \quad (16.14)$$

где N – число колесных пар.

Результирующая эпюра износа определяется по формуле:

$$w_{k,m} = \sum_{i=1}^{N_c} \alpha_i \sum_{j=1}^{N_{v_i}} \beta_{ij} w_{ijk,m}, \quad m = l, r. \quad (16.15)$$

Затем эта эпюра износа аппроксимируется В-сплайном.

Глубина износа в центре сегмента рассчитывается следующим образом:

$$\delta_{k,m}(s_i) = \frac{\tilde{w}_{k,m}(s_i)}{2\pi R_{k,m}(s_i)h}, \quad m = l, r, \quad (16.16)$$

где s_i – дуговая координата центра сегмента, $\tilde{w}_{k,m}$ – сглаженная эпюра износа, $R_{k,m}$ – радиус колеса, h – ширина сегмента.

16.1.1.4. Условия завершения

Условия завершения указываются на вкладке **Условия завершения**, рис. 16.15. В инструменте **Wheel Profile Wear Evolution** в качестве критериев остановки выступают показатели износа профиля колеса, приведенные на рис. 16.4 и рис. 16.5. Расчет будет остановлен при выполнении любого из условий завершения (условный оператор *ИЛИ*). Если не выбрано ни одного условия завершения, то моделирование будет завершено по достижению заданного числа итераций износа, указанного на вкладке **Параметры изнашивания**.

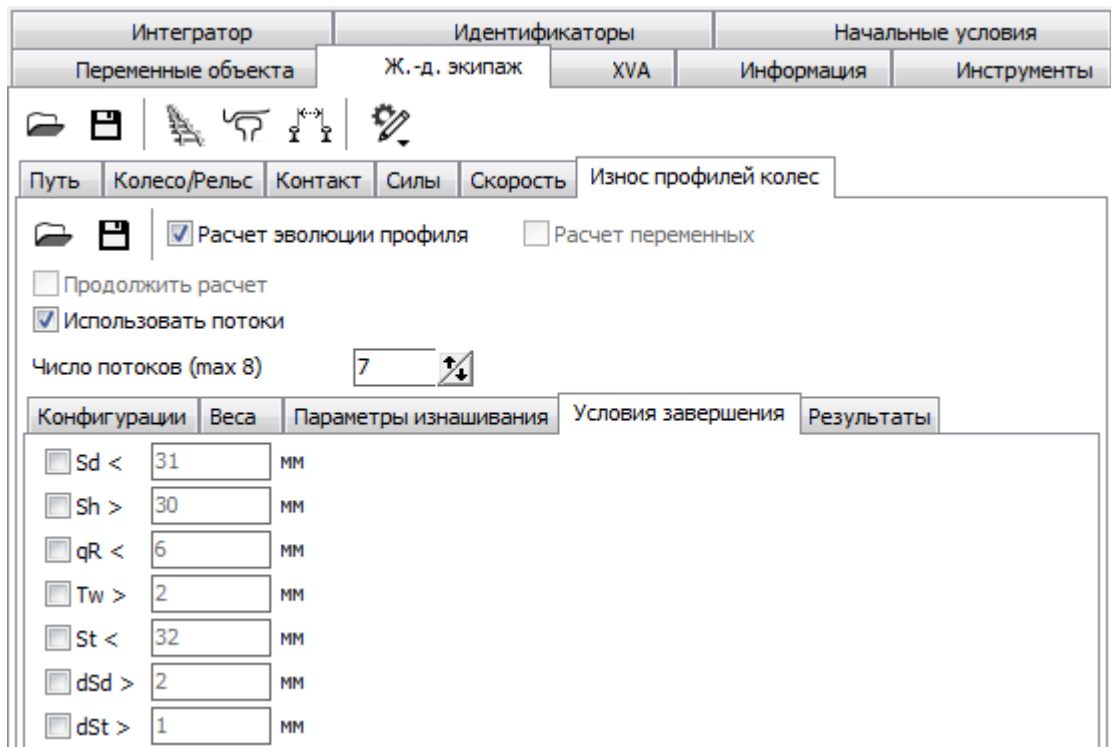


Рис. 16.15. Вкладка **Условия завершения**

16.1.1.5. Сохранение результатов

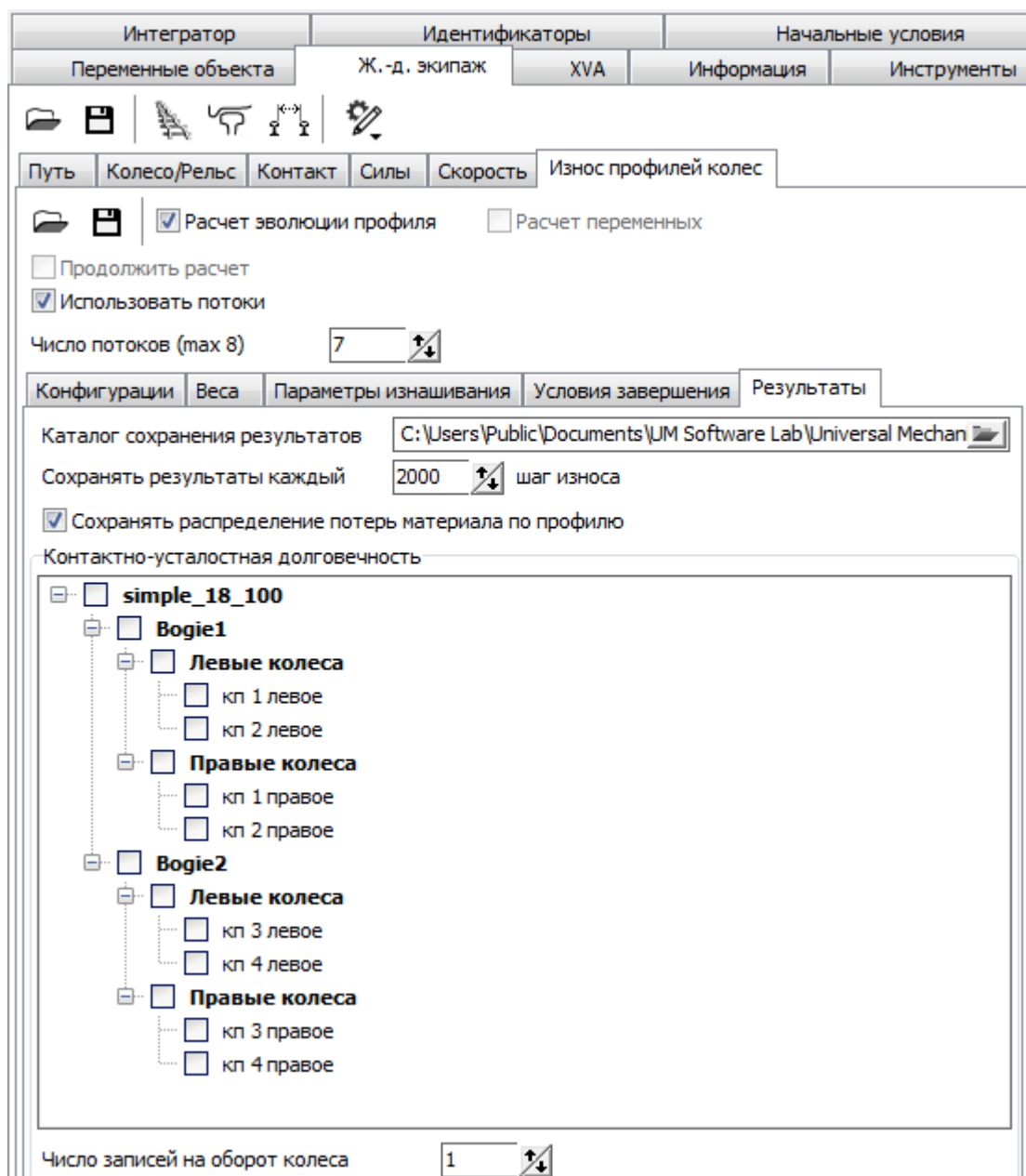
Инструмент **Wheel Profile Wear Evolution** позволяет сохранять следующие результаты расчета:

- профили колес;
- эпюры износа;
- наборы данных для моделирования накопления контактно-усталостных повреждений в колесах.

Для настройки сохранения результатов перейдите на вкладку **Результаты**, рис. 16.16. В поле **Каталог сохранения результатов** укажите путь к каталогу, в котором будут размещены результаты расчета. Профили колес сохраняются безусловно. Эпюры износа сохраняются при включенной опции **Сохранять распределение потерь материала по профилю**.

В группе **Контактно-усталостная долговечность** в дереве колес отметьте колеса, для которых предполагается моделировать накопление контактно-усталостных повреждений. Для моделирования накопления повреждений используются данные о распределении нормальных давлений и касательных усилий в контакте колесо-рельс.

В поле **Число записей на оборот колеса (N_r)** укажите какое число раз следует сохранять данные за оборот колеса. Чем больше число записей на оборот колеса, тем репрезентативнее набор данных, но и продолжительнее время моделирования в модуле **UM RCF**.


 Рис. 16.16. Вкладка **Результаты**

16.1.1.6. Процесс моделирования износа

Запустите моделирование, нажав кнопку **Интегрировать** в окне **Инспектора моделирования объекта**. После нажатия кнопки появится окно **Монитора моделирования износа** (рис. 16.17), в котором можно следить за ходом процесса моделирования, либо просматривать полученные на текущий момент времени результаты. Доступны следующие результаты:

- профили – профиль колеса на соответствующем шаге износа;
- эпюры износа – распределение потерь материала по профилю, накопленных за один шаг износа, см. формулу (16.16);
- накопленные эпюры износа – распределение суммарных (накопленные) потерь материала за все шаги износа до текущего включительно.

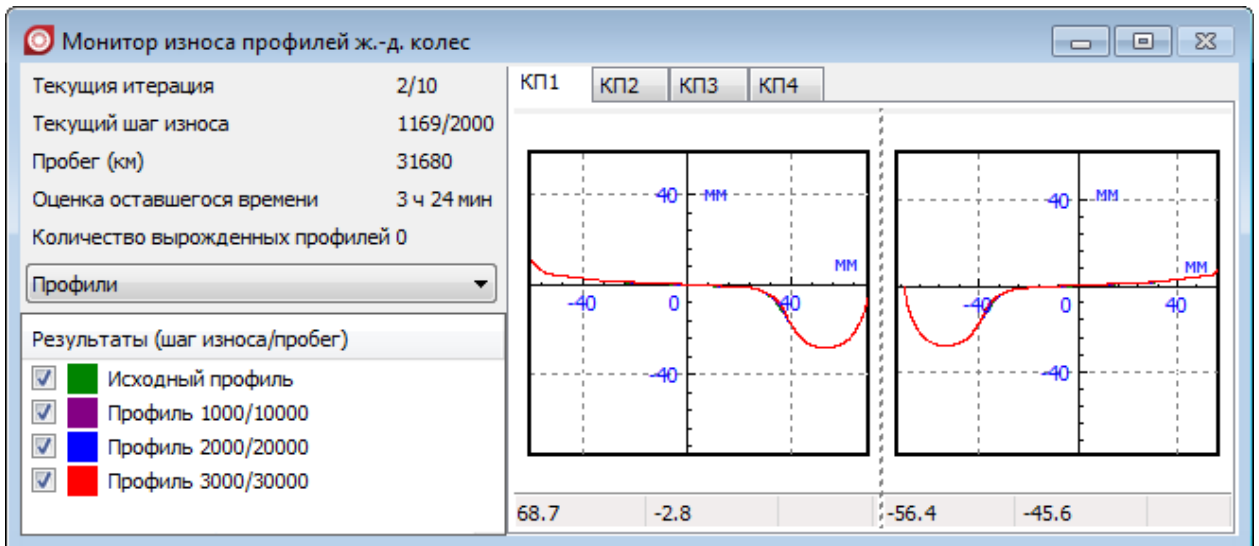



Рис. 16.17. Окно **Монитора** моделирования износа

Кнопка **Перейти в режим паузы**  на информационной панели **Параметры процесса** позволяет остановить процесс моделирования.

В однопоточном режиме (при выключенной опции **Использовать потоки**) в анимационных окнах можно следить за анимацией движения рельсового экипажа и анимацией контакта колесо-рельс для различных вариантов расчета. Чтобы выбрать вариант расчета в **Анимационном окне** и в **Окне анимации контакта** вызовите контекстное меню и в подменю **Варианты расчета износа** выберите один из вариантов расчета, рис. 16.18. Активный вариант помечается маркером. Для выбора варианта расчета в окне **Просмотра пятен контакта** наведите курсор мыши на правый край окна, дождитесь появления панели с вариантами расчета и выберите один из них, рис. 16.19.

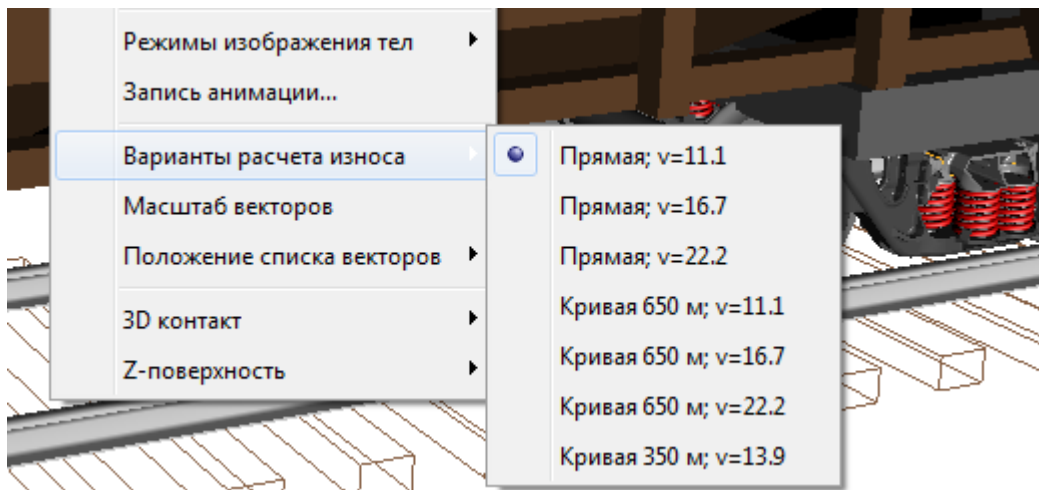


Рис. 16.18. Выбор варианта расчета в **Анимационном окне**

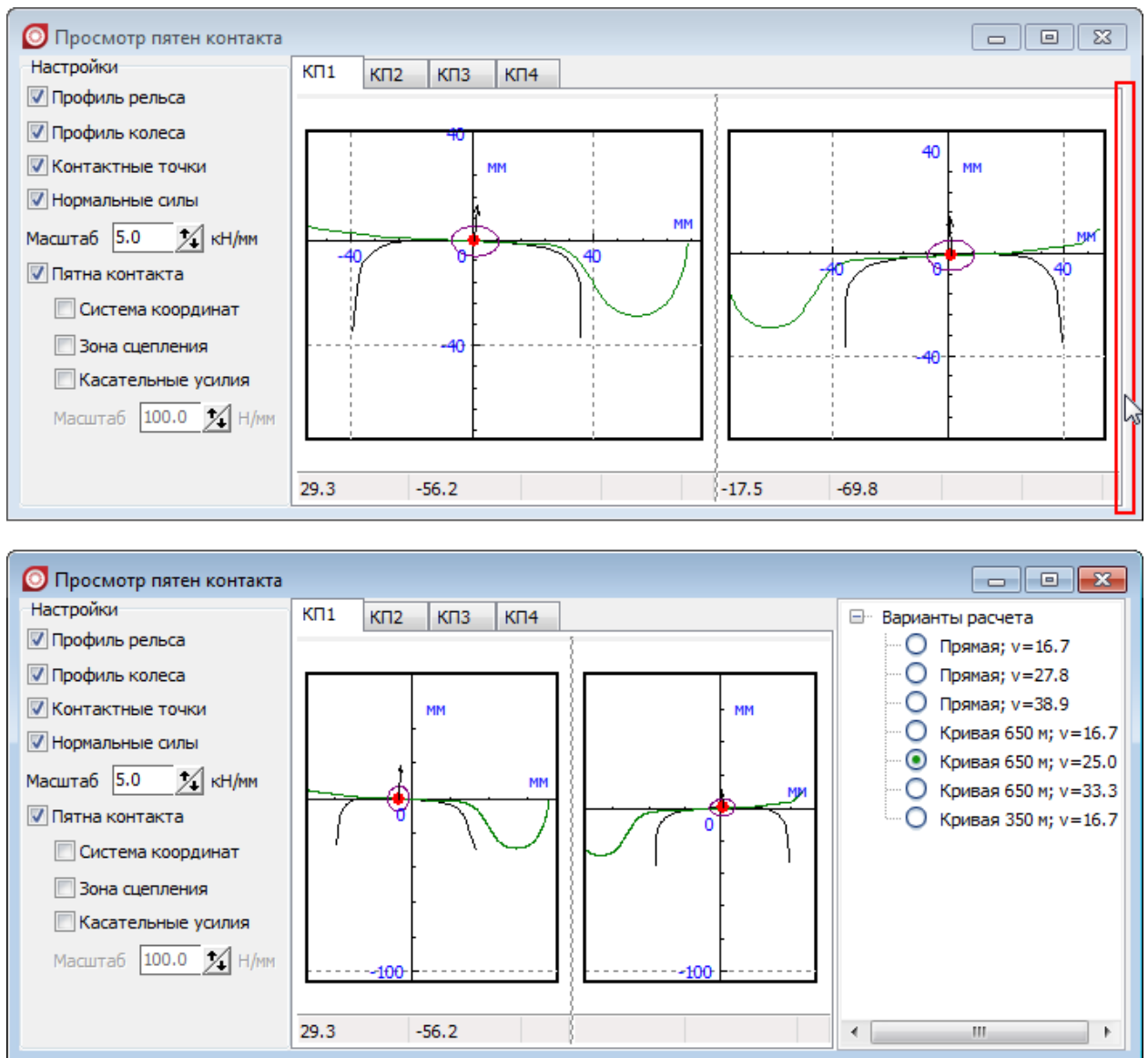


Рис. 16.19. Выбор варианта расчета в окне **Просмотра** пятен контакта

16.1.2. Пример создания проекта эволюции профиля ж.-д. колеса

16.1.2.1. Описание проекта

В качестве примера рассмотрим моделирование износа профилей колес грузового вагона с трехэлементными тележками модели 18-100. Вагон эксплуатируется на ж.-д. сети, статистические характеристики которой приведены в табл. 16.2. Модель вагона находится в каталоге [{Данные УМ}\samples\Rail_Vehicles\simple_18_100](#).

Таблица 16.2

Параметры репрезентативного маршрута для моделирования износа

Средний радиус, м	Средняя длина, м	Доля	Скорости, км/ч
350	410	0.05	50
650	410	0.15	40, 60, 80
Прямые	-	0.80	40, 60, 80

Замечание Заранее подготовленный файл конфигурации эволюции профиля колеса "*Wheel Wear Test.ecf*" находится в каталоге модели.

16.1.2.2. Создание набора конфигураций и назначение весовых коэффициентов

Проект износа будет содержать 3 конфигурации.

1. Движение в прямом участке со скоростями 40, 60 и 80 км/ч.
2. Движение в кривой радиусом 650 м со скоростями 40, 60 и 80 км/ч.
3. Движение в кривой радиусом 350 м со скоростью 50 км/ч.


Рельсы в прямом участке пути и внутренний рельс в кривых имеют неизношенный профиль R65, наружный рельс в кривых – изношенный профиль R65. Неровности рельсовых нитей для всех конфигураций соответствуют пути хорошего качества согласно стандарту UIC.

1. Запустите программу **UM Simulation**. Откройте модель вагона из каталога [{Данные УМ}\samples\Rail_Vehicles\simple_18_100](#). Откройте **Инспектор моделирования объекта** и перейдите на вкладку **Ж.-д. экипаж**.

2. Создадим первую конфигурацию.

1. Перейдите на вкладку **Путь | Модель и параметры** и укажите **Модель = Твердотельный путь**.

2. Перейдите на вкладку **Путь | Макрогеометрия** и укажите **Тип пути = Прямая**.

3. Перейдите на вкладку **Путь | Неровности**, установите **Тип пути** в значение *Неровный*, а **Тип задания неровностей** в значение *Из файла*. При помощи кнопки  **Загрузить группу неровностей из файла** назначьте рельсовым нитям группу неровностей *ERRI_Low_3000m.tig* из каталога [{Данные УМ}\rw](#).

4. Перейдите на вкладку **Колесо/Рельс | Колеса | Профили** и назначьте всем колесам профиль *newwagpw.wpf* из каталога [{Данные УМ}\rw\prf](#). Подробнее о назначении профилей колес см. [Глава 8](#), п. "*Назначение профилей колес*".

5. Перейдите на вкладку **Колесо/Рельс | Рельсы** и установите следующие значения для параметров:

- **Подуклонка рельса (рад)** = 0.05;
- **Расстояние СКР-СКК (мм)** = 4.845.

Замечание Значение **СКР-СКК** = 4.845 мм соответствует ширине колеи 1520 мм на уровне измерения 13 мм от поверхности катания колеса по рельсу.

Затем назначьте обоим рельсам профиль *r65new.rpf* из каталога [{Данные УМ}\rw\prf](#). Подробнее о назначении профилей рельсов см. [Глава 8](#), п. "Назначение профилей рельсов".

6. Перейдите на вкладку **Контакт | Контактные силы**. Выберите модель контакта *В. Кика и И. Пиотровского* и установите следующие значения для контактных параметров:

- **Модуль упругости** = $2.1 \cdot 10^{11}$;
- **Коэффициент Пуассона** = 0.27;
- **Ширина полосы (мм)** = 1000;
- **Минимальное число полос** = 20;
- **Число элементов** = 20;
- **Коэффициент внедрения** = 0.55;
- **Доля демпфирования** = 0.001.

На этом подготовка первой конфигурации завершена.

7. Перейдите на вкладку **Износ профилей колес** и добавьте конфигурацию к набору (п. 16.1.1.1. *Создание набора конфигураций*, стр. 16-12). Установите следующие значения для параметров добавленной конфигурации (рис. 16.20):

- **Имя** = *Прямая*;
- **Длина** = 820;
- **Начало участка изнашивания** = 30;
- **Множество скоростей** = 40, 60, 80 км/ч (11.11, 16.67, 22.22 м/с);
- **Идентификаторы** = *Текущие*.

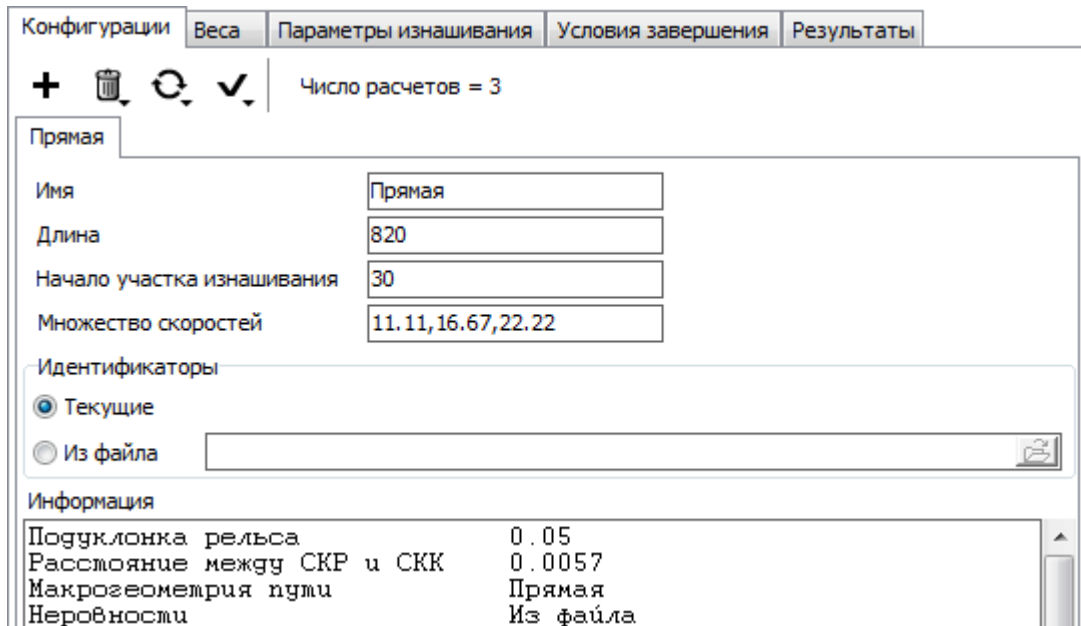


Рис. 16.20. Конфигурация *Прямая*

8. Перейдите на вкладку **Веса**. Назначьте **Вес конфигурации** 0.8 и **Веса скоростей** 0.294, 0.54 и 0.166 соответственно, рис. 16.21.

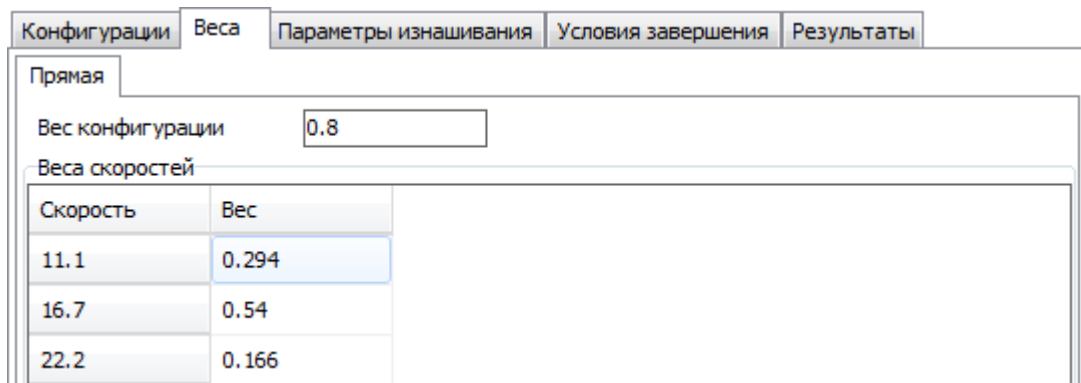


Рис. 16.21. Вес конфигурации и веса скоростей

3. Создадим вторую конфигурацию.

1. Перейдите на вкладку **Путь | Макрогеометрия** и укажите **Тип пути** = *Кривая*. Установите следующие значения для параметров кривой:

- **L1** = 10;
- **P11** = 50;
- **S1** = 300;
- **R1** = 650;
- **H1** = 0.1;
- **P12** = 50;
- **dY1** = 0;
- **Сглаживание** = 8.

2. Перейдите на вкладку **Колесо/Рельс | Рельсы** и назначьте левому (наружному) рельсу профиль *r65worn.rpf* из каталога [{Данные УМ}\rw\prf](#). Для правого рельса оставьте профиль *r65new.rpf*.

Все остальные параметры оставим без изменений.

3. Добавьте конфигурацию к набору. Установите следующие значения для параметров конфигурации:

- **Имя** = *Кривая R650*;
- **Длина** = 410;
- **Начало участка изнашивания** = 60;
- **Множество скоростей** = 40, 60, 80 км/ч (11.11, 16.67, 22.22 м/с);
- **Идентификаторы** = *Текущие*.

4. Перейдите на вкладку **Веса**. Назначьте **Вес конфигурации** 0.15 и **Веса скоростей** 0.294, 0.54 и 0.166 соответственно.

4. Создадим третью конфигурацию:

1. Перейдите на вкладку **Путь | Макрогеометрия** и укажите **Тип пути** = *Кривая*. Установите следующие значения для параметров кривой:

- **L1** = 10;
- **P11** = 50;
- **S1** = 300;
- **R1** = 350;
- **H1** = 0.1;
- **P12** = 50;
- **dY1** = 0.01;
- **Сглаживание** = 8.

Все остальные параметры оставим без изменений.

2. Добавьте конфигурацию к набору. Установите следующие значения для параметров конфигурации:

- **Имя** = *Кривая R350*;
- **Длина** = 410;
- **Начало участка изнашивания** = 60;
- **Множество скоростей** = 50 км/ч (13.89 м/с);
- **Идентификаторы** = *Текущие*.

3. Перейдите на вкладку **Веса**. Назначьте **Вес конфигурации** 0.05 и **Веса скоростей** 1.

16.1.2.3. Настройка параметров изнашивания

Перейдите на вкладку **Параметры изнашивания** и установите следующие значения для параметров изнашивания (рис. 16.22):

- **Число итераций** = 10;
- **Число шагов износа** = 2000;
- **Пробег (км)** = 10,

т.е. общий пробег составит $km_{tot} = N_{it}N_{ws}km_{step} = 10 \cdot 2000 \cdot 10 = 200\,000$ км;

- **Ширина интервала накопления износа (мм) = 1;**
- **Кососимметричный износ колесных пар = да;**
- **Симметричный износ профилей одной колесной пары = да;**
- **Прерывать расчет при вырождении профиля = да;**
- **Коэффициент износа ($\text{м}^3/\text{Дж}$) = $1.83 \cdot 10^{-13}$;**
- **Коэффициент скачка = 1.**

Параметр	Значение
Число итераций	10
Число шагов износа	2000
Пробег (км)	10
Ширина интервала накопления износа (мм)	1
<input checked="" type="checkbox"/> Кососимметричный износ колесных пар	
<input checked="" type="checkbox"/> Симметричный износ профилей одной колесной пары	
<input checked="" type="checkbox"/> Прерывать расчет при вырождении профиля	
Коэффициенты модели изнашивания	
Коэффициент износа ($\text{м}^3/\text{Дж}$)	1.83E-13
Критическая плотность мощности ($\text{Вт}/\text{мм}^2$)	4
Коэффициент скачка	1

Рис. 16.22. Параметры изнашивания

16.1.2.4. Настройка условий завершения

Перейдите на вкладку **Условия завершения** и выключите все опции, т.е. в проекте не будут использоваться условия завершения по показателям износа. Моделирование будет завершено по достижению заданного числа итераций износа.

16.1.2.5. Настройка сохранения результатов

Перейдите на вкладку **Результаты**. В поле **Каталог сохранения результатов** укажите путь к каталогу, в котором будут размещены результаты расчета. Установите следующие значения для параметров сохранения результатов (рис. 16.23):

- **Шаг сохранения результатов = 2000**, т.е. результаты будут записываться каждый 2000 шаг износа;
- **Сохранять распределение потерь материала по профилю = да.**

Параметр	Значение
Каталог сохранения результатов	C:\Users\Public\Documents\UM Software Lab\Universal Mechanism
Сохранять результаты каждый	2000 шаг износа
<input checked="" type="checkbox"/> Сохранять распределение потерь материала по профилю	

Рис. 16.23. Сохранение результатов

Проект износа подготовлен. Включите опцию **Расчет эволюции профиля колеса** (рис. 16.10) и запустите моделирование, нажав кнопку **Интегрирование**.

16.1.3. Анализ результатов

Анализ результатов расчета износа профилей колес выполняется с помощью специализированного инструмента **Анализ износа профилей ж.-д. колес** (Главное меню | Инструменты | Анализ износа ж.-д. профилей | Профили колес...), рис. 16.24. Чтобы загрузить результаты расчета нажмите на кнопку **Обзор...** и укажите каталог с результатами или выберите соответствующий путь из списка ранее открытых каталогов.

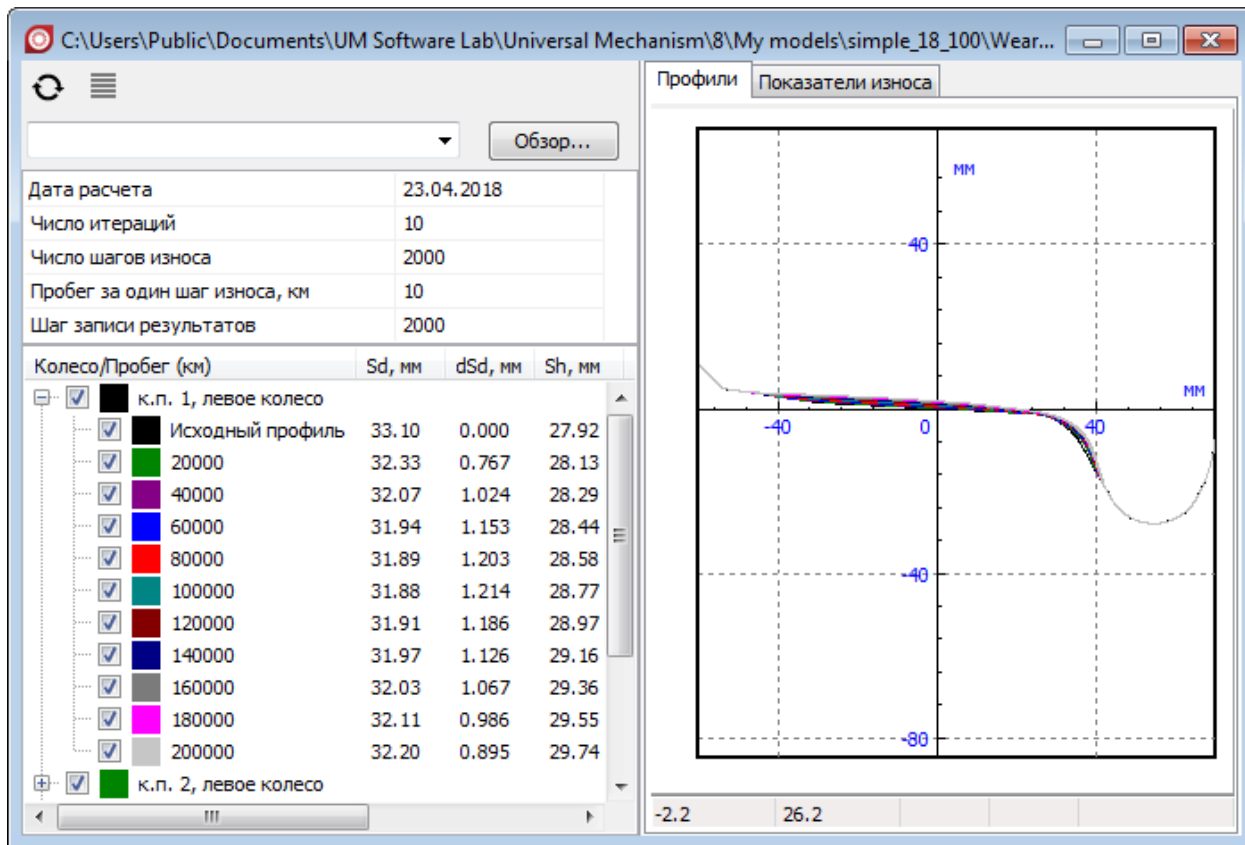



Рис. 16.24. Инструмент **Анализ износа профилей ж.-д. колес**

В дереве результатов для каждого значения пробега в столбцах приведены численные значения показателей износа (рис. 16.4, рис. 16.5). При клике правой кнопкой мыши на дереве результатов появляется контекстное меню. Команды контекстного меню предоставляют дополнительные возможности обработки результатов: открыть профиль в редакторе профилей и скопировать значение показателей износа в буфер обмена. На вкладке **Профили** приведены профили, полученные на соответствующем пробеге, рис. 16.25; на вкладке **Показатели износа** – графики зависимости показателей износа от пробега, рис. 16.26. Кнопка **Настройки**  служит для управления видимостью графиков и соответствующих им столбцов таблицы, а так же для доступа к другим настройкам.

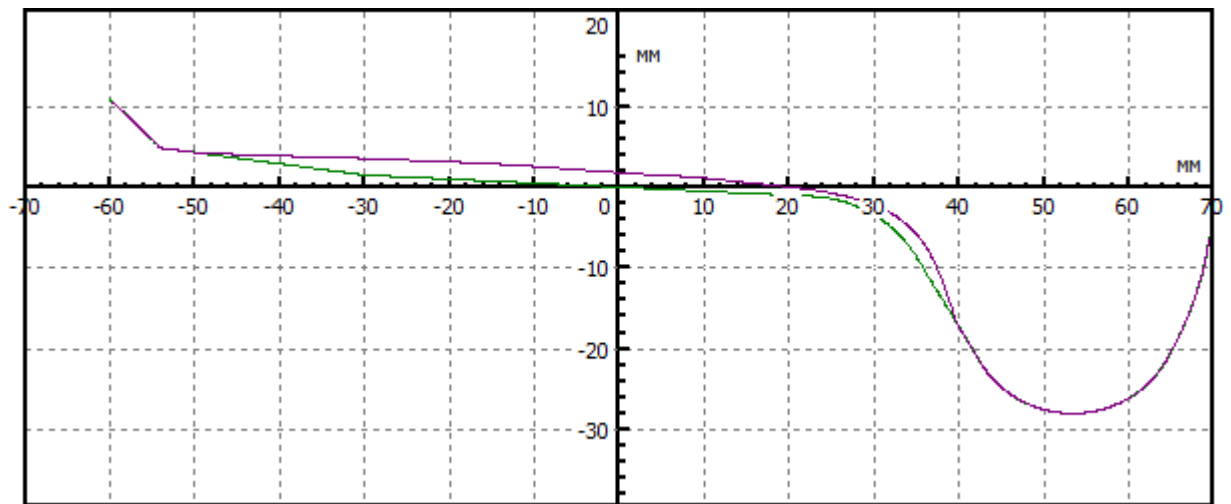


Рис. 16.25. Профиль левого колеса 1-й колесной пары в неизношенном состоянии и после пробега 200 000 км

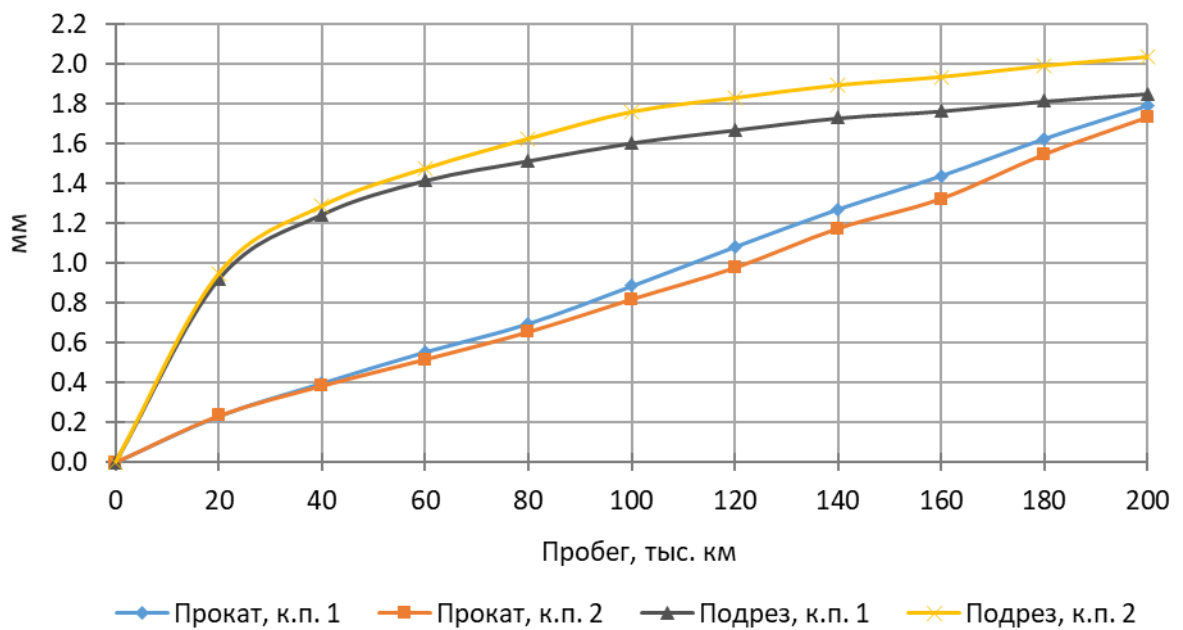


Рис. 16.26. Прокат и подрез гребней левых колес 1-й и 2-й колесных пар

16.1.4. Расчеты на многопоточных процессорах

Рассмотрим эффективность параллельных расчетов на примере электровоза ЭС5К и набора конфигураций, приведенных в табл. 16.3. Модель электровоза содержит 31 тело с 58 степенями свободы, рис. 16.27.

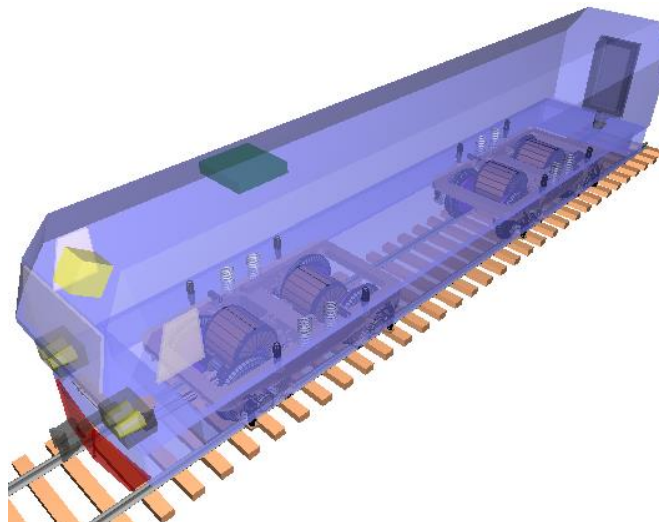


Рис. 16.27. Модель электровоза ЭС5К

Таблица 16.3

Набор конфигураций

Радиус кривой, м	Скорости, км/ч	Тяга
323	25.2, 50.4, 64.8	0/0.6
581	25.2, 50.4, 64.8	0/0.6
1497	25.2, 50.4, 64.8	0/0.6
Прямая	25.2, 50.4, 64.8	0/0.6
Общее число проездов		24

Эффект ускорения процесса моделирования износа в зависимости от числа используемых параллельных потоков показан на рис. 16.28. Результаты получены на компьютере с процессором Intel Core i7-12700KF.

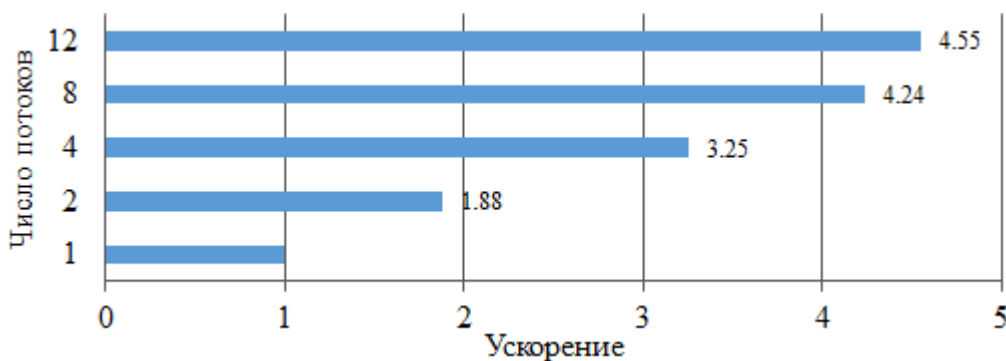


Рис. 16.28. Ускорение процесса моделирования износа профиля колеса в зависимости от числа используемых параллельных потоков

16.2. Инструмент UM Loco/Rail Profile Wear Evolution: прогнозирование износа профилей ж.-д. рельсов

Инструмент **Rail Profile Wear Evolution** модуля **UM Loco** программного комплекса «Универсальный механизм» предназначен для прогнозирования износа профилей ж.-д. рельсов. Признаком наличия модуля или инструмента в текущей конфигурации УМ является знак «+» в соответствующей строке окна **О программе** (**Главное меню** | **Помощь** | **О программе ...**), рис. 16.29.

Замечание. Обратите внимание, что инструмент **Rail Profile Wear Evolution** поддерживается только моделями контактных сил В. Кика и И. Пиотровского (инструмент **UM Loco/Multi-point Contact Model**) и CONTACT. Интерфейс к модели CONTACT реализован в инструменте **UM Loco/CONTACT add-on interface**.

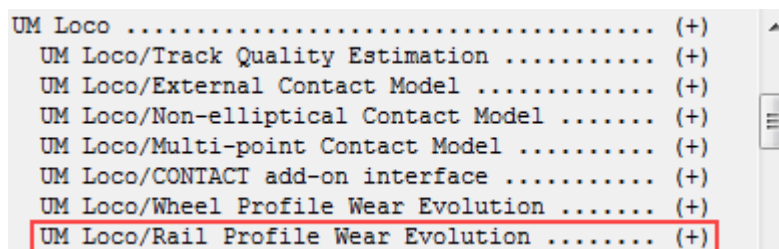


Рис. 16.29. Приznak наличия модуля или инструмента в текущей конфигурации УМ


Инструмент **Rail Profile Wear Evolution** представляет собой надстройку над модулем многовариантных расчетов **UM Experiments** ([Глава 6](#)), который был дополнен понятием *эволюции*. Под эволюцией понимается серия многовариантных расчетов одинаковой структуры – *итераций* износа, отличающихся друг от друга только профилями рельсов. В пределах итерации профили рельсов не изменяются. Изменение профилей происходит после окончания итерации с учетом весовых коэффициентов численных экспериментов и масштабного множителя.

Инструмент **Rail Profile Wear Evolution** позволяет:

- прогнозировать износ профилей рельсов;
- сохранять профили и эпюры износа после каждой итерации износа;
- рассчитывать показатели износа профилей рельсов;
- сохранять файлы рассчитанных переменных для каждой итерации износа;
- создавать наборы исходных данных для модуля моделирования накопления контактно-усталостных повреждений в рельсах **UM RCF Rail** ([Глава 25](#)).

Предполагается, что пользователь уже знаком с понятиями и структурой модуля многовариантных расчетов **UM Experiments** и имеет опыт работы с ним.

16.2.1. Моделирование износа профилей рельсов

Запустите программу **UM Simulation**. Создайте новый проект прогнозирования износа профилей рельсов, выполнив команду главного меню **Сканирование | Новый проект – износ профилей рельсов....** Появится стандартное окно описания проекта сканирования, дополненное вкладкой **Износ профилей рельсов**. Перейдите на вкладку **Альтернативы** и добавьте в проект модели рельсовых экипажей, которые эксплуатируются на рассматриваемом участке пути. Используйте кнопку  для назначения экипажам весовых коэффициентов, рис. 16.30. Весовой коэффициент экипажа – это удельный вес (доля) экипажа в железнодорожном парке, эксплуатируемом на исследуемом участке пути.

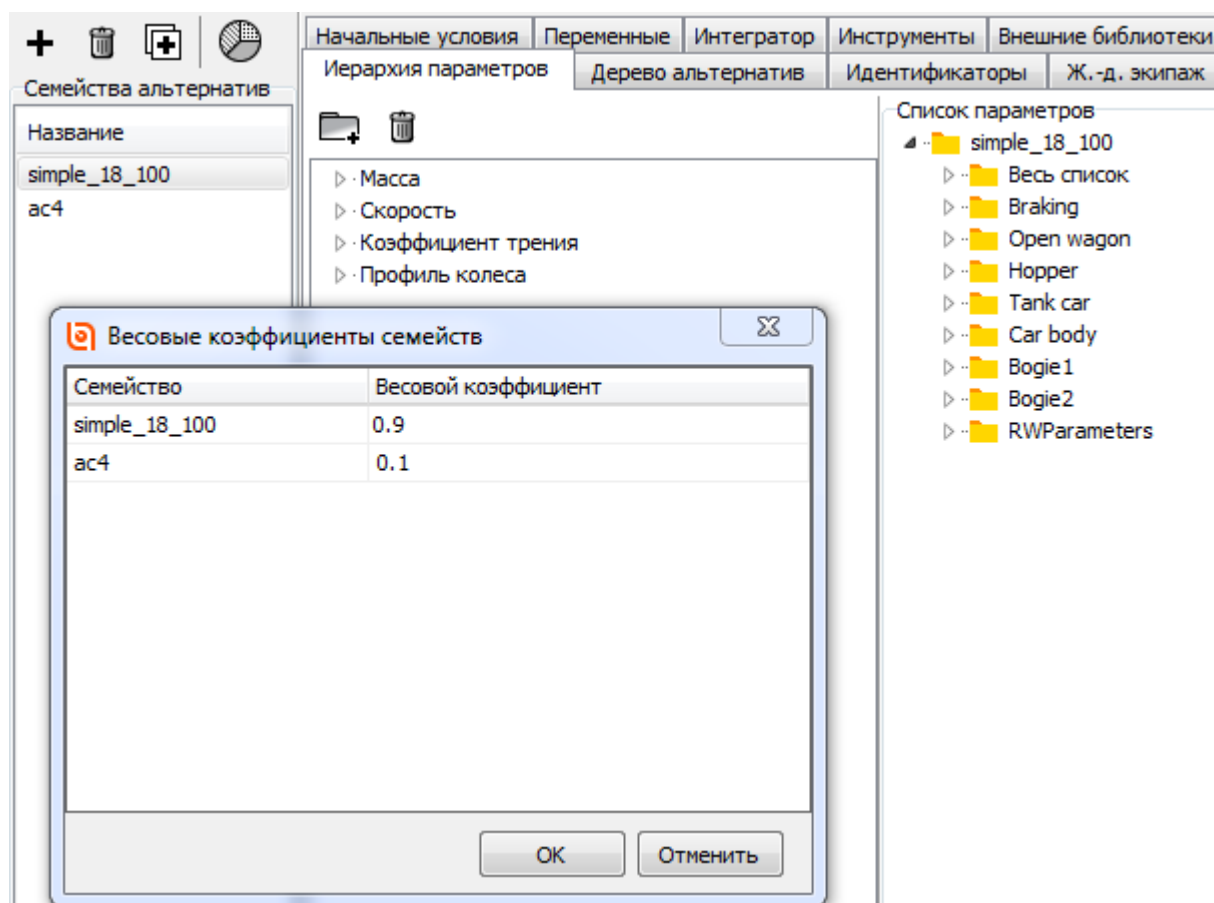


Рис. 16.30. Назначение весовых коэффициентов семействам

Создайте иерархию параметров для добавленных экипажей. Для этого выберите в списке **Семейств альтернатив** один из экипажей и перейдите на вкладку **Иерархия параметров**. Определите группы параметров, описывающие различные состояния выбранного экипажа в эксплуатации, например, профили колес с различной степенью изношенности, скорости движения, загрузку, коэффициенты трения в контакте колесо-рельс и т.д. (рис. 16.31).

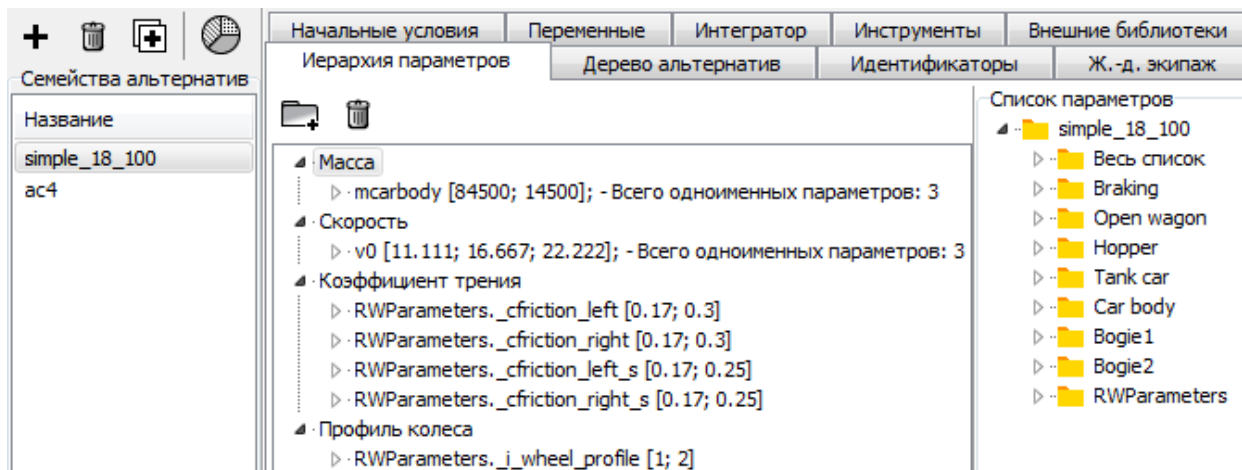


Рис. 16.31. Пример иерархии параметров

Каждому параметру группы назначается весовой коэффициент (рис. 16.32), совокупность весовых коэффициентов определяет гистограмму распределения значений параметра в группе.

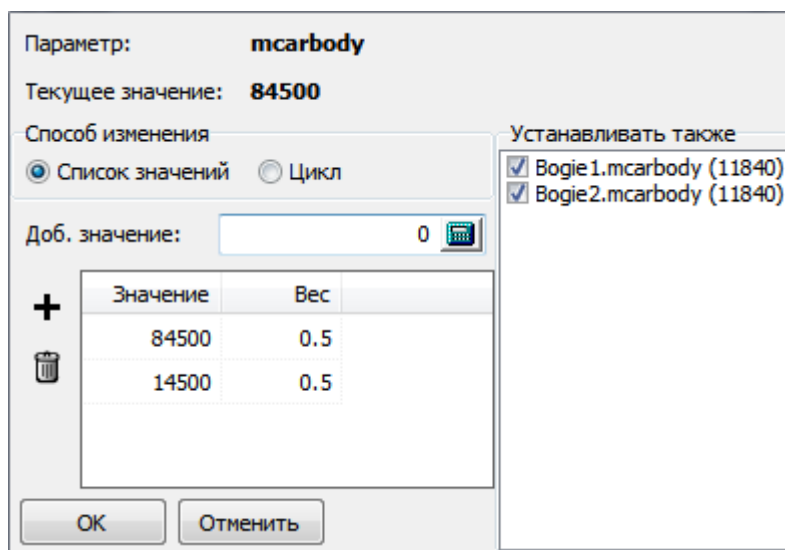


Рис. 16.32. Назначение значений и весовых коэффициентов параметру

Перейдите на вкладку **Износ профилей рельса**. На вкладках **Параметры пути**, **Параметры контакта колесо-рельс** и **Профили** задаются параметры пути (ширина колеи, макрогеометрия, неровности и т.д.), контакта колесо-рельс и профили рельсов для *ВСЕХ* экипажей в проекте. На вкладке **Параметры изнашивания** задаются параметры моделирования изнашивания и назначается модель изнашивания, рис. 16.33.

Рис. 16.33. Параметры моделирования изнашивания профиля рельса

Число итераций (N_{it}) – число итераций моделирования износа профиля рельса. Одна итерация – это однократный расчет совокупности численных экспериментов всех семейств альтернатив.

Тоннаж (M_{it} , млн. тонн) – это тоннаж, назначенный одной итерации. Величина тоннажа используется для масштабирования износа в конце каждой итерации. Целью масштабирования является получение значимого износа при небольшом суммарном весе набора экипажей, выбранных для моделирования. Фактически эпюра износа умножается на масштабный коэффициент C_{scale} :

$$C_{scale} = M_{it} / \sum_{i=1}^N M_{vi} \tag{16.17}$$

где M_v – масса экипажа, N – число экипажей.

Наработанный тоннаж:

$$M_{tot} = N_{it} M_{it} \tag{16.18}$$

Ширина интервала накопления износа (h) – шаг дискретизации по дуговой координате поверхности рельса на продольные полосы. Используется для построения гистограммы распределения износа по профилю рельса, рис. 16.3.

Опция **Прерывать расчет при вырождении профиля** – см. п. 16.1.1.3 *Параметры изнашивания*, стр. 16-13. Типичная причина вырождения профиля рельса – большое значение параметра **Тоннаж**.

Начало участка изнашивания (S_b) и **Конец участка изнашивания** (S_e) определяют границы участка изнашивания рельсов вдоль пути. Эти параметры используются для того, чтобы исключить из расчета износа «заезд на неровности», прямолинейный участок перед кривой, выезд из кривой т.п. Кроме того, достижение экипажем конца участка изнашивания является условием завершения численного эксперимента.

В группе **Модель изнашивания** выберите одну из доступных моделей изнашивания.

Рассмотрим методику изменения профиля рельса. Пусть $w_{ij,l}$ и $w_{ij,r}$ – эпюры износа для левого (l) и правого рельсов (r) рассчитанные для j -го численного эксперимента семейства i . Тогда результирующая эпюра износа вычисляется следующим образом:

$$w_{l,r} = \sum_{i=1}^N \alpha_i \sum_{j=1}^{M_i} \beta_{ij} w_{ij,l,r}, \quad (16.19)$$

где N – число экипажей, α_i – весовой коэффициент экипажа, M_i – число численных экспериментов для i -го экипажа, β_{ij} – весовой коэффициент численного эксперимента.

Глубина износа в центре полосы:

$$\delta_{l,r}(s_i) = \frac{\tilde{w}_{l,r}(s_i)}{(S_e - S_b)h}, \quad (16.20)$$

где s_i – дуговая координата центра полосы, $\tilde{w}_{l,r}$ – сглаженная эпюра износа, h – ширина полосы.

16.2.2. Пример создания проекта эволюции профиля рельса

16.2.2.1. Описание проекта

В качестве примера рассмотрим износ профилей рельса Р65 (ГОСТ Р 51685-2013) в кривой с радиусом 578 м. Доли грузовых вагонов и локомотивом:

- груженых грузовых вагонов 0.47;
- порожних грузовых вагонов 0.47;
- локомотивов 0.06.

Средняя скорость движения 60 км/ч. Локомотивы снабжены гребнесмазывателями.

Замечание Заранее подготовленный проект эволюции профиля рельса, описанный ниже, находится в каталоге [{Данные УМ}\samples\tutorial\R65RailWear](#).

Проект будет содержать три семейства альтернатив.

Первое семейство альтернатив – это груженный грузовой вагон с трёхэлементными тележками модели 18-100. Модель вагона находится в каталоге [{Данные УМ}\samples\Rail Vehicles\simple 18 100](#). Второе семейство альтернатив – порожний грузовой вагон. Третье семейство альтернатив – локомотив Со_Со. Модель локомотива находится в каталоге [{Данные УМ}\samples\Rail Vehicles\Co_Co](#).

Следующие параметры будут варьироваться.

1. Коэффициент трения на боковой поверхности левого рельса 0.17 и 0.3.
2. Профиль поверхности катания колеса грузового вагона ГОСТ 10791-2011: неизношенный и изношенный после пробега 100000 км, полученный в результате моделирования износа в инструменте **UM Loco/Wheel Profile Wear Evolution**.
3. Профиль поверхности катания колеса локомотива: ГОСТ 11018-2011 и ДМеТИ.

Неровности рельсовых нитей соответствуют пути плохого качества согласно стандарту UIC.

Структура многовариантного расчета приведена на рис. 16.34.

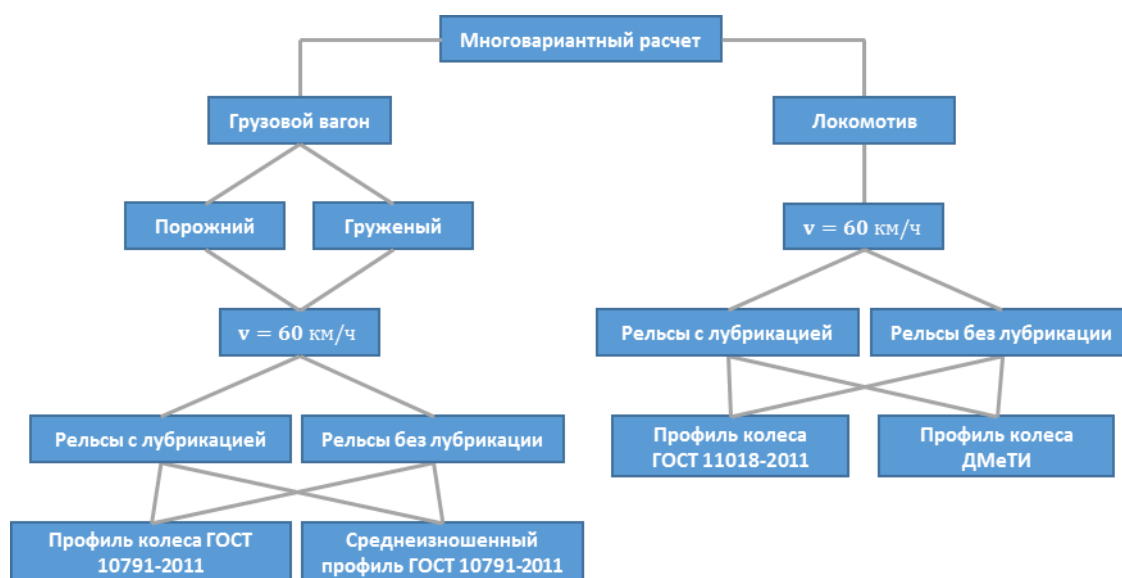


Рис. 16.34. Многовариантный расчет для прогнозирования износа профилей рельсов


16.2.2.2. Создание проекта

1. Запустите программу **UM Simulation**. На панели инструментов главного меню в группе **Единица скорости** установите **м/с**. Создайте новый проект прогнозирования износа профилей рельсов.

2. Создадим первую конфигурацию.

1. Перейдите на вкладку **Альтернативы** и добавьте новое семейство альтернатив, нажав кнопку **+**. В появившемся окне открытия модели выберите модель грузового вагона *simple_18_100*. Выбранная модель появится в списке **Семейства альтернатив**. Присвойте семейству название *simple_18_100_груженный* (клавиша *F2* – переименовать семейство).

2. Перейдите на вкладку **Идентификаторы** и загрузите файл параметров *Loaded car*, который соответствует вагону в груженом состоянии.


3. Перейдите на вкладку **Ж.-д экипаж | Колесо/Рельс | Колеса | Профили**. Очистите список **Множество профилей колес**, удалив назначенные по умолчанию профили с помощью кнопки . С помощью кнопки **+** добавьте в список профили *newwagnw.wpf* и *wornwagnw100000km.wpf* из каталога [{Данные УМ}\rw\prf](#). Назначьте всем колёсам профиль *newwagnw.wpf*.

4. Перейдите на вкладку **Ж.-д. экипаж | Скорость** и выберите режим продольного движения $v = \text{const}$. В группе **Параметры управления скоростью** в списке **Тело** выберите *Car body*.

5. Перейдите на вкладку **Ж.-д. экипаж | Контакт | Трение** и установите флаг **Лубрикация боковой поверхности**.

6. Перейдите на вкладку **Интегратор | Параметры моделирования**. Установите следующие значения для параметров моделирования:

- **Погрешность** = $1E-7$;
- **Расчет матриц Якоби** = да;
- **Матрицы Якоби для контакта колесо/рельс** = да.

7. Перейдите на вкладку **Иерархия параметров**. Добавьте новую группу параметров с помощью кнопки  и назовите её **Скорость**. В списке параметров модели выберите параметр *simple_18_100 | Весь список | $v0$* . В окне **Изменение значений параметра** введите значение *16.67* (м/с) и весовой коэффициент *1*. Закройте окно настройки значений параметров и вернитесь в окно описания проекта сканирования.

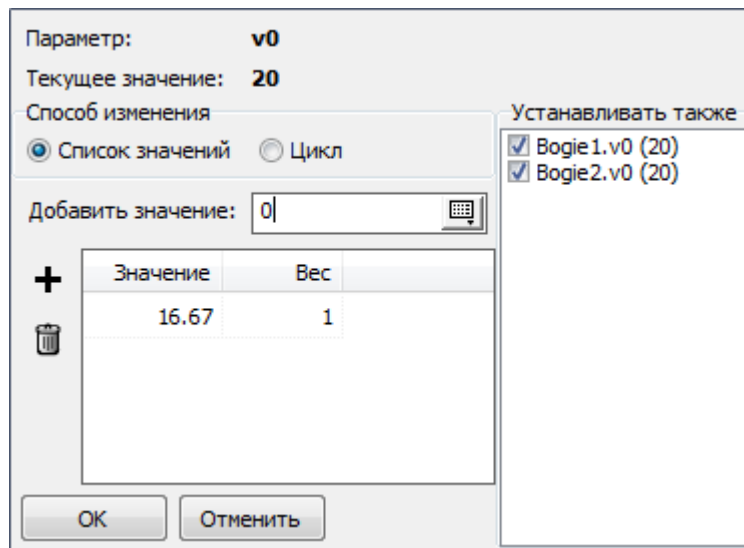


Рис. 16.35. Назначение значений и весовых коэффициентов параметру

8. Добавьте новую группу параметров и назовите её **Коэффициент трения**. В списке параметров модели выберите параметр *simple_18_100 / RWParameters / Коэф. трения в контакте колесо/рельс / _cfraction_left*. В окне **Изменение значений параметра** введите значения 0.3 и 0.3 и весовые коэффициенты 0.5 для этих значений. Затем в списке параметров модели выберите параметр *simple_18_100 / RWParameters / Коэф. трения в контакте колесо/рельс / _cfraction_right*. В окне **Изменение значений параметра** введите значения 0.3 и 0.3 и весовые коэффициенты 0.5 для этих значений.

9. В списке параметров модели выберите параметр *simple_18_100 / RWParameters / Коэф. трения в контакте колесо/рельс / _cfraction_left_s*. В окне **Изменение значений параметра** введите значения 0.17 и 0.3 и весовые коэффициенты 0.5 для этих значений. Затем в списке параметров модели выберите параметр *simple_18_100 / RWParameters / Коэф. трения в контакте колесо/рельс / _cfraction_right_s*. В окне **Изменение значений параметра** введите значения 0.3 и 0.3 и весовые коэффициенты 0.5 для этих значений.

10. Добавьте новую группу параметров и назовите её **Профиль колеса**. В списке параметров модели выберите параметр *simple_18_100 / RWParameters / Профили / _i_wheel_profile*. В окне **Изменение значений параметра** введите значения 1 (профиль *newwagnw*) и 2 (профиль *wornwagnw100000km*) и весовые коэффициенты 0.2 и 0.8 соответственно для этих значений. После выполненных действий иерархия параметров для семейства альтернатив *simple_18_100_груженный* будет выглядеть, как показано на рис. 16.36.

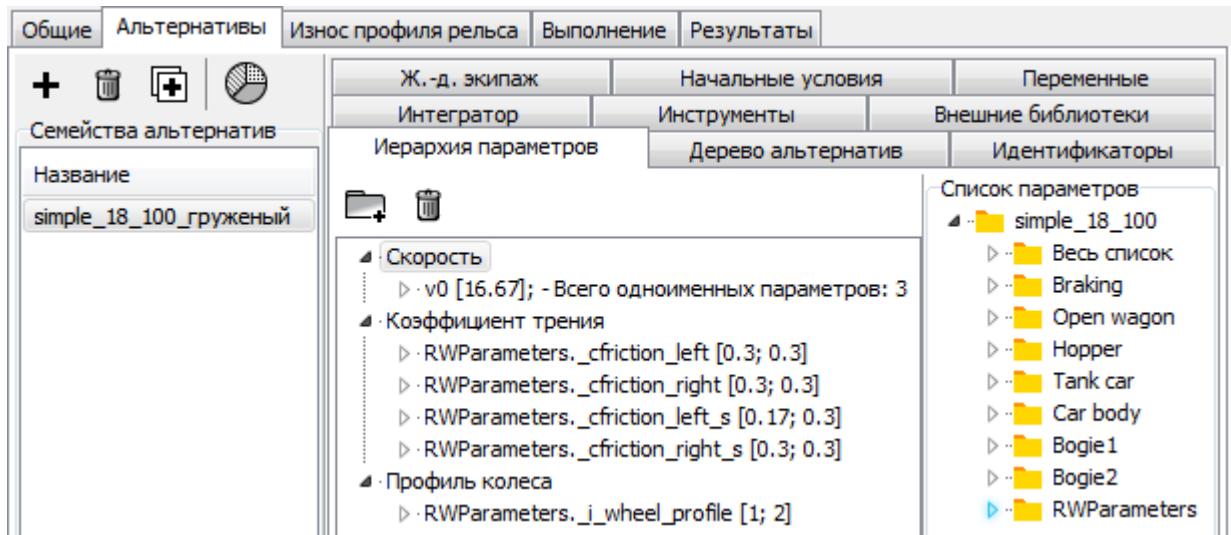


Рис. 16.36. Иерархия параметров семейства альтернатив *simple_18_100_груженный*

3. Создадим вторую конфигурацию.

1. Перейдите на вкладку **Альтернативы** и продублируйте семейство альтернатив *simple_18_100_груженный*, нажав кнопку

2. Присвойте семейству название *simple_18_100_порожний*.

3. Перейдите на вкладку **Идентификаторы** и загрузите файл параметров *Empty car*, который соответствует вагону в порожнем состоянии.

4. Создадим третью конфигурацию.

1. Перейдите на вкладку **Альтернативы** и добавьте новое семейство альтернатив, нажав кнопку . В появившемся окне открытия модели выберите модель локомотива *Co_Co*.

2. Перейдите на вкладку **Ж.-д экипаж | Колесо/Рельс | Колеса | Профили**. Очистите список **Множество профилей колес**, удалив назначенные по умолчанию профили с помощью кнопки . С помощью кнопки добавьте в список профили *newlocow.wpf* и *dmeti30.wpf* из каталога [{Данные УМ}\rw\prf](#). Назначьте всем колёсам профиль *newlocow.wpf*.

3. Перейдите на вкладку **Ж.-д. экипаж | Скорость** и выберите режим продольного движения $v = \text{const}$. В группе **Параметры управления скоростью** в списке **Тело** выберите *Body*.

5. Перейдите на вкладку **Ж.-д. экипаж | Контакт | Трение** и установите флаг **Лубрикация боковой поверхности**.

6. Перейдите на вкладку **Интегратор | Параметры моделирования**. Установите следующие значения для параметров моделирования:

- **Погрешность** = 1E-7;
- **Расчет матриц Якоби** = да;
- **Матрицы Якоби для контакта колесо/рельс** = да.


7. Перейдите на вкладку **Иерархия параметров**. Добавьте новую группу параметров с помощью кнопки и назовите её **Скорость**. В списке параметров модели выберите параметр *co_co / Весь список / v0*. В окне **Изменение значений параметра** введите

значение 16.67 (м/с) и весовой коэффициент 1. Закройте окно настройки значений параметров и вернитесь в окно описания проекта сканирования.

8. Добавьте новую группу параметров и назовите её **Коэффициент трения**. В списке параметров модели выберите параметр *co_co / RWParameters / Коэф. трения в контакте колесо/рельс / _cfraction_left*. В окне **Изменение значений параметра** введите значения 0.3 и 0.3 и весовые коэффициенты 0.5 для этих значений. Затем в списке параметров модели выберите параметр *co_co / RWParameters / Коэф. трения в контакте колесо/рельс / _cfraction_right*. В окне **Изменение значений параметра** введите значения 0.3 и 0.3 и весовые коэффициенты 0.5 для этих значений.

9. В списке параметров модели выберите параметр *co_co / RWParameters / Коэф. трения в контакте колесо/рельс / _cfraction_left_s*. В окне **Изменение значений параметра** введите значения 0.17 и 0.3 и весовые коэффициенты 0.5 для этих значений. Затем в списке параметров модели выберите параметр *co_co / RWParameters / Коэф. трения в контакте колесо/рельс / _cfraction_right_s*. В окне **Изменение значений параметра** введите значения 0.3 и 0.3 и весовые коэффициенты 0.5 для этих значений.

10. Добавьте новую группу параметров и назовите её **Профиль колеса**. В списке параметров модели выберите параметр *co_co / RWParameters / Профили / _i_wheel_profile*. В окне **Изменение значений параметра** введите значения 1 (профиль *newlocow*) и 2 (профиль *dmeti30*) и весовые коэффициенты 0.5 для этих значений.

5. Перейдите на вкладку **Альтернативы**. Используйте кнопку  для вызова диалога задания весовых коэффициентов для семейств альтернатив. Для семейств *simple_18_100_груженный* и *simple_18_100_порожний* задайте весовой коэффициент 0.47, а для семейства *Co_Co* 0.06.

6. Перейдите на вкладку **Износ профилей рельсов | Параметры пути | Макрогеометрия** и укажите **Тип пути** = *Кривая*. Установите следующие значения для параметров кривой:

- **L1** = 30;
- **P11** = 40;
- **S1** = 300;
- **R1** = 578;
- **H1** = 0.067;
- **P12** = 40;
- **dY1** = 0;
- **Сглаживание** = 8.

7. Перейдите на вкладку **Износ профилей рельсов | Параметры изнашивания** и установите следующие значения для параметров изнашивания:


- **Число итераций** = 400;
- **Тоннаж за итерацию (млн. т)** = 0.25;

т.е. наработанный тоннаж составит 100 млн. т;

- **Ширина интервала накопления износа (мм)** = 1;
- **Прерывать расчет при вырождении профиля** = да;
- **Начало участка изнашивания** = 70;

- **Конец участка изнашивания** = 380;
- **Шаг сохранения списка переменных** = 1 итерация;
- **Коэффициент износа** ($\text{м}^3/\text{Дж}$) = $1.6 \cdot 10^{-13}$;
- **Коэффициент скачка** = 1.

8. Перейдите на вкладку **Износ профилей рельсов** | **Параметры пути** | **Модель и параметры** и проверьте что для пути назначена модель *Твердотельный путь*.

9. Перейдите на вкладку **Износ профилей рельсов** | **Параметры пути** | **Неровности**. Установите **Тип пути** в значение *Неровный*, а **Тип задания неровностей** в значение *Из файла*. При помощи кнопки  **Загрузить группу неровностей из файла** назначьте рельсовым нитям группу неровностей *ERRI_Ni_3000m.tig* из каталога [{Данные УМ}\rw](#).

10. Перейдите на вкладку **Износ профилей рельсов** | **Профили** и установите следующие значения для параметров:

- **Подуклонка рельса (рад)** = 0.05;
- **Расстояние СКР-СКК (мм)** = 4.845;

Затем назначьте обоим рельсам профиль *r65new.rpf* из каталога [{Данные УМ}\rw\prf](#).

11. Перейдите на вкладку **Износ профилей рельсов** | **Параметры контакта колесо-рельс**. Выберите модель контакта *В. Кика и И. Пиотровского* и установите следующие значения для контактных параметров:

- **Модуль упругости** = $2.1 \cdot 10^{11}$;
- **Коэффициент Пуассона** = 0.27;
- **Предел текучести при сдвиге** = $3 \cdot 10^8$;
- **Ширина полосы (мм)** = 1000;
- **Минимальное число полос** = 20;
- **Число элементов** = 20;
- **Коэффициент внедрения** = 0.55;
- **Доля демпфирования** = 0.01.
- **Использовать таблицы контактных точек** = да.

Проект износа подготовлен. Перейдите на вкладку **Выполнение**. С помощью протокола убедитесь, что проект сканирования не содержит ошибок. Установите необходимое количество процессов исходя из возможностей вашего компьютера. Запустите моделирование, нажав кнопку **Запустить**.

16.2.3. Анализ результатов

Анализ результатов расчета износа профилей рельсов выполняется с помощью специализированного инструмента **Анализ износа профилей ж.-д. рельсов** (Главное меню | Инструменты | Анализ износа ж.-д. профилей | Профили рельсов...), рис. 16.37. Чтобы загрузить результаты расчета нажмите на кнопку **Обзор...** и укажите каталог с результатами или выберите соответствующий путь из списка ранее открытых каталогов. По умолчанию результаты моделирования износа сохраняются в подкаталоге [RailWear] каталога проекта сканирования. Кроме того, износ профилей можно проанализировать непосредственно в проекте износа. Для этого после выполнения проекта перейдите на вкладку **Результаты | Анализ износа профилей рельсов**.

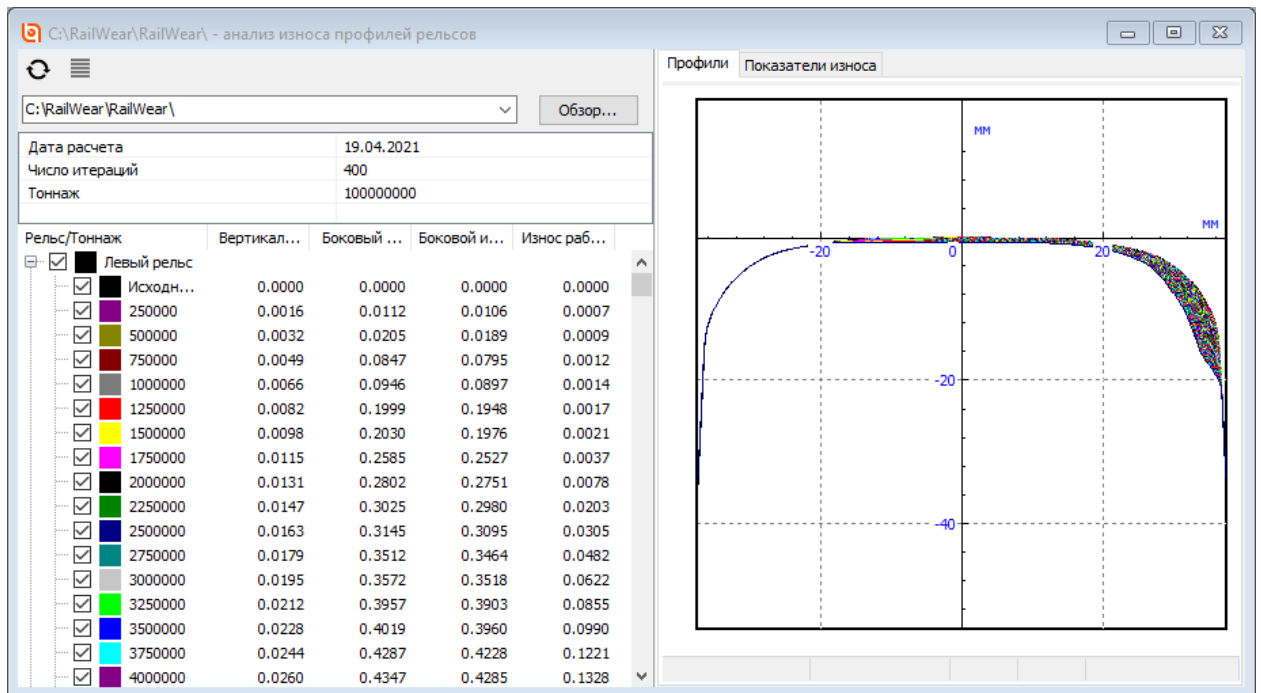



Рис. 16.37. Инструмент Анализ износа профилей ж.-д. рельсов.

В дереве результатов для каждого значения тоннажа в столбцах приведены численные значения показателей износа, рис. 16.6. При клике правой кнопкой мыши на дереве результатов появляется контекстное меню. Команды контекстного меню предоставляют дополнительные возможности обработки результатов: открыть профиль в редакторе профилей и скопировать показатели износа в буфер обмена. На вкладке **Профили** приведены профили, соответствующие наработанному тоннажу, рис. 16.38; на вкладке **Показатели износа** – графики зависимости показателей износа от наработанного тоннажа, рис. 16.39. Используйте кнопку  для задания параметров оценки износа профилей: Н, α и исходных профилей, рис. 16.40.

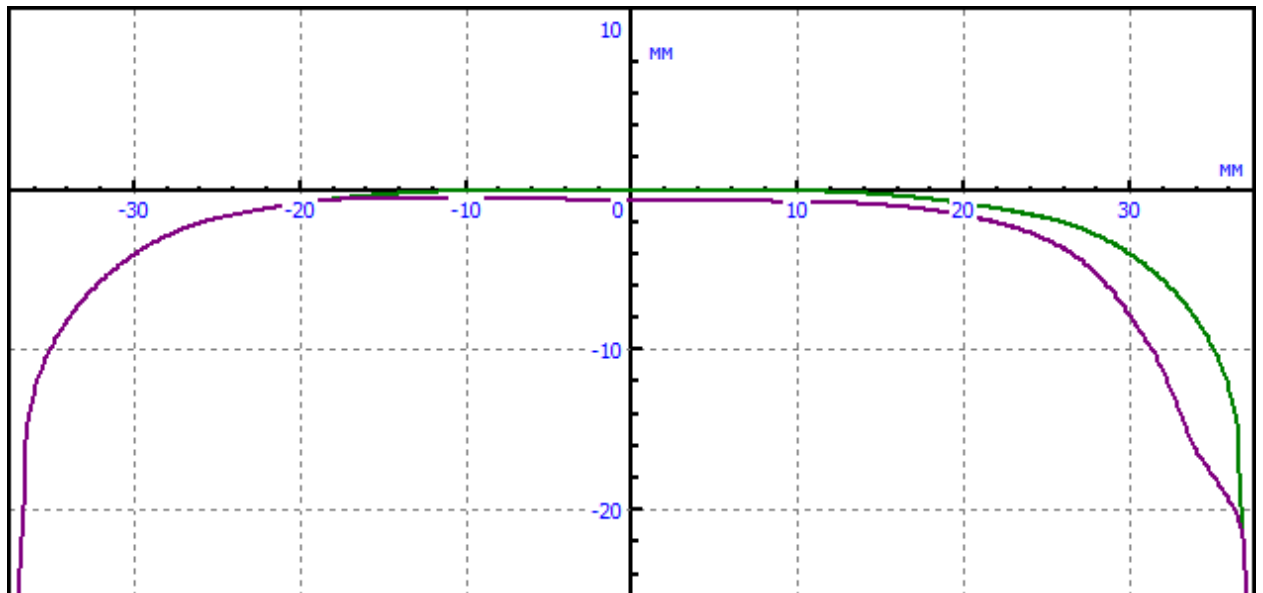


Рис. 16.38. Профиль левого рельса в неизношенном состоянии и с наработанным тоннажем 100 млн. т

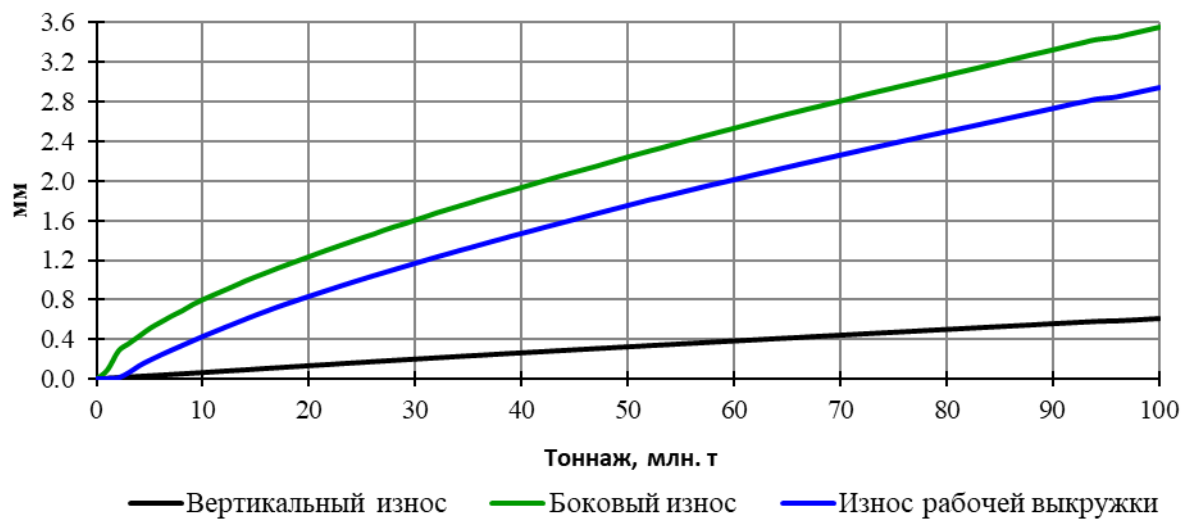


Рис. 16.39. Эволюция показателей износа для профиля левого рельса

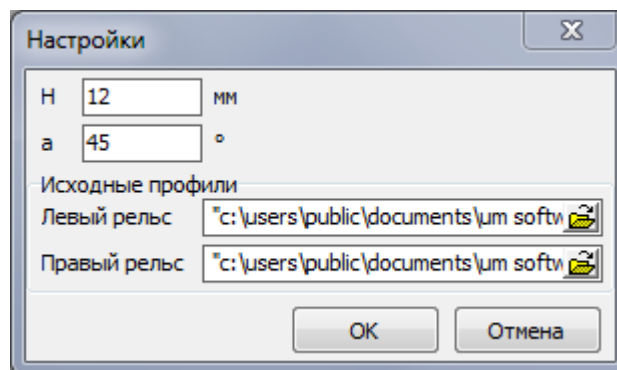


Рис. 16.40. Настройка параметров расчета показателей износа профилей рельсов

16.3. Список литературы

- [1] Piotrowski, J., Kik, W., A simplified model of wheel/rail contact mechanics for non-Hertzian problems and its application in rail vehicle dynamic simulations, *Vehicle System Dynamics*, 46(1-2), pp. 27-48, 2008.
- [2] Archard, J.F., Contact and Rubbing of Flat Surface, *J. Appl. Phys.*, 24(8), pp. 981–988, 1953.
- [3] Jendel, T., Prediction of wheel profile wear – comparisons with field measurements, *Wear*, 253(1-2), pp. 89-99, 2002.
- [4] Krause H., Poll G., Wear of wheel-rail surfaces, *Wear*, 113(1), pp. 103-122, 1986.
- [5] Fleischer, G., Energetische Methode der Bestimmung des Verschleißes, *Schmierungstechnik* 9(4), 269–274, 1973.
- [6] EN 15313. Railway applications. In-service wheelset operation requirements. In-service and off-vehicle wheelset maintenance.
- [7] Правила технической эксплуатации железных дорог. Приложение 5. Техническая эксплуатация железнодорожного подвижного состава.
- [8] Auciello, J., Ignesti, M., Marini, L., Meli, E., Rindi, A., Development of a model for the analysis of wheel wear in railway vehicles, *Meccanica*, 48(3), pp. 681–697, 2013.
- [9] Lewis, R., Braghin, F., Ward, A. et al., Integrating Dynamics and Wear Modelling to Predict Railway Wheel Profile Evolution. In: Ekberg, A., Kabo, E. and Ringsberg, J., (eds.) 6th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, Gothenburg, pp. 7-16, 2003.
- [10] Li, Z., Wheel-rail rolling contact and its application to wear simulation, Doctoral thesis, Delft University of Technology, 2002.
- [11] Шпехт В., Новые данные об износе колес грузовых вагонов // Железные дороги мира. – 1988. – №10. – С. 11-19.