



Начинаем работать



# Моделирование динамики поезда

## Оглавление

<b>НАЧИНАЕМ РАБОТАТЬ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ "УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ": МОДУЛЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПОЕЗДА .....</b>	<b>3</b>
<b>1. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТОРМОЖЕНИЯ ПОЕЗДА .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1. ЧТО МЫ БУДЕМ ИЗУЧАТЬ .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2. СОЗДАНИЕ НОВОГО ОБЪЕКТА ПОЕЗД .....</b>	<b>4</b>
<b>1.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОЕЗДА .....</b>	<b>9</b>
1.3.1. Назначение параметров модели.....	9
1.3.2. Моделирование динамики поезда .....	22
<b>2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ПОЕЗДА .....</b>	<b>26</b>
<b>2.1. ЧТО МЫ БУДЕМ ИЗУЧАТЬ .....</b>	<b>26</b>
<b>2.2. СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ПОЕЗДА.....</b>	<b>26</b>
<b>2.3. НАЗНАЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ .....</b>	<b>30</b>
<b>2.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОЕЗДА.....</b>	<b>44</b>
<b>2.5. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ .....</b>	<b>45</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>48</b>

## Начинаем работать в программном комплексе "Универсальный механизм": модуль моделирования динамики поезда

Данный урок демонстрирует основные возможности модуля **UM Train**, предназначенного для моделирования продольной динамики поезда. Предполагается, что пользователь уже ознакомился с главой [gs\\_UM.pdf](#)<sup>1</sup>, посвященной общим принципам моделирования в ПК УМ, и умеет выполнять некоторые действия в **UM Simulation**: работать с графическим окном, создавать новые переменные, изменять значения идентификаторов и т.д., а также имеет представление о динамике поезда.

---

<sup>1</sup> [www.universalmechanism.com/download/10/rus/g\\_s\\_um.pdf](http://www.universalmechanism.com/download/10/rus/g_s_um.pdf)

# 1. Моделирование режимов торможения поезда

## 1.1. Что мы будем изучать

Данный урок посвящен модулю **UM Train**, его возможностям и принципам работы в нём. При прохождении урока будет рассмотрен пример создания модели поезда и моделирования его динамики в режиме торможения, особое внимание будет уделено следующим вопросам:

- описание макрогеометрии пути;
- учёт сил сопротивления железнодорожного экипажа;
- определение параметров торможения;
- демонстрация результатов моделирования.

В качестве примера будет создана модель поезда, включающая российский двухсекционный электровоз ВЛ80 и 58 грузовых вагонов.

## 1.2. Создание нового объекта Поезд

Откройте программу **UM Input**. В меню программы выберите пункты **Инструменты | Создание модели поезда**, после чего откроется окно **Мастер создания модели поезда**, рис. 1.1.

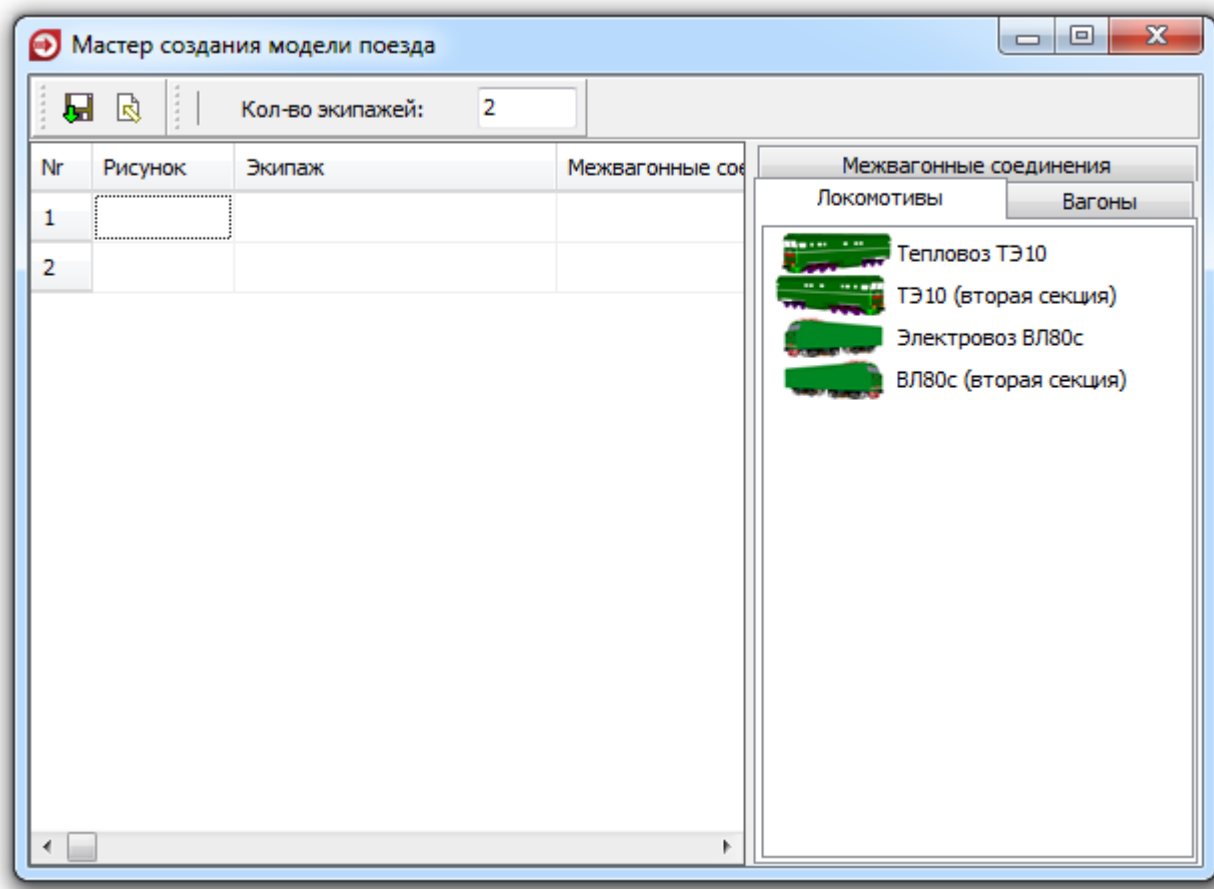


Рис. 1.1. Мастер создания модели поезда

Пользователь с помощью **Мастера создания моделей поезда** должен указать число экипажей. Модели локомотивов, вагонов и межвагонных соединений предлагается выбрать из соответствующей таблицы базы данных (в правой части **Мастера создания модели поезда**).

Для того чтобы включить в модель поезда 60 экипажей установите **Кол-во экипажей** равным **60** (рис. 1.2.).

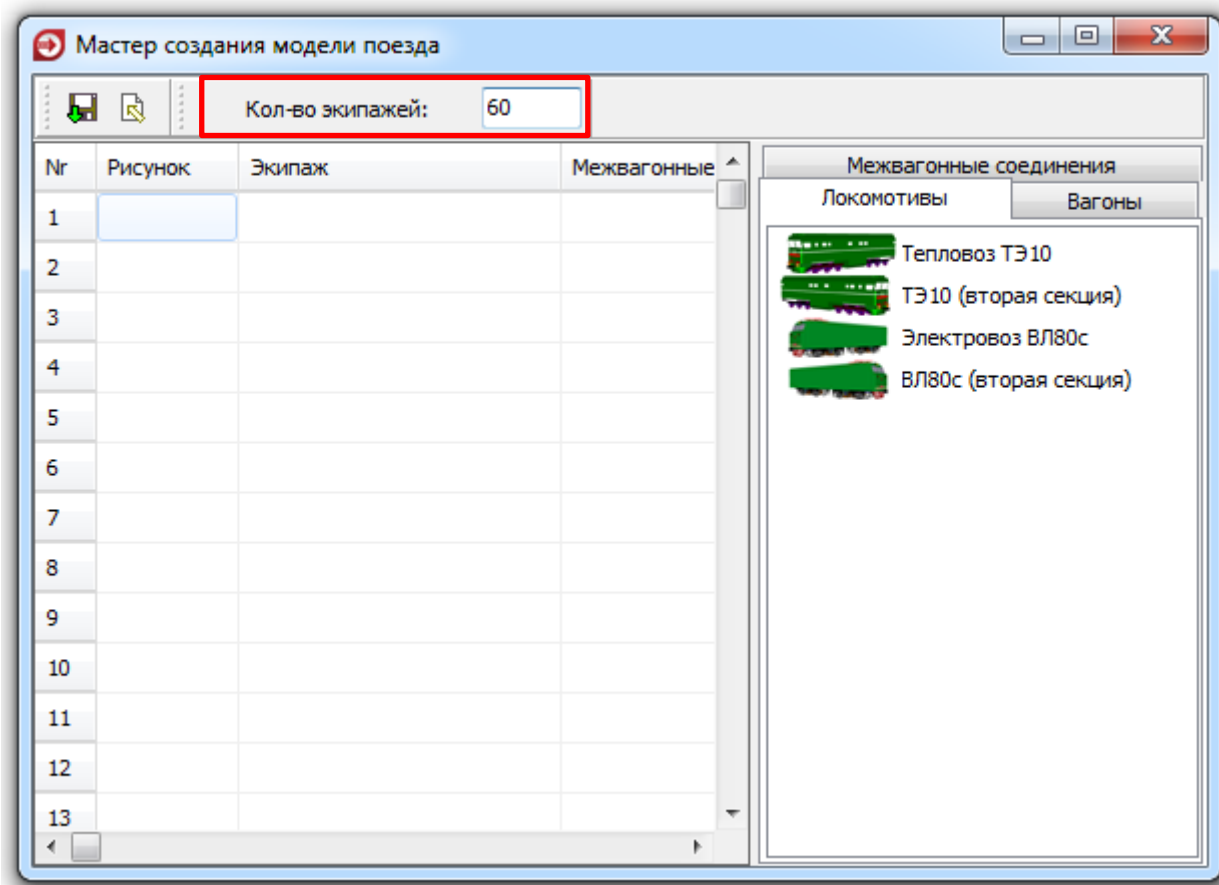


Рис. 1.2. **Мастер создания модели поезда** с неназначенными (пустыми) 60 экипажами

Следующий шаг – выбор типов экипажей. Сначала устанавливаем двухсекционный электровоз ВЛ80с. Для этого выберите в правой части **Мастера создания модели поезда** двойным щелчком мыши **электровоз ВЛ80с** (см. рис. 1.3), назначая первую секцию локомотива первым экипажем модели поезда. Далее выберите двойным щелчком **электровоз ВЛ80с (вторая секция)** и он будет вторым экипажем. Тип межвагонного соединения пока не определён. Масса и длина по осям автосцепок устанавливаются автоматически при добавлении экипажа, но при этом могут быть изменены пользователем.

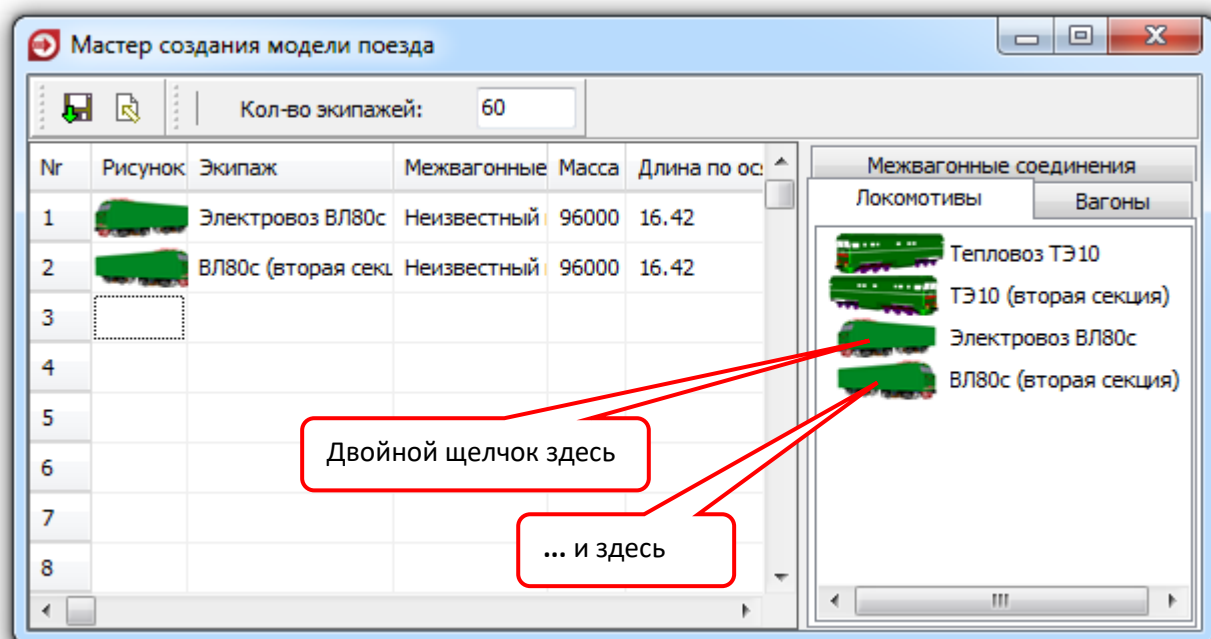


Рис. 1.3. Мастер создания модели поезда с двумя секциями локомотива

Для того чтобы установить грузовые вагоны в конец поезда нужно выбрать вкладку **Вагоны**, щёлкнуть правой кнопкой мыши на кнопке **Полувагон**. В появившемся меню выберите пункт **Назначить выборочно**, рис. 1.4. В открывшемся окне **Выбор элементов из списка** только неопределённые ранее экипажи доступны для назначения им типа **Полувагон**. Щёлкните по кнопке **Принять** для назначения этим "пустым" экипажам типа **Полувагон**.

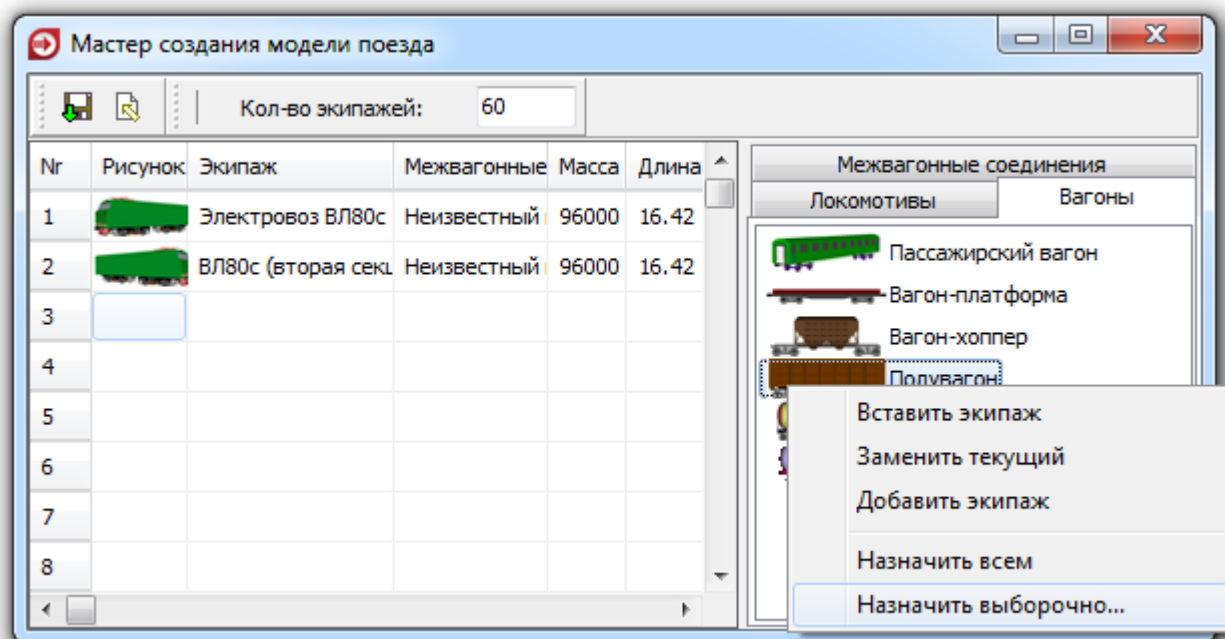


Рис. 1.4. Мастер создания модели поезда: назначение типов экипажей

Теперь каждому экипажу поезда назначен тип, и **Мастер создания модели поезда** выглядит как на рис. 1.5.

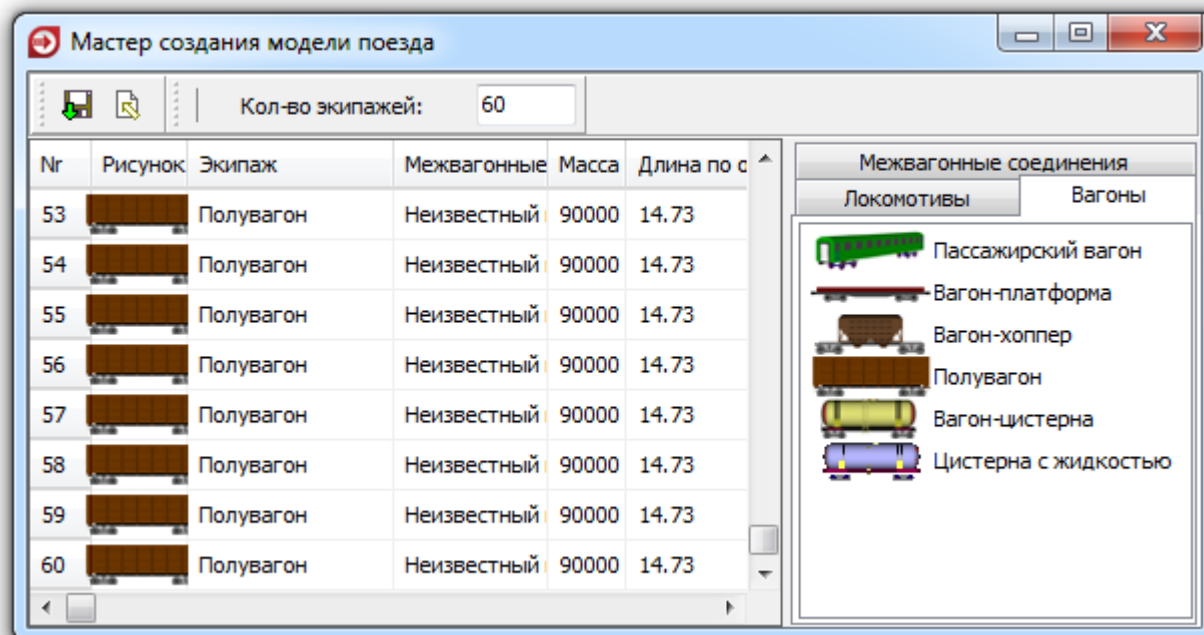


Рис. 1.5. Мастер создания модели поезда с назначенными полувагонами

Заключительный этап создания модели это назначение типов межвагонных соединений. Прейдите на вкладку **Межвагонные соединения** и определите для всех межвагонных соединений тип поглощающего аппарата **Ш-2-Т**, для этого выберите в контекстном меню команду **Назначить всем**, рис. 1.6.

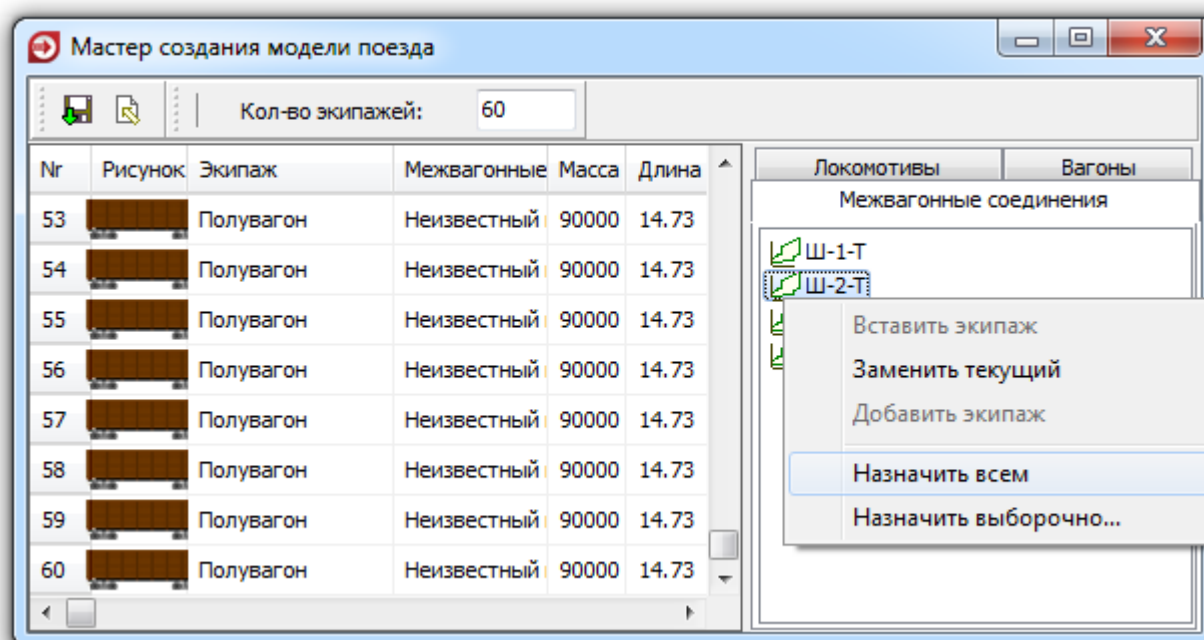



Рис. 1.6. Мастер создания модели поезда: назначение межвагонных соединений

Теперь модель поезда готова, см. рис. 1.7. Сохраните её, нажав на кнопку  и указав в диалоговом окне имя и путь к объекту, например: {Данные УМ}\My models\Trains\TestTrain}.

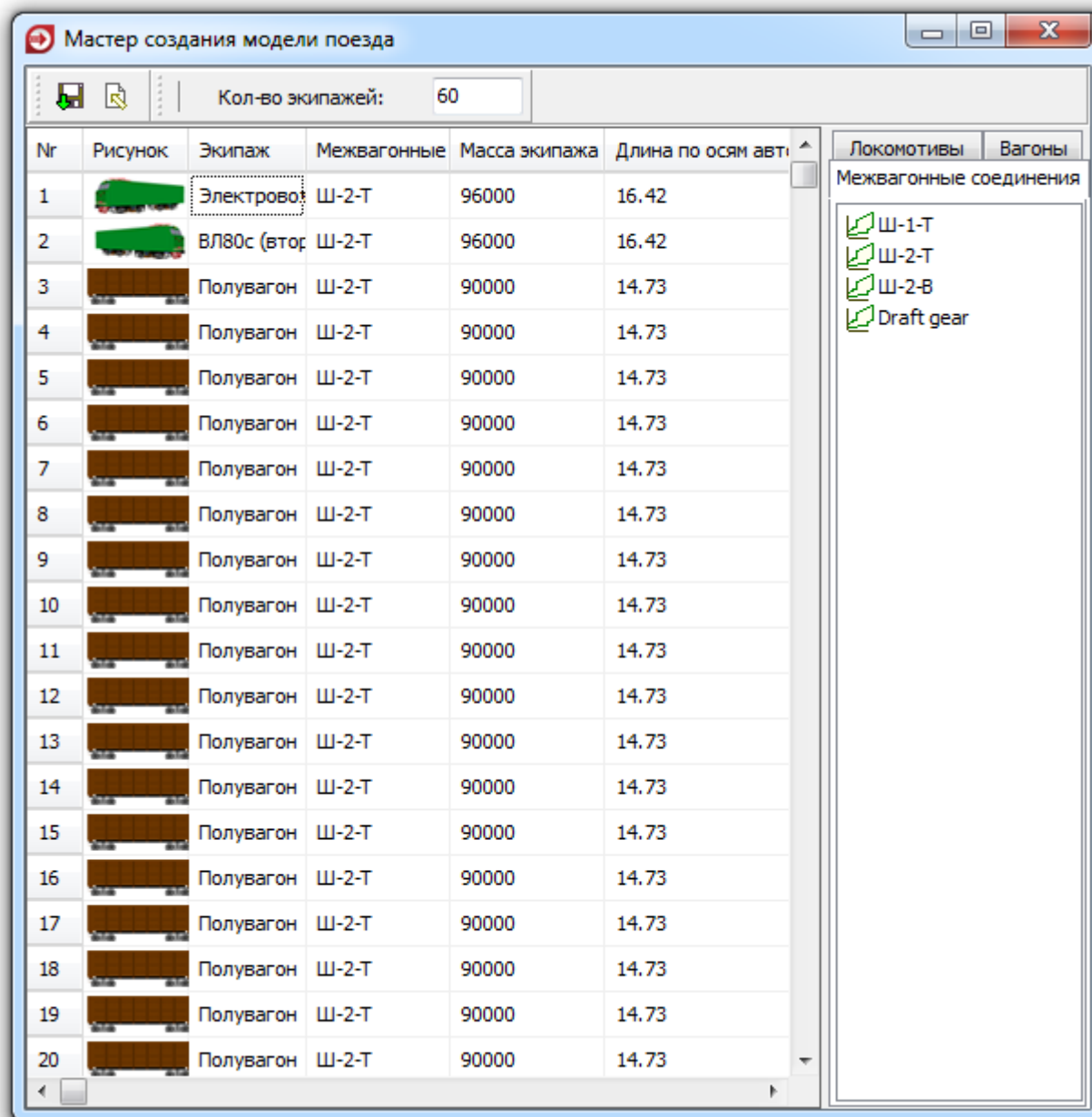


Рис. 1.7. Мастер создания модели поезда: готовая модель поезда

## 1.3. Моделирование динамики поезда

В данном параграфе будет рассмотрен процесс моделирования динамики созданной модели поезда в режиме служебного торможения в кривой с радиусом 600 м и уклоном -7‰ при начальной скорости 30 м/с.

### 1.3.1. Назначение параметров модели

Запустите программу **UM Simulation** и откройте созданную модель поезда.

#### Настройка параметров интегрирования

Установите следующие параметры процесса интегрирования. С помощью пункта меню **Анализ | Моделирование (F9)** откройте **Инспектор моделирования объекта**, на вкладке **Параметры моделирования** установите метод Парка (**Park**). Включите опцию **Расчет матриц Якоби**, установите время (кнопкой  $t$ ) моделирования  $\geq 55$  с, рис. 1.8.

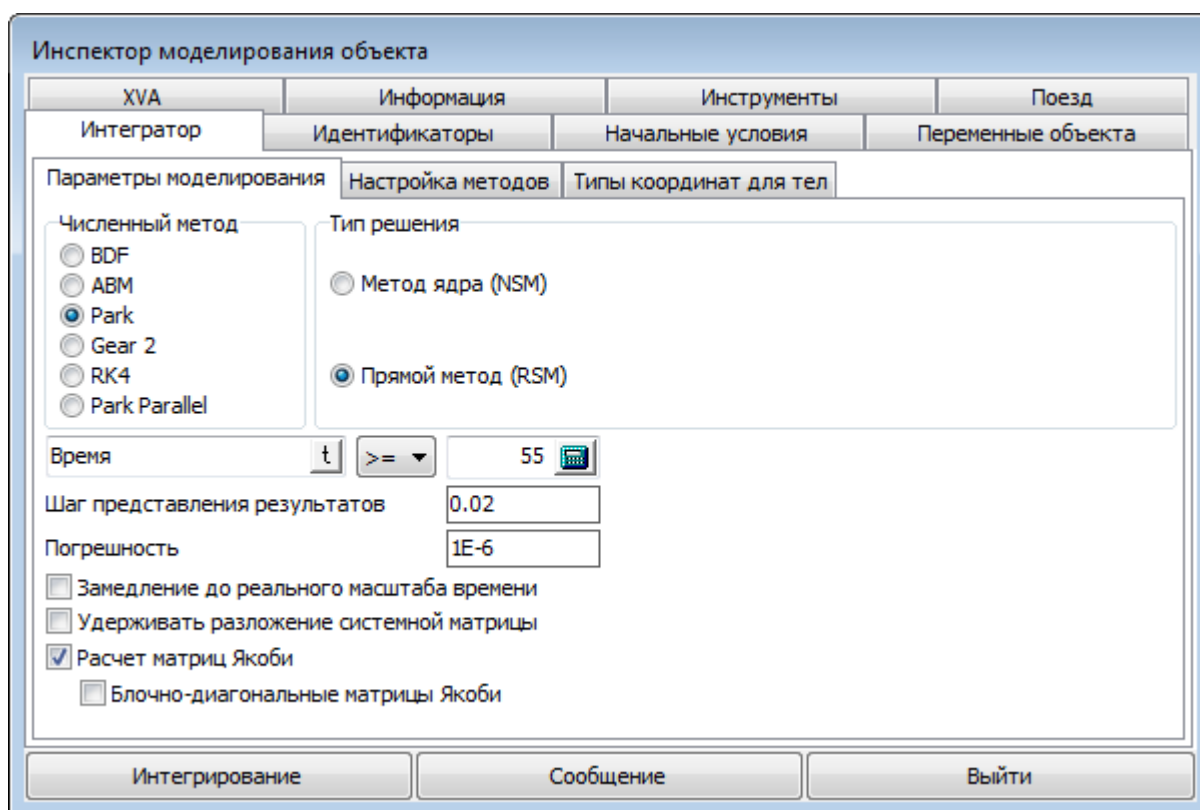



Рис. 1.8. Инспектор моделирования объекта

#### Создание макрогеометрии пути

По умолчанию модель поезда движется по прямому участку железнодорожного пути без уклонов. Мы будем проводить моделирование динамики поезда в кривой  $R = 600$  м и уклоном -7‰.

Для того чтобы создать файл с макрогеометрией участка пути, выберите **Инструменты | Ж.-д. инструменты | Геометрия пути** или щёлкните по кнопке  на панели инструментов. В результате откроется окно **Макрогеометрия**, рис. 1.9.

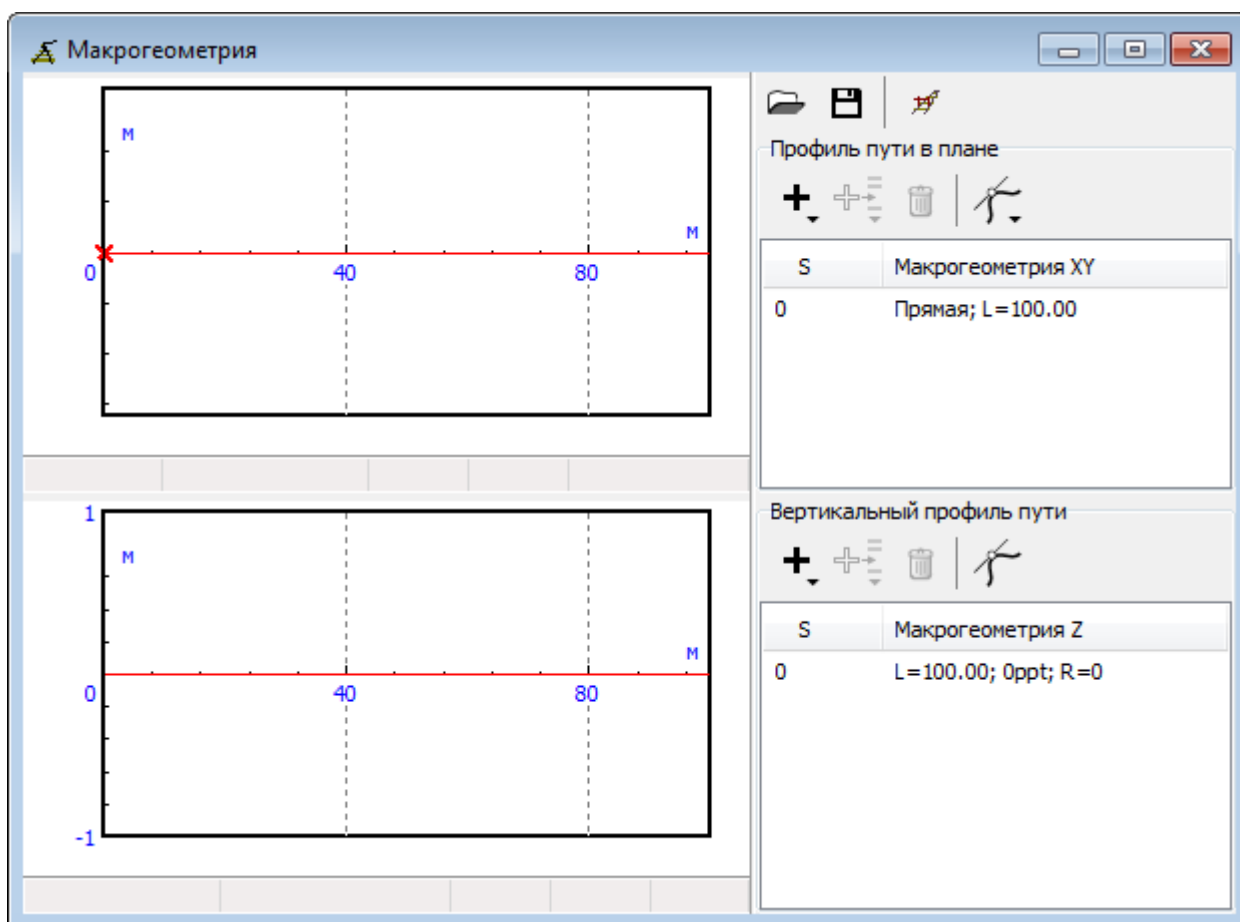



Рис. 1.9. Редактор макрогеометрии

В верхней части окна описывается геометрия пути в горизонтальной плоскости (**Профиль пути в плане**). Мы будем проводить моделирование движения, при котором после проезда прямого участка пути с произвольно установленной длиной 100 м (рис. 1.9) экипаж начнёт двигаться по второму участку пути – по кривой. Для добавления кривой щёлкните на кнопку  на панели **Профиль пути в плане** и выберите пункт меню **Добавить кривую**. По умолчанию радиус новой добавляемой кривой 300 м. Измените радиус, установив значение 600 м. Для изменения параметров участка пути дважды щёлкните на соответствующем поле списка участков либо выделите его и нажмите *Ввод*. В нашем случае необходимо выбрать второй участок пути, содержащий параметры кривой. Введите значение **600** в поле **R** в окне **Параметры кривой**, рис. 1.10 и нажмите кнопку **Принять**.

Тип кривой	<input checked="" type="radio"/> Левая <input type="radio"/> Правая			
P1	50			
S	200			
P2	50			
R	600			
H	0.09			
dY	0.01			
L	300			
Коэффициенты трения				
Внешний рельс	0.25			
Внутренний рельс	0.25			
На гребне	0.25			
Переходный участок для бокового трения				
от	30	до	40	градусов

Рис. 1.10. Параметры кривой

Нижняя часть окна **Макрогеометрия** содержит описание вертикального профиля пути, рис. 1.9. Дважды щёлкните кнопкой мыши по участку вертикального профиля пути либо выделите его и нажмите клавишу *Enter*. В результате откроется окно **Уклон**, рис. 1.11. Введите **600** в поле **Длина, м** и установите значение **-7** в поле **Уклон, промилль**, нажмите **Принять**.

Длина, м	600
Уклон, промилль	-7
След. радиус, м	0.00

Рис. 1.11. Параметры участка с уклоном

Теперь макрогеометрия пути (рис. 1.12) выглядит так:

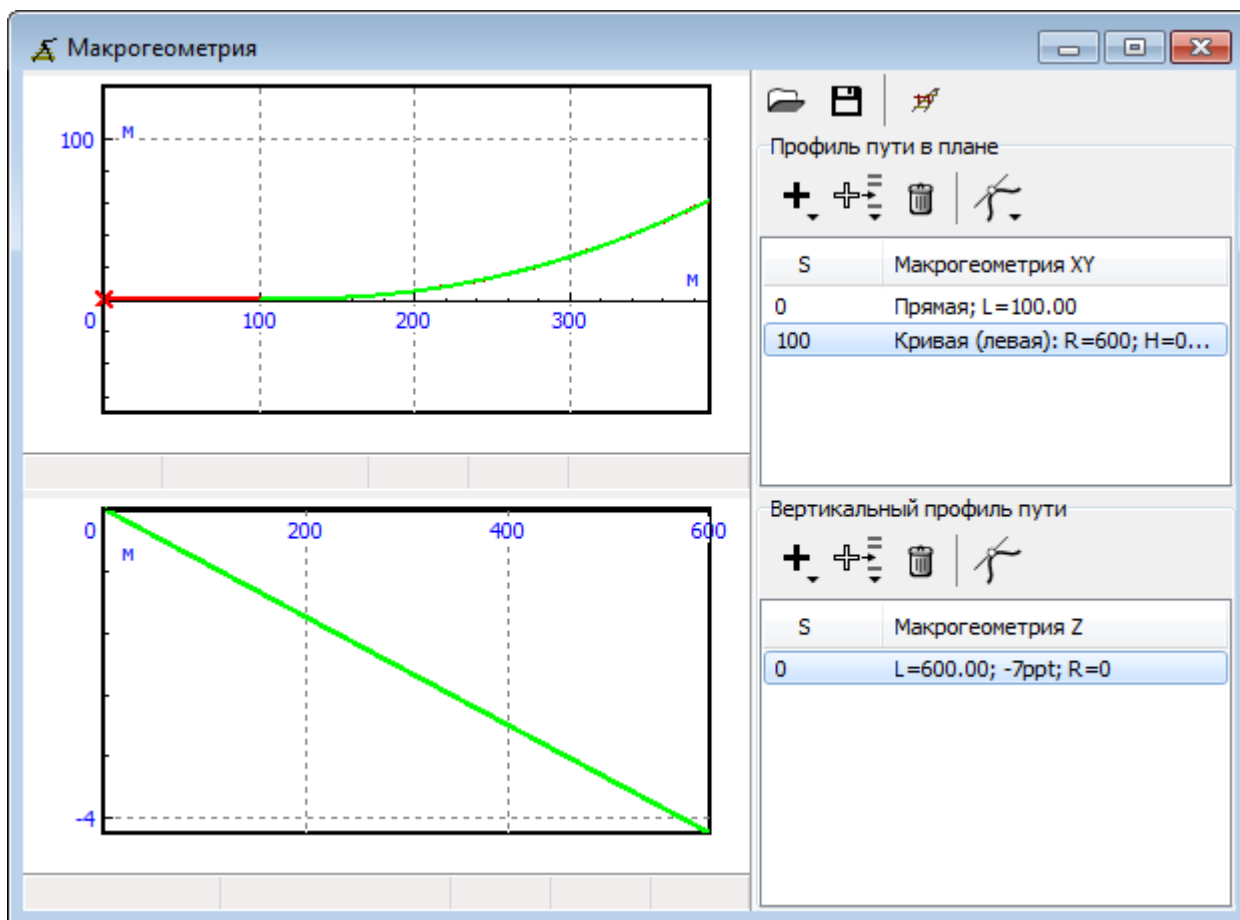



Рис. 1.12. Макрогеометрия пути

Сохраните созданную макрогеометрию в файл, используя кнопку . Пример имени файла и пути к нему может быть такой: {Данные УМ}\My models\Trains\TestTrain\r600.mcg. Закройте окно макрогеометрии.

На вкладке **Поезд | Настройки | Путь** в Инспекторе моделирования объекта загрузите созданный файл, рис. 1.13.

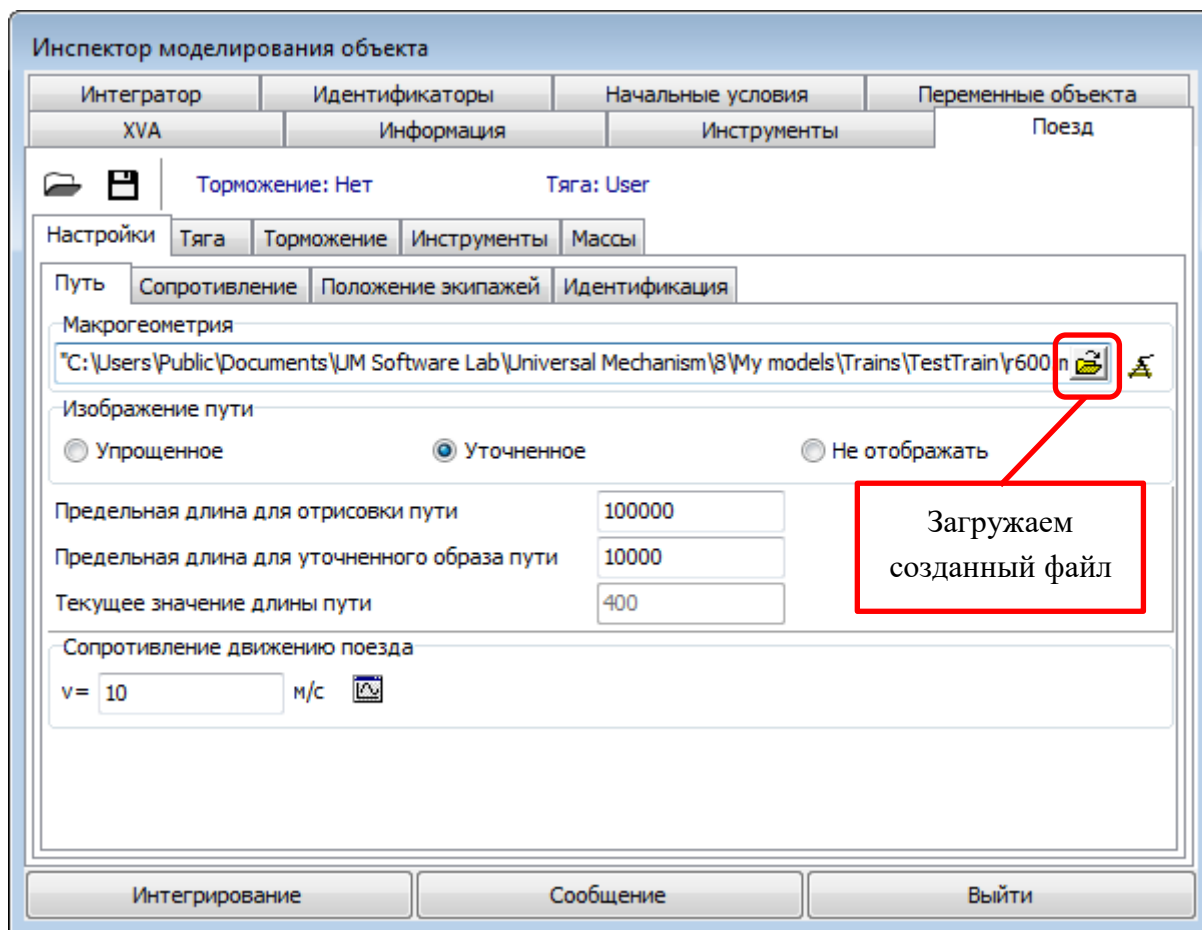


Рис. 1.13. Вкладка Путь

### Назначение моделей сил сопротивления

Все настройки параметров поезда расположены на вкладке **Поезд** в **Испекторе моделирования объекта**. Чтобы назначить силу сопротивления для модели поезда, выберите **Поезд | Настройки | Сопротивление | Основное**, рис. 1.14.

Вкладка **Основное** разделена на две части. Верхняя часть содержит загруженные модели сил сопротивления. Нижняя часть вкладки **Основное** содержит список экипажей и назначенных им моделей сил сопротивления. Для назначения конкретному экипажу силы сопротивления можно использовать только загруженную модель из верхней части вкладки. Для этого нужно двойным щелчком мыши по ячейке напротив соответствующего экипажа выбрать нужную модель силы сопротивления. Можно воспользоваться всплывающим меню списка загруженных моделей сил сопротивления и его пунктом **Назначить всем** для назначения выбранной модели сил всем экипажам.

Существует четыре стандартных модели сил сопротивления движению поезда по бесстыковому пути (рис. 1.14). Установите модель **Локомотив** для двух локомотивов VL80s и **Груженный четырехосный вагон, бесстыковой путь** для остальных вагонов, рис. 1.14.

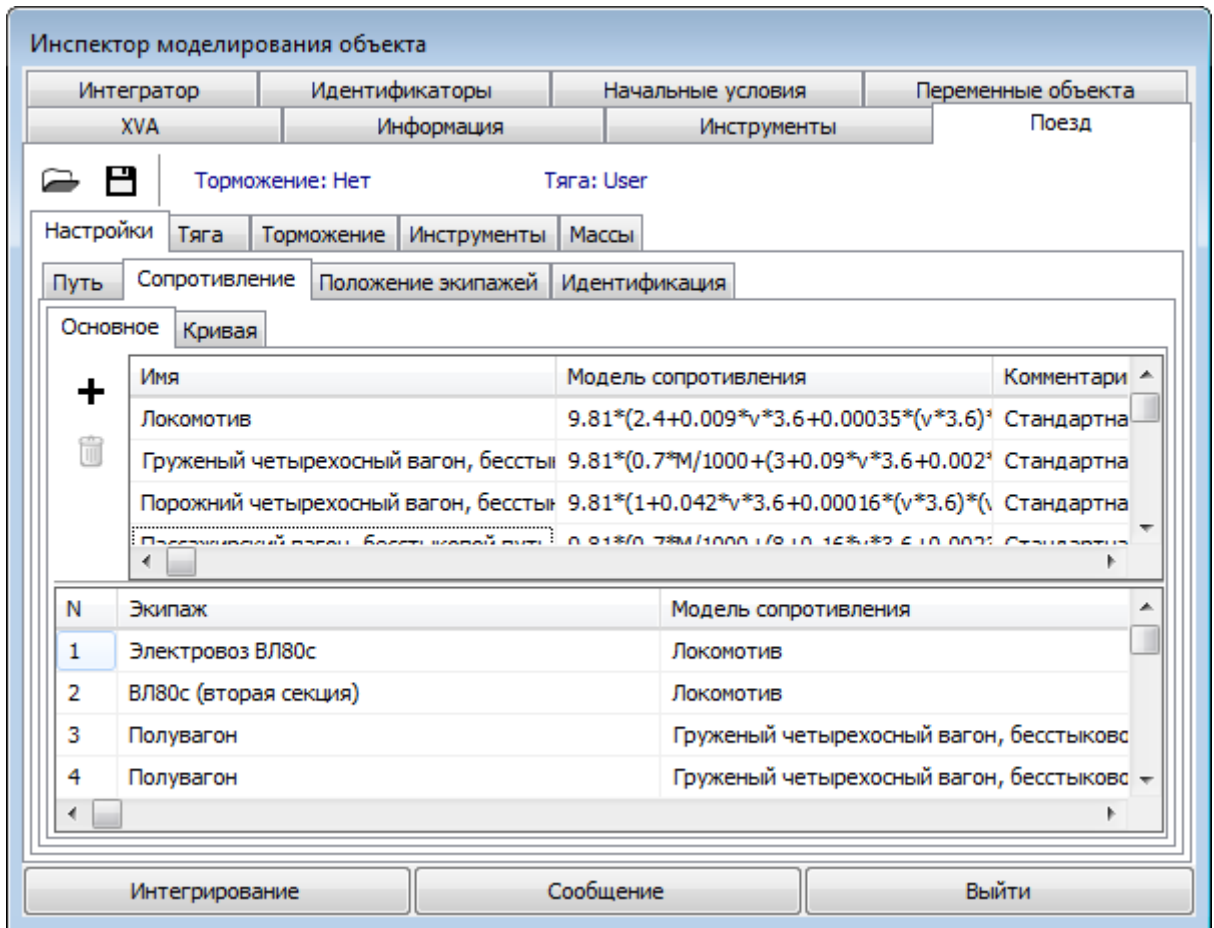


Рис. 1.14. Вкладка **Сопротивление | Основное**

Вкладку **Поезд | Настройки | Сопротивление | Кривая** оставьте без изменений.

### Настройки тормозной системы

Установите параметры тормозной системы, выберите **Поезд | Торможение**.

Моделируя систему торможения необходимо задать следующие параметры: режим торможения (экстренное, служебное, отпуск), коэффициент трения между колесом и тормозной колодкой, тип рычажной передачи, скорость волны торможения.

Сила торможения определяется как

$$F_B = f \cdot F_N,$$

где  $f$  – коэффициент трения в контакте колёс с тормозными колодками,  $F_N$  – нормальная сила в контакте колеса и тормозной колодки.

Сила торможения и коэффициент трения рассчитываются для каждого экипажа с учётом числа контактирующих колёс и тормозных колодок, поэтому коэффициенты трения и силы торможения задаются отдельно для каждого экипажа.

Укажите скорость волны служебного торможения равной 280 м/с на вкладке **Поезд | Торможение | Тормозное оборудование**, рис. 1.15.

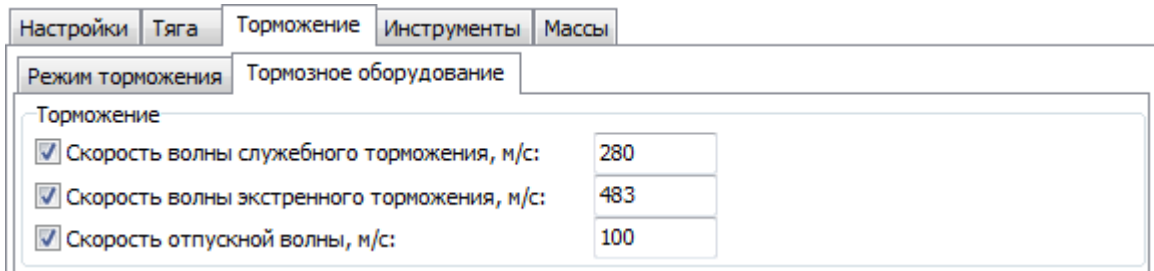



Рис. 1.15. Установка скорости волны служебного торможения

Далее перейдем к моделированию сил торможения.

На вкладке **Поезд | Торможение | Тормозное оборудование | Рычажная передача** выберите тип рычажной передачи. Используя кнопку  выберите файлы **ВЛ80, чугун для локомотива, Полувагон, чугун для вагонов**. Затем установите выбранные типы рычажных передач для указанных экипажей. Можно поступить следующим образом: с помощью контекстного меню и его команды **Назначить всем** определить модель **Полувагон, чугун для всех экипажей** (рис. 1.16).

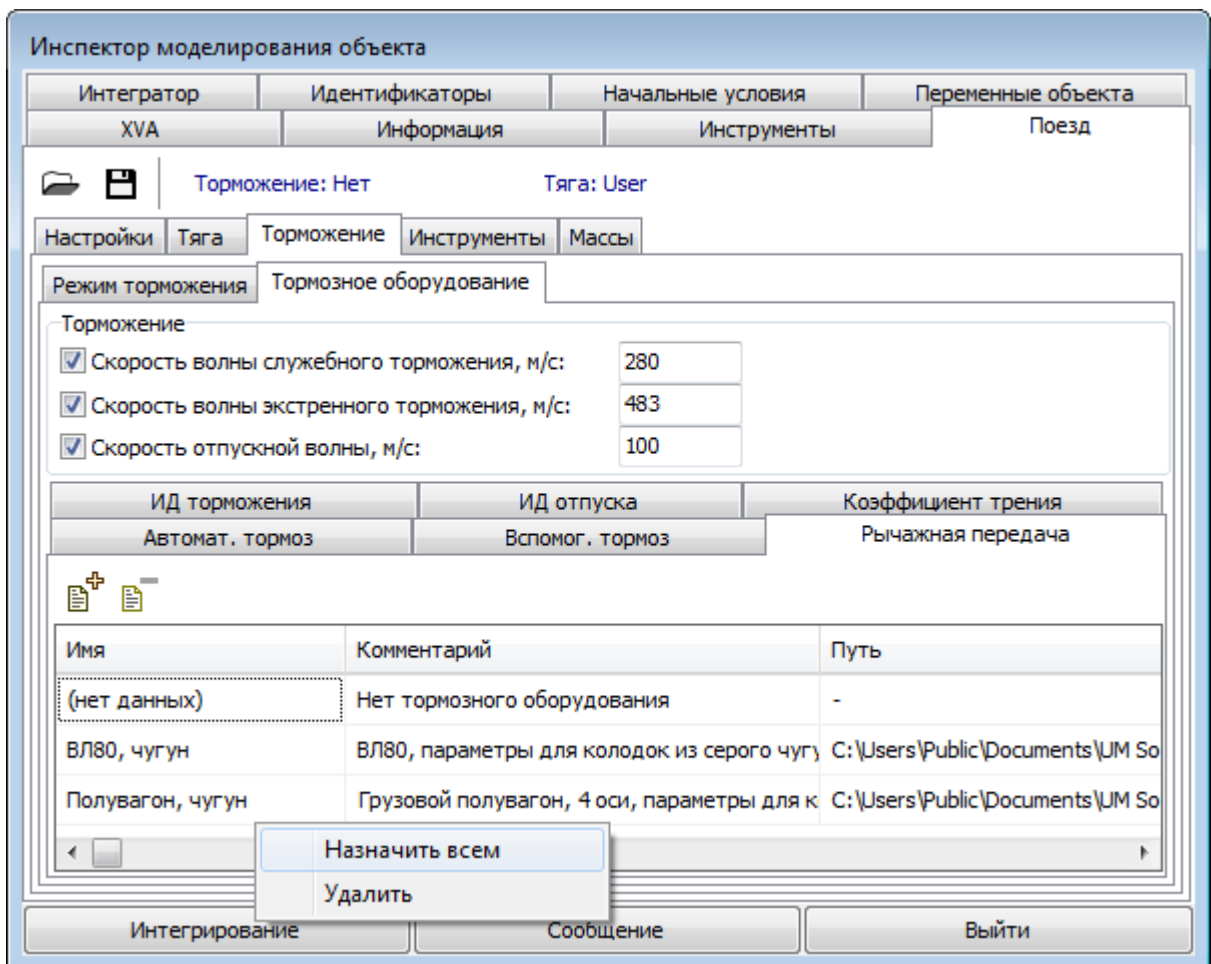


Рис. 1.16. Модель рычажной передачи

Далее перейдите на вкладку **Поезд | Торможение | Тормозное оборудование | Автомат. тормоз**, в которой во всех ячейках столбца **Рычажная передача** установлен тип **По-**

лувагон, чугун. С помощью двойных щелчков мыши установите локомотивам ВЛ80 в ячейках **Рычажная передача** тип **ВЛ80, чугун** (рис. 1.17).

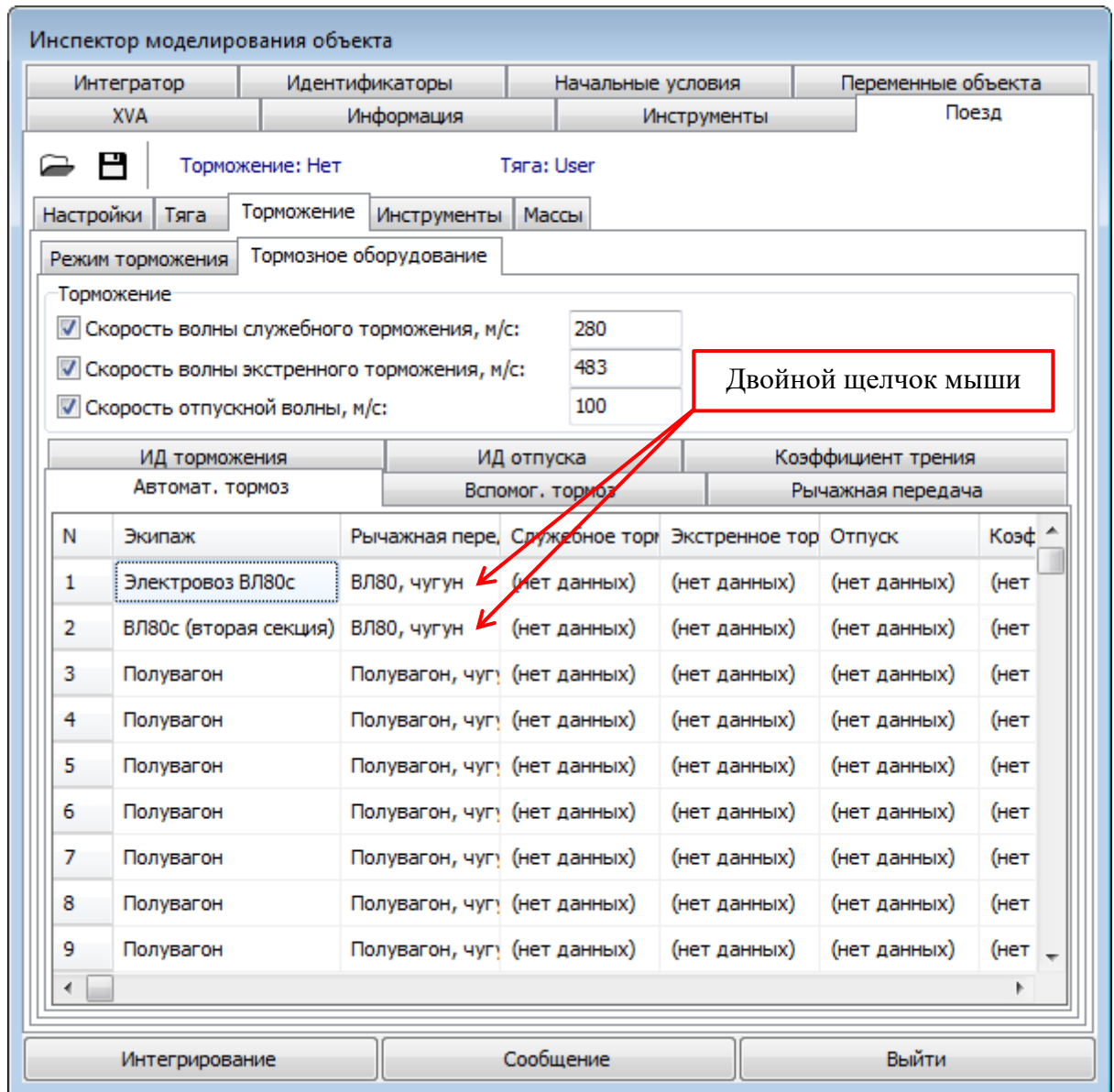



Рис. 1.17. Назначение типа рычажной передачи для локомотивов

Установите модель служебного торможения. Перейдите на вкладку **Поезд | Торможение | Тормозное оборудование | ИД торможения** и загрузите модель силы с помощью кнопки , выберите *service\_braking\_25s\_example.id*. Загрузится модель *Служебное торможение, 25с*. Щелкните правой кнопкой мыши по выбранному режиму и выберите пункт контекстного меню **Назначить как служебное торможение всем**, рис. 1.18.

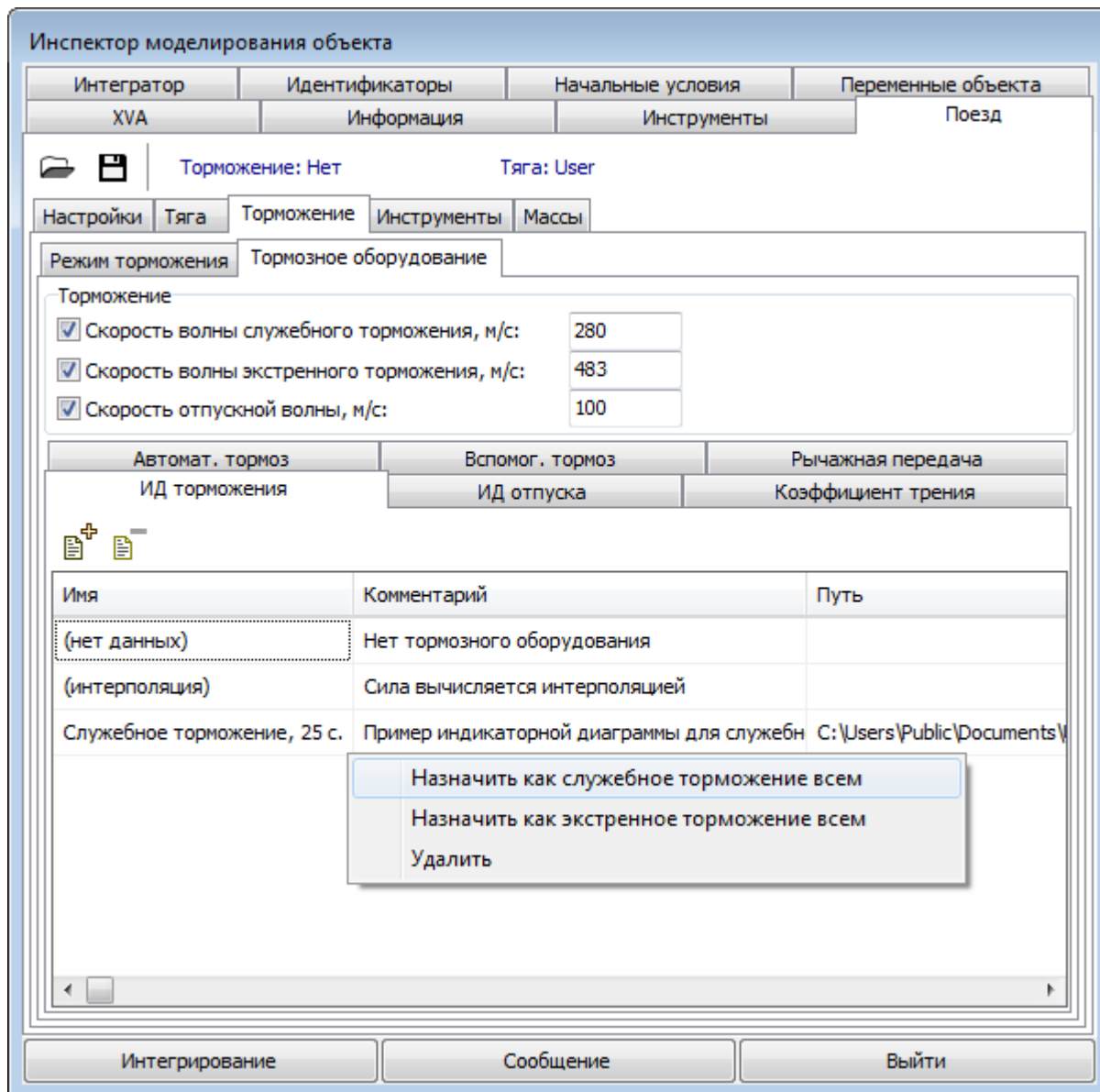


Рис. 1.18. Назначение служебного торможения

Установите модель коэффициента трения для экипажей. Перейдите на вкладку **Поезд | Торможение | Тормозное оборудование | Коэффициент трения** и добавьте файл *composite.cf*, содержащий модель коэффициента трения для композиционных колодок (рис. 1.19). С помощью правой кнопки мыши и контекстного меню назначьте загруженную модель всем экипажам.

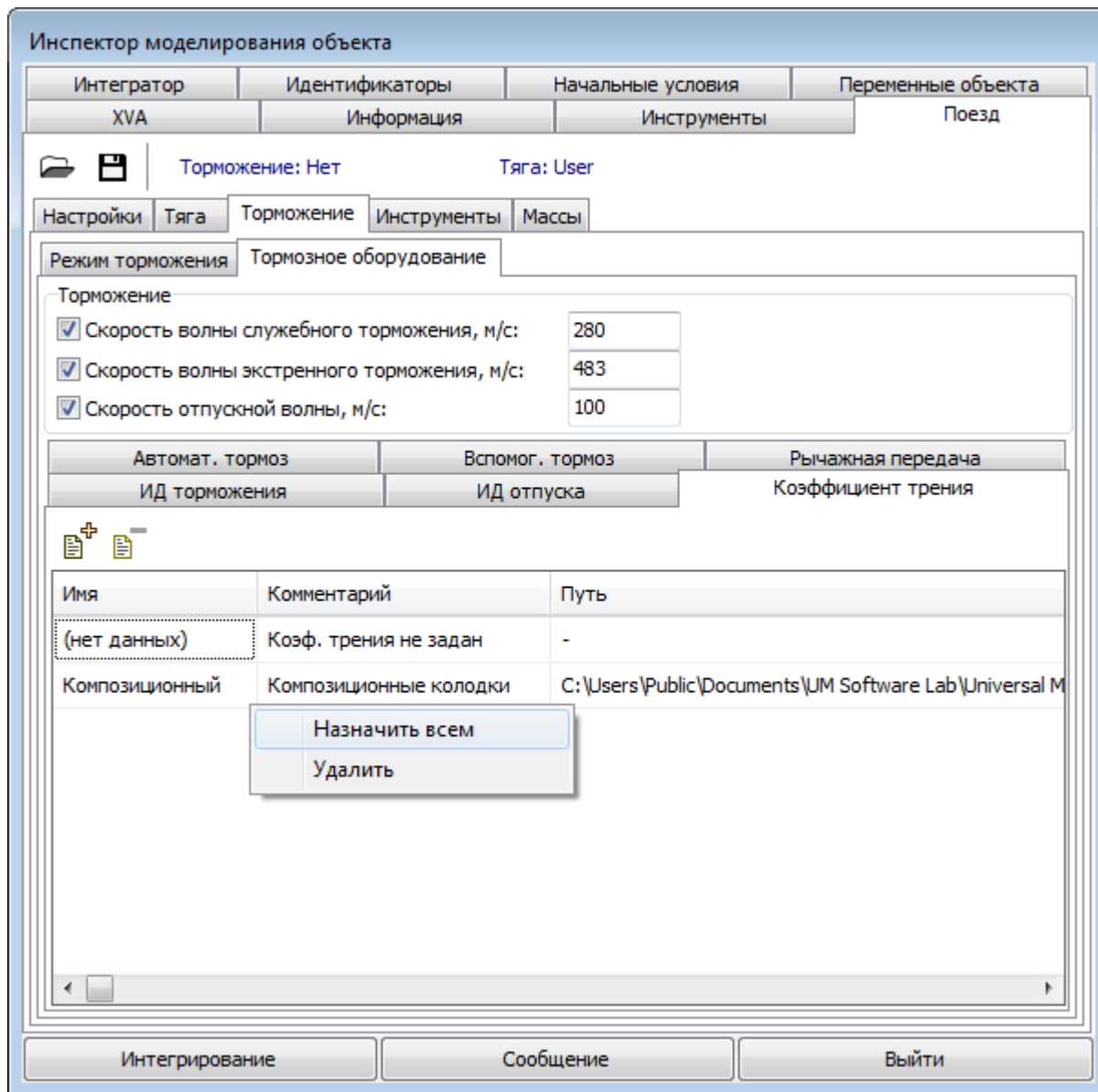


Рис. 1.19. Установка модели коэффициента трения

На вкладке **Поезд | Торможение | Режим торможения**, выберите параметры включения режима торможения. Включите режим торможения, нажав кнопку Торможение на вкладке Поезд. Добавьте новый режим торможения. В результате появится новая вкладка, содержащая следующую информацию: **Время** – 0 с, **Тип тормоза** – Тормозная магистраль, **Режим** – Служебное торможение, **Экипаж** – 1. Электровоз ВЛ80с. Это означает, что с 0 секунды моделирования на первой секции электровоза ВЛ80 включится режим служебного торможения с типом тормоза **Тормозная магистраль** (рис. 1.20).

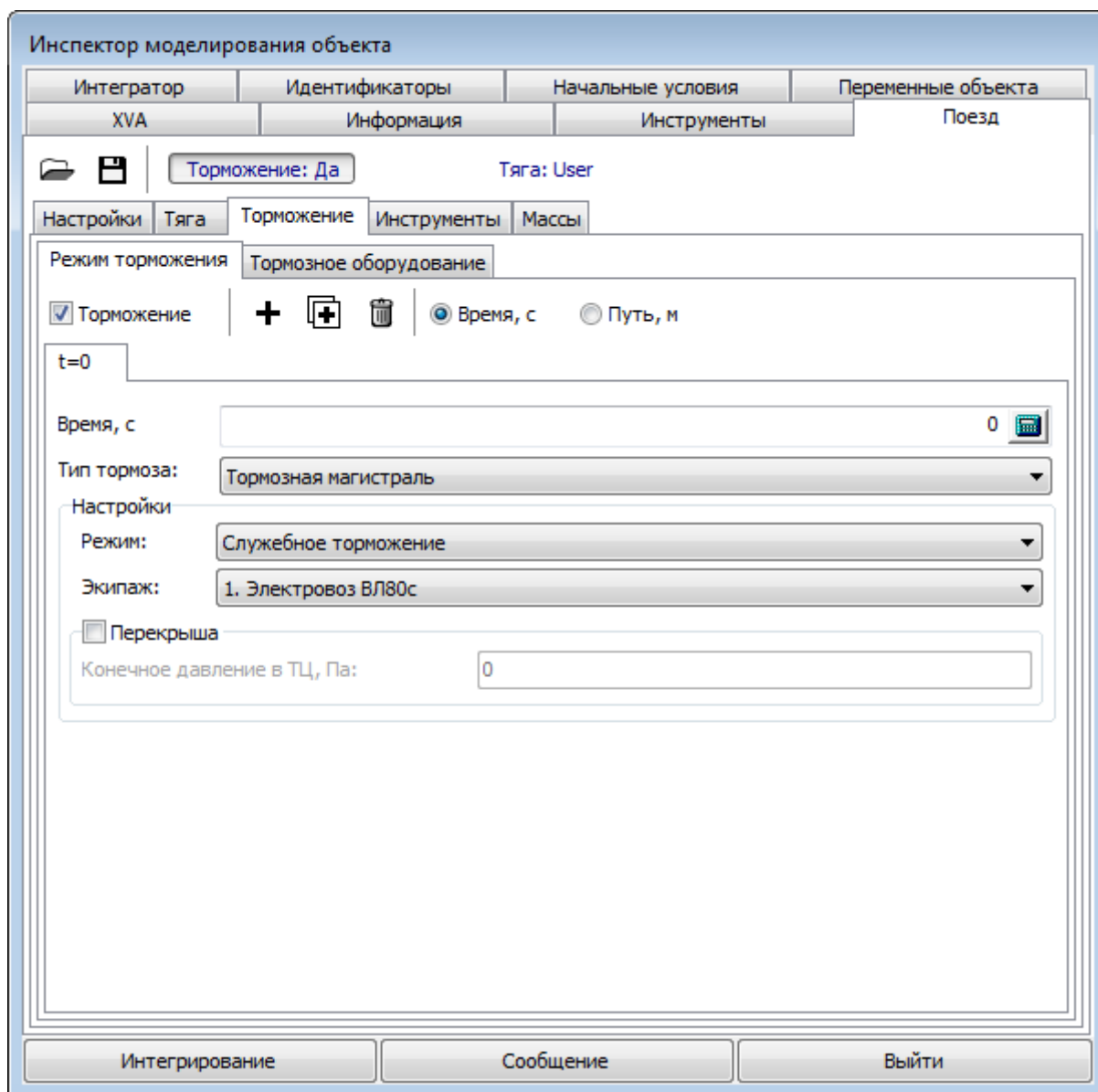


Рис. 1.20. Вкладка **Режим торможения**

Установите значение 30 идентификатору начальной скорости **v0** на вкладке **Идентификаторы**, рис. 1.21.

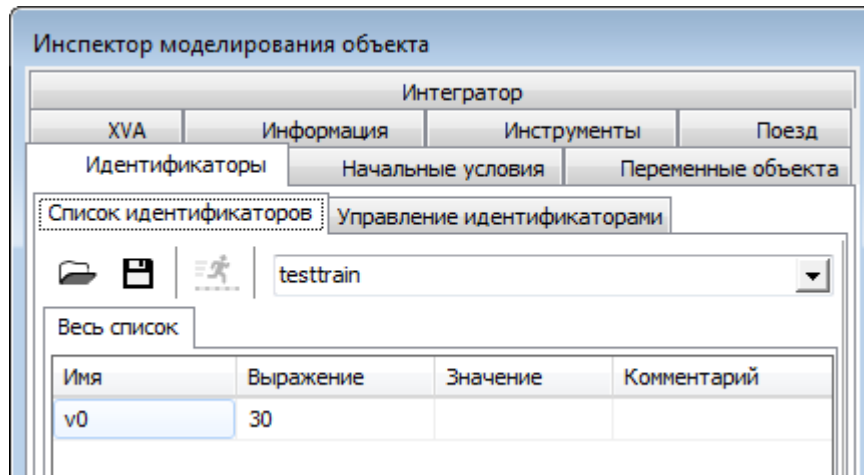


Рис. 1.21 Идентификатор начальной скорости

### Создание переменных, позволяющих анализировать динамику поезда

Создайте переменные для тормозных сил, сил в междвагонных соединениях, скорости движения первого экипажа, пройденного пути. Это можно сделать с помощью **Мастера переменных** (пункт меню **Инструменты** | **Переменные** | **Мастер переменных...** Ctrl+M), вкладка **Поезд**. На рис. 1.22 приведен пример создания тормозных сил.

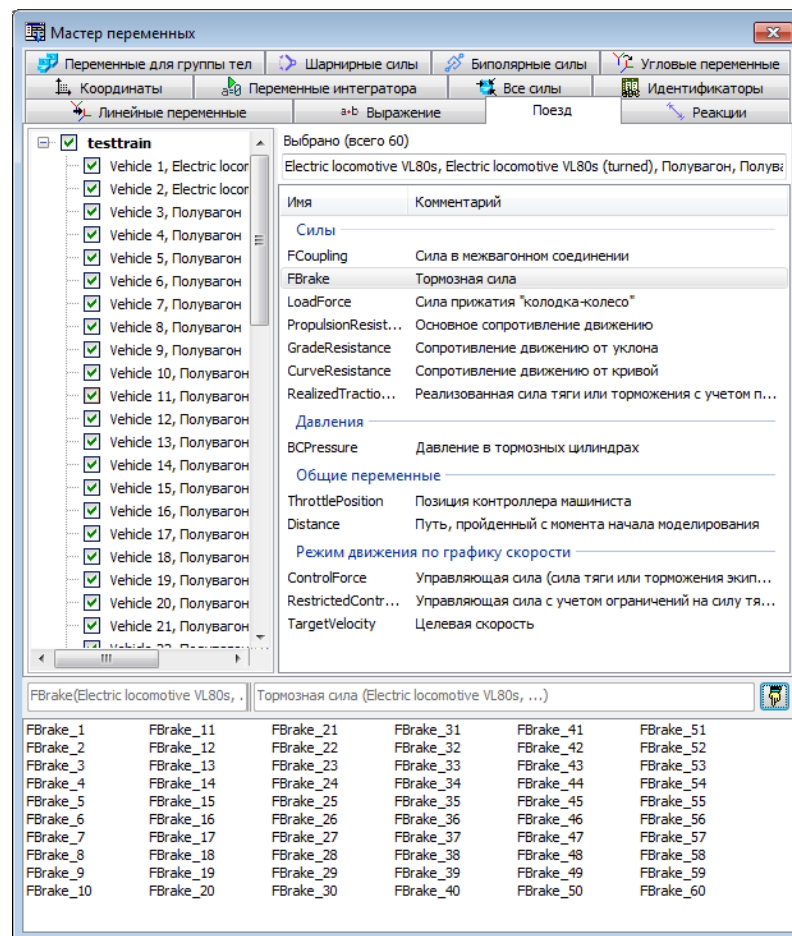


Рис. 1.22. Создание переменных для тормозных сил в Мастере переменных

Создайте три графических окна: в первое добавьте тормозные силы, во второе – силы в межвагонных соединениях, в третье – пройденный путь для первого экипажа.

Создайте скорость движения экипажа на вкладке **Линейные переменные**. Выберите тело **Vehicle** из подсистемы Электровоз ВЛ80с, **Тип** – **Скорость**, **Компонента** – **X**, рис. 1.23. Откройте еще одно графическое окно и поместите туда созданную переменную.

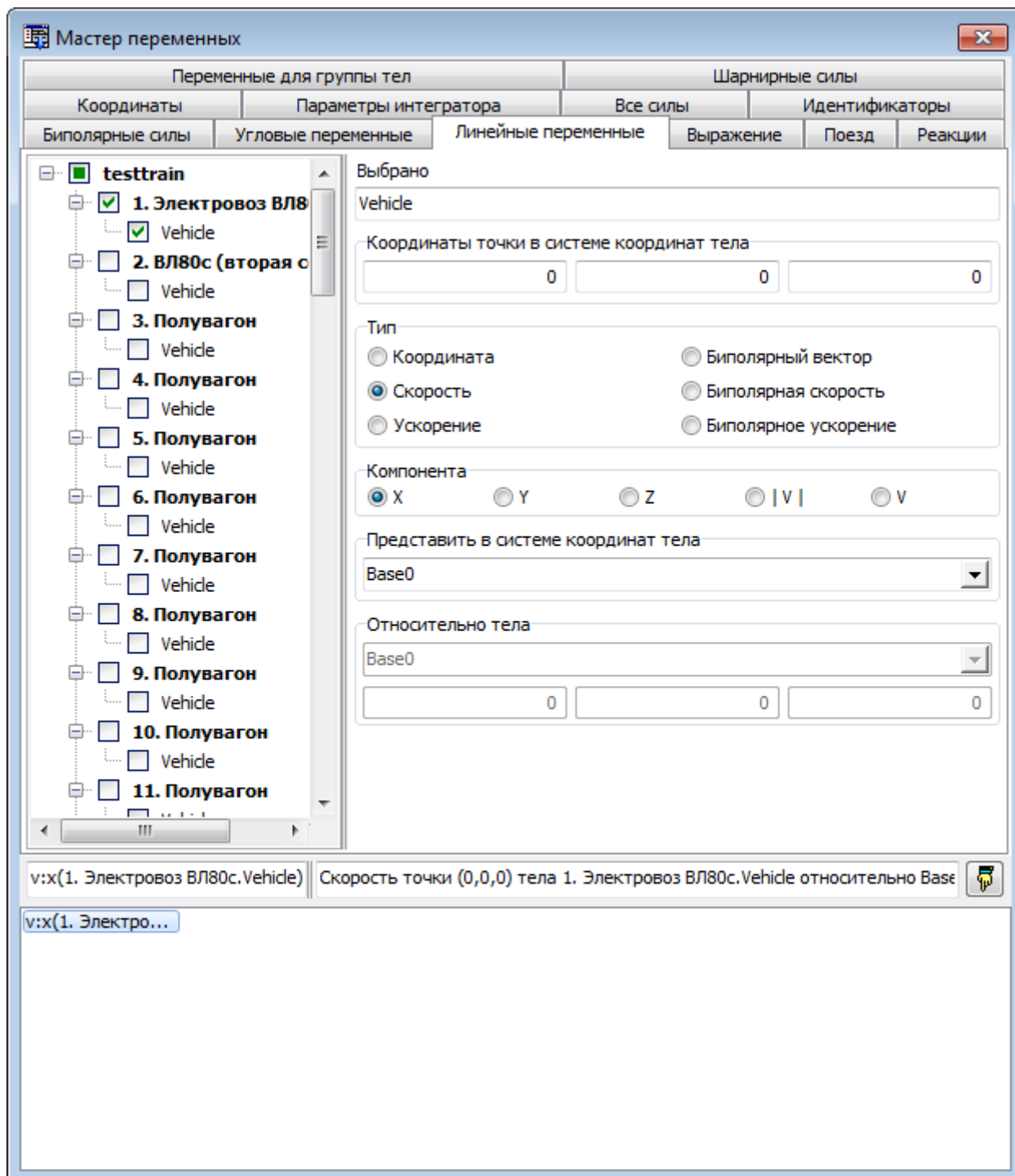


Рис. 1.23. Создание переменной для скорости движения экипажа в Мастере переменных

Закройте **Мастер переменных**.

### 1.3.2. Моделирование динамики поезда

Теперь все готово для моделирования динамики в режиме торможения. Рабочий стол программы выглядит так (рис. 1.24):

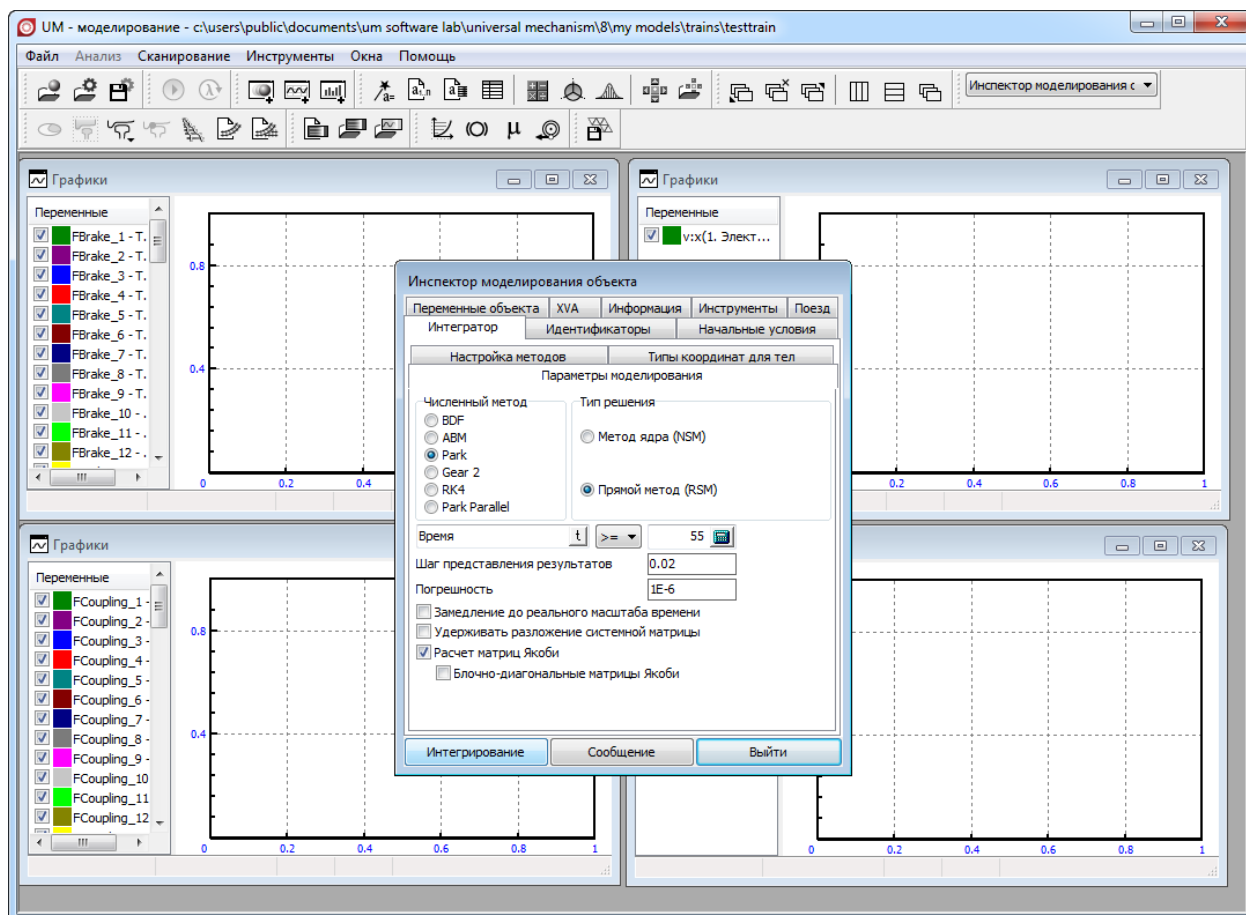


Рис. 1.24. Рабочий стол программы - все готово к моделированию

Запустите процесс моделирования с помощью кнопки *F9* на клавиатуре либо кнопки **Интегрирование** в **Инспекторе моделирования**. Время торможения будет составлять около 55 с, тормозной путь около 910 м.

При первом запуске моделирования на экране появится сообщение (рис. 1.25). Поскольку каждый вагон поезда имеет одно межвагонное соединение со следующим за ним сзади, то очевидно, что для последнего вагона поезда межвагонное соединение излишне. Поэтому силу в этом соединении моделировать не нужно и можно её выключить. Для выполнения расчёта в появившемся окне нужно нажать кнопку **Продолжить**. Чтобы скрыть появление предупреждения в дальнейшем можно активировать пункт "**Не показывать больше данное сообщение**".

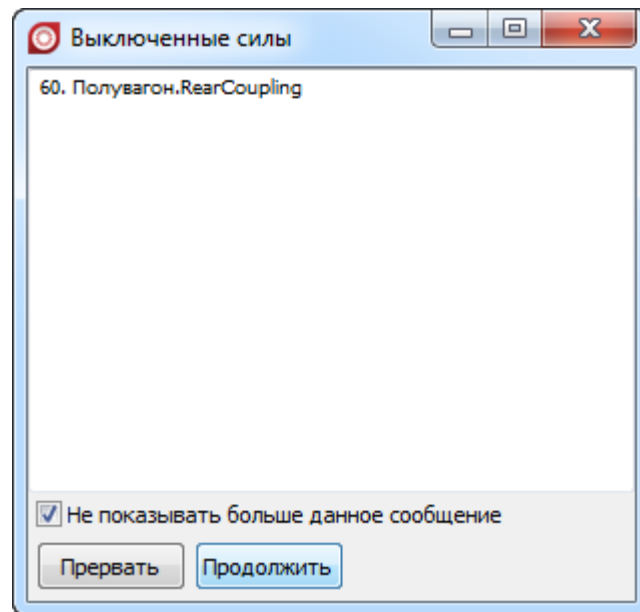


Рис. 1.25 Предупреждение перед началом моделирования

Графики тормозных сил представлены на рис. 1.26. Можно заметить, что тормозные силы на локомотивах заметно отличаются от сил на вагонах.

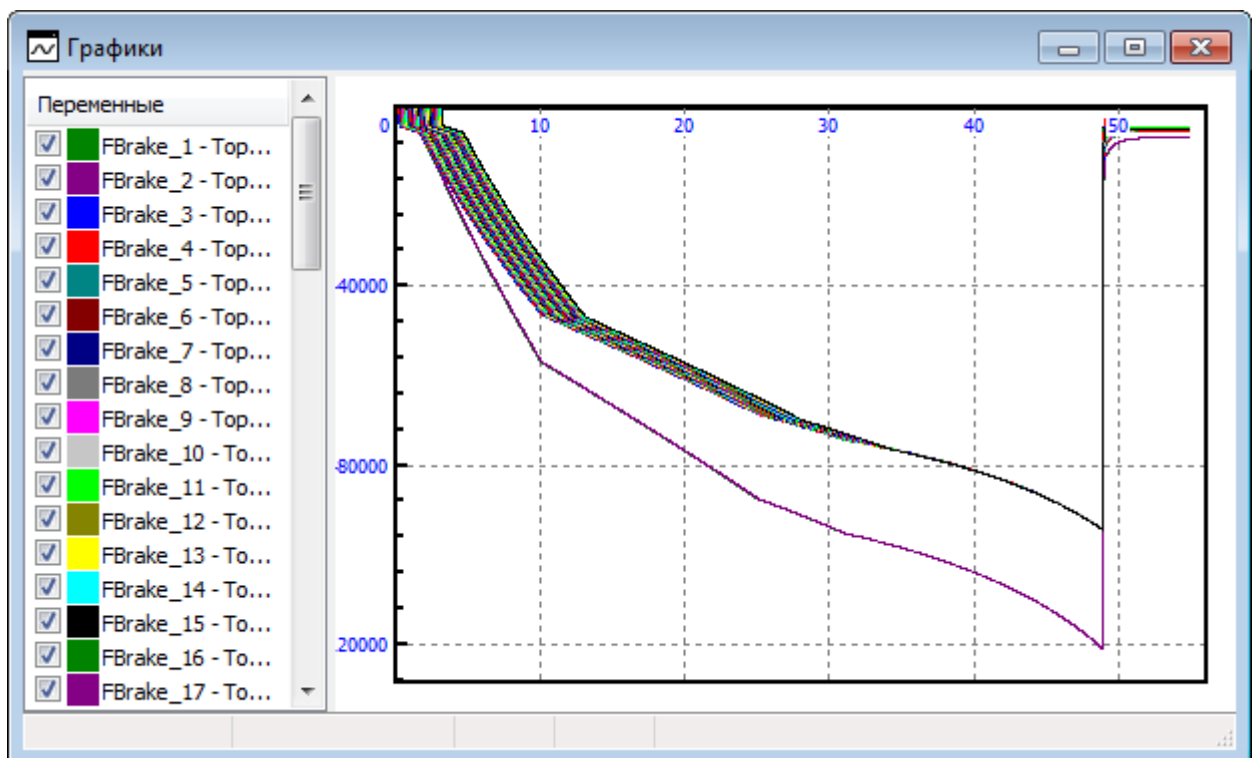


Рис. 1.26. Тормозные силы

Силы в междвагонных соединениях показаны на рис. 1.27. Максимальная сила составляет примерно 365 кН на 43-м экипаже.

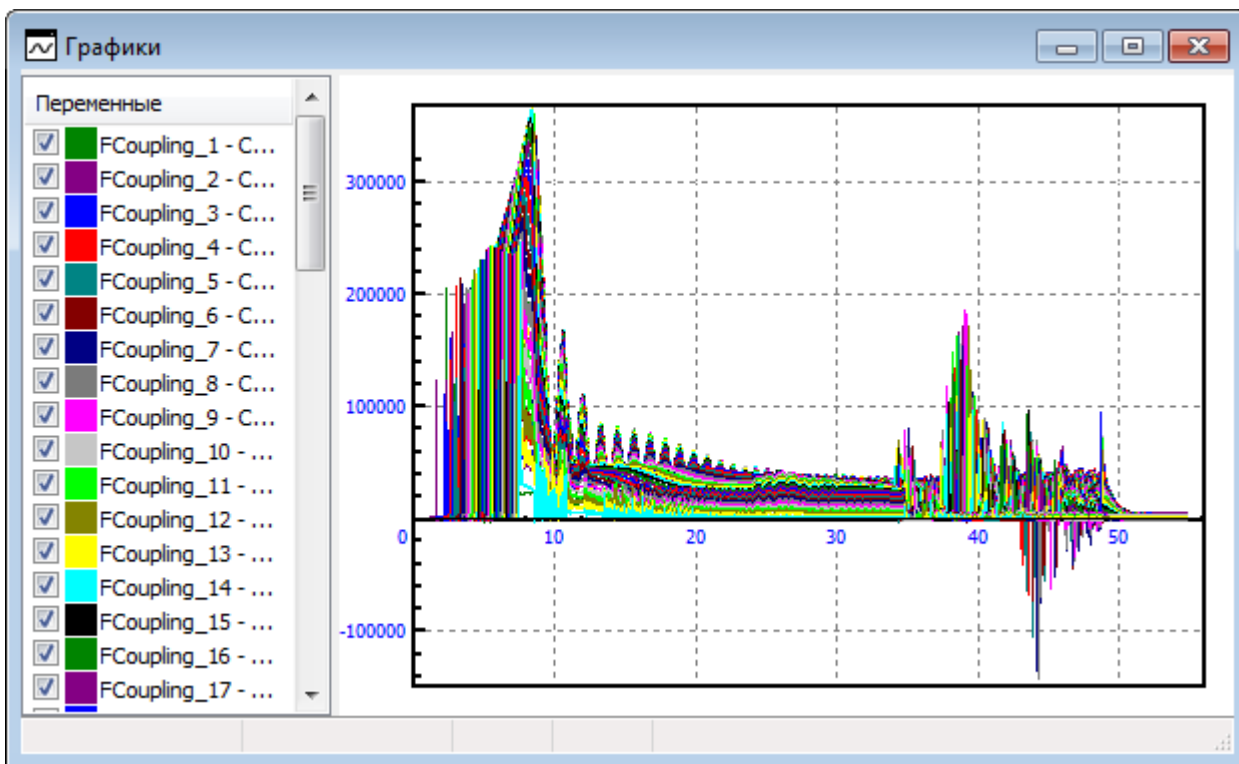


Рис. 1.27. Силы в междвагонных соединениях

График изменения скорости движения первого экипажа представлен на рис. 1.28.

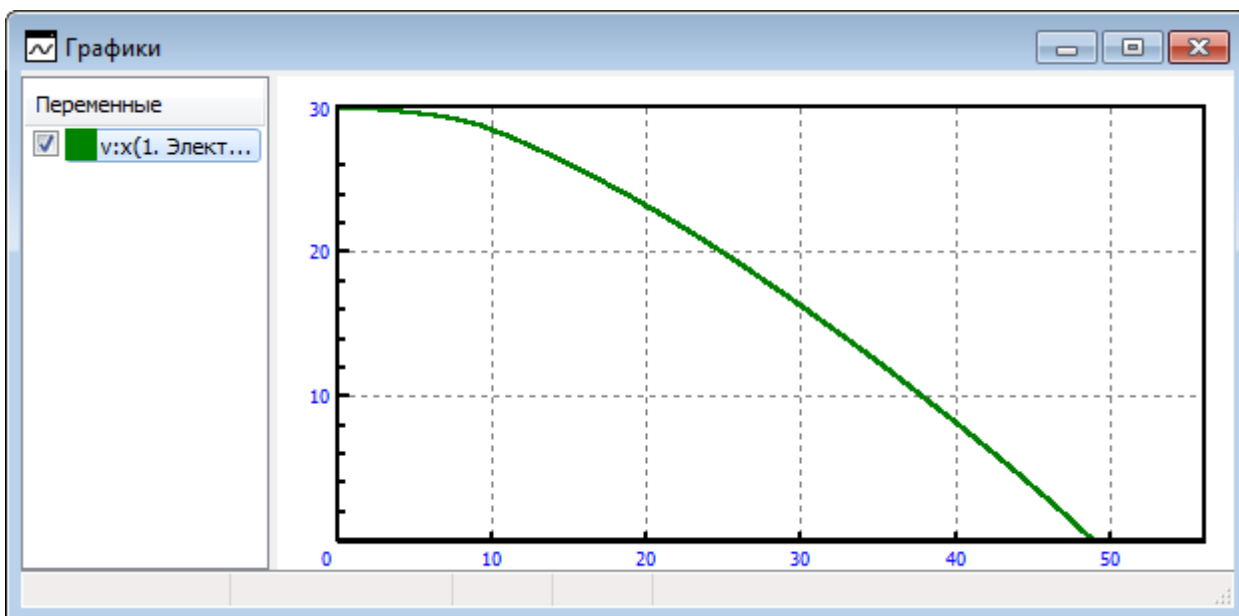


Рис. 1.28. Скорость движения первого экипажа

Зачастую наиболее информативно показывать силы в междвагонных соединениях в виде гистограмм. Для этого откройте окно гистограмм **Инструменты | Открыть окно | Ги-**

**стограмма** и перетащите необходимые переменные (в нашем случае силы в междвагонных соединениях) из соответствующего графического окна, рис. 1.29.

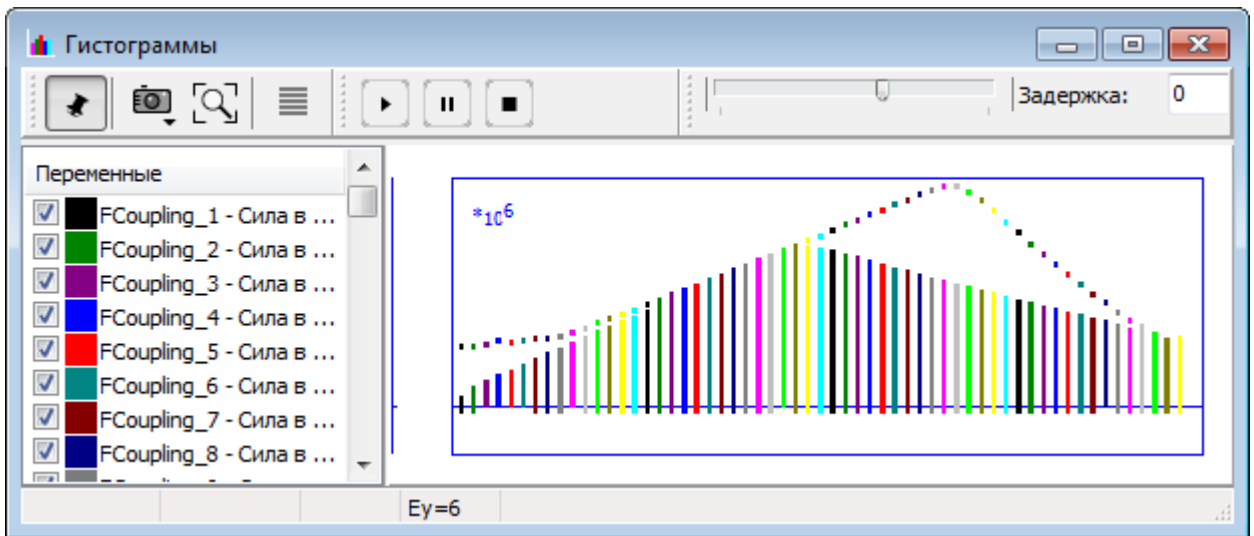



Рис. 1.29. Силы в междвагонных соединениях в окне гистограмм

В режиме паузы процесса моделирования, используя кнопки верхней панели окна гистограмм , можно воспроизводить, делать паузу и останавливать построение гистограмм.

## 2. Моделирование продольной динамики поезда

### 2.1. Что мы будем изучать

В 2016 году ПК Универсальный механизм принимал участие в международных сравнительных тестах программ моделирования продольной динамики поездов, организованных университетом Квинсленда, Рокгемптон, Австралия. Помимо ПК УМ тестировались ещё девять программ из Австралии, Китая, Италии, Нидерландов и Франции.

Тестирование выполнялось в следующих целях:

дать разработчикам возможность лучше понять свои собственные программы путём сопоставления с другими программами;

выявить различия между разными программами для определения круга проблем, требующих дальнейшего исследования;

выработать подход к оценке существующих и вновь разрабатываемых программ.

По условиям тестирования предлагалось выполнить моделирование четырёх конфигураций поездов. Использовались два типа локомотивов – с шестью осями, нагрузка на ось 22,33 т и 32,5 т, и два типа вагонов – с четырьмя осями, нагрузка на ось 32 т и 40 т.

Исходные данные включали: характеристики локомотивов и вагонов; конфигурации поезда; характеристику поглощающего аппарата; характеристики пути; начальные условия движения поезда; режимы тяги и торможения локомотива. В ходе тестов рассматривалось только торможение локомотивом (так называемое вспомогательное торможение). Пневматическое торможение всем поездом не моделировалось для упрощения постановки задачи.

В ходе тестирования необходимо было получить следующие данные: положение и скорость ведущего локомотива как функции времени; продольные силы в междвагонных соединениях для контрольных вагонов; характеристику поглощающего аппарата как функцию времени для контрольных вагонов; максимальную сжимающую и растягивающую силу в каждом междвагонном соединении.

Более подробную информацию о сравнительных тестах можно найти в работах [1], [2] и [3], которые были опубликованы на данную тему. С помощью УМ были получены результаты, очень хорошо согласующиеся с результатами моделирования в других программных комплексах, что подтверждает соответствие УМ мировым стандартам в данной области.

В этой части урока будет рассмотрен пример моделирования продольной динамики поезда первой конфигурации, включающего 2 ведущих локомотива и 50 грузовых вагонов. Готовую модель вы можете найти в каталоге:

[{Данные УМ}/SAMPLES/Trains/LTDB-Train Configuration 1](#)

### 2.2. Создание модели поезда

Откройте программу **UM Input**. В меню программы выберите пункты **Инструменты | Создание модели поезда**, после чего откроется окно **Мастер создания модели поезда**, рис. 2.1.

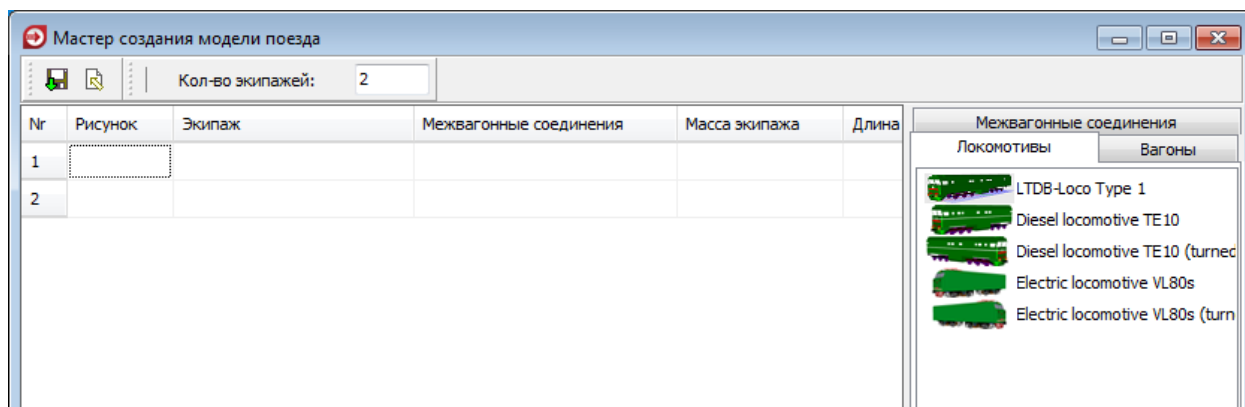


Рис. 2.1 Мастер создания модели поезда

Для того чтобы включить в модель поезда 52 экипажа установите **Кол-во экипажей** равным **52** (рис. 2.2).

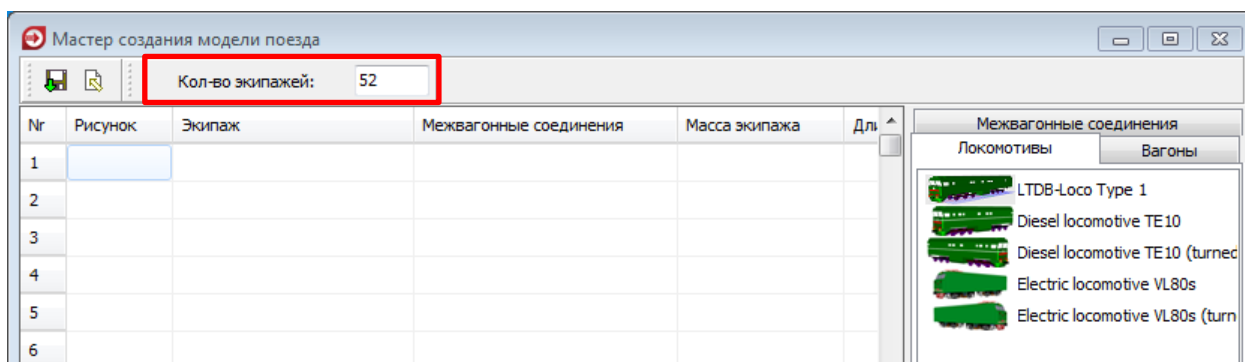


Рис. 2.2 Задание количества экипажей поезда

Следующий шаг – выбор типов экипажей. В голову состава необходимо установить два локомотива. Для этого выберите в правой части **Мастера создания модели поезда** двойным щелчком мыши **LTDB-Loco Type 1**, затем двойным щелчком мыши опять выберите **LTDB-Loco Type 1** – он будет вторым экипажем. Тип межвагонного соединения пока не определён. Масса и длина по осям автосцепок устанавливаются автоматически при добавлении экипажа, но при этом могут быть изменены пользователем.

Для того чтобы добавить в состав грузовые вагоны нужно выбрать вкладку **Вагоны**, щёлкнуть правой кнопкой мыши на пункте **LTDB-Wagon Type 1**. В появившемся меню выберите пункт **Назначить выборочно...**, рис. 2.3. В открывшемся окне **Выбор элементов из списка** только неопределённые ранее экипажи доступны для назначения им типа **LTDB-Wagon Type 1**. Щёлкните по кнопке **Принять** для назначения "пустым" экипажам типа **LTDB-Wagon Type 1**.

Теперь каждому экипажу поезда назначен тип.

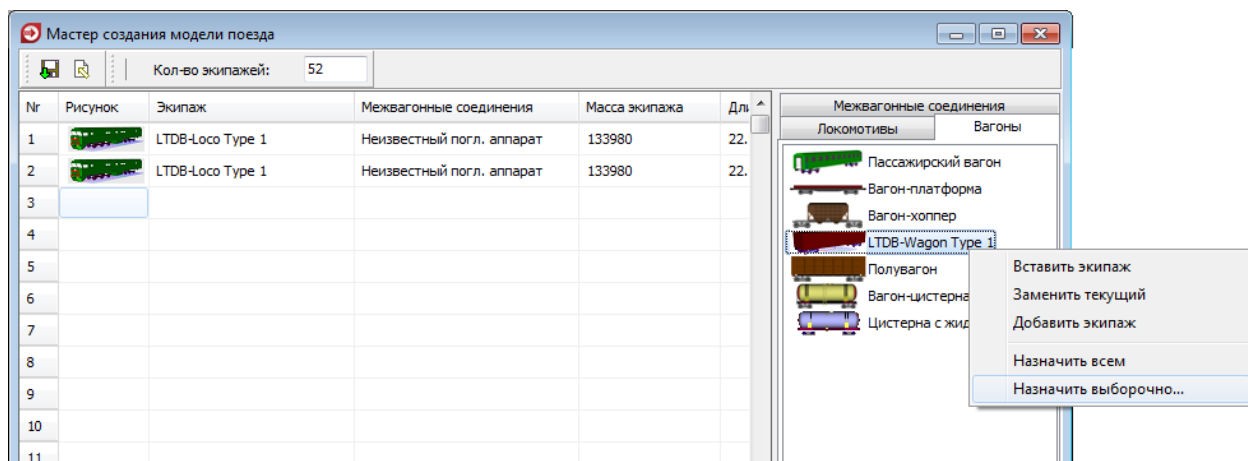


Рис. 2.3 Назначение типов экипажей

Заключительный этап создания модели – назначение типов межвагонных соединений. Перейдем на вкладку **Межвагонные соединения** и определим для всех межвагонных соединений тип поглощающего аппарата **LTDB Draft Gear 10 mm slacks**, для этого выберем в контекстном меню команду **Назначить всем**, рис. 2.4. Характеристика поглощающего аппарата была задана графиком, представленным на рис. 2.5.

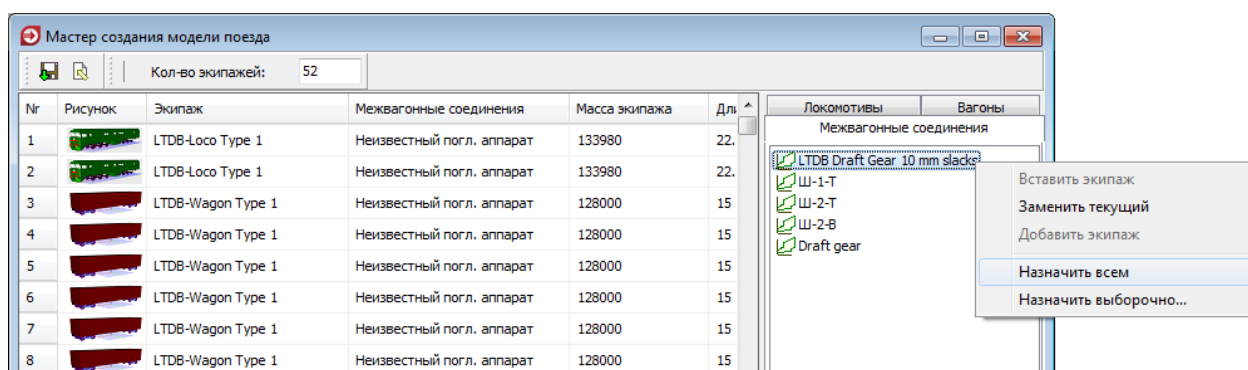


Рис. 2.4 Назначение межвагонных соединений

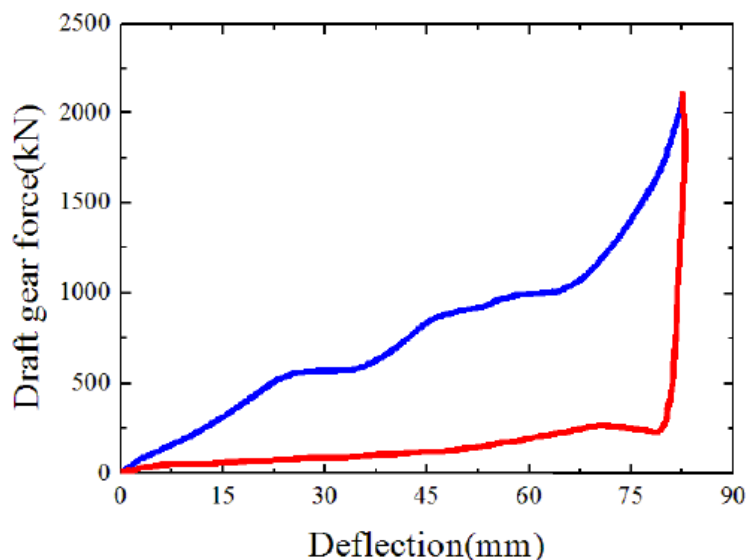



Рис. 2.5 Характеристика поглощающего аппарата

Теперь модель поезда готова, см. рис. 2.6. Сохраните её, нажав на кнопку  и указав в диалоговом окне имя и путь к объекту, например: {Данные УМ}\My models\Trains\LTDBTrain.

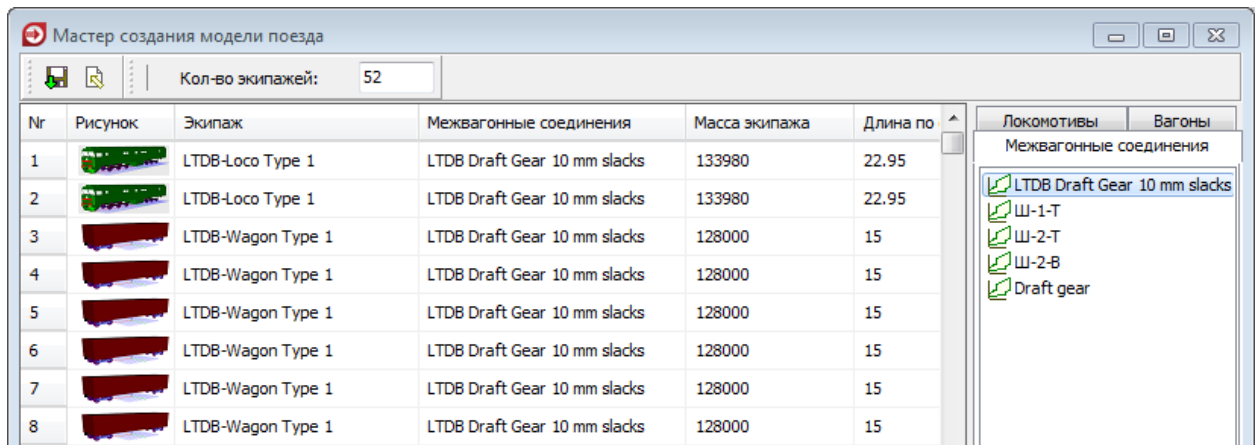


Рис. 2.6 Готовая модель поезда

## 2.3. Назначение параметров модели

Запустите программу **UM Simulation** и откройте созданную модель поезда.

### Настройка параметров интегрирования

Установим параметры процесса интегрирования. Откройте **Инспектор моделирования объекта**, на вкладке **Параметры моделирования** установите метод Парка (**Park**). Тип решения – **Прямой метод (RMS)**. Включите опцию **Расчет матриц Якоби** и установите галочку **Блочно-диагональные матрицы Якоби**. Установите **Путь** > 50 000, рис. 2.7.

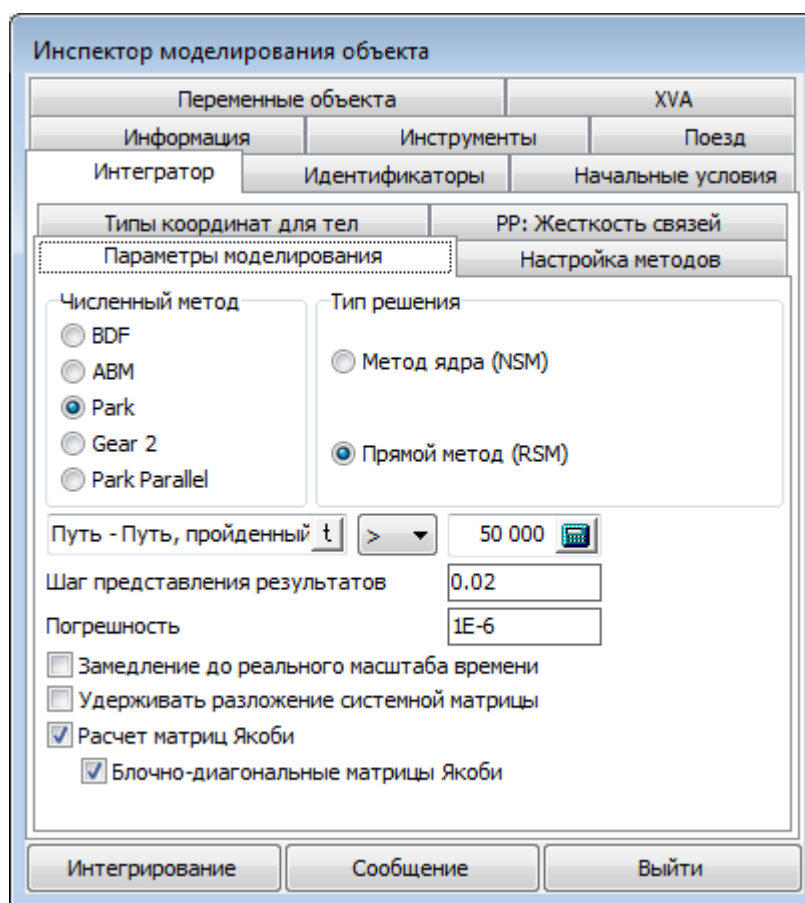


Рис. 2.7 Инспектор моделирования объекта

### Задание режима торможения

Зависимость силы динамического торможения от скорости и положения контроллера машиниста задана в модели локомотива и приведена на рис. 2.8. История изменения позиции контроллера динамического торможения от времени по условиям теста является одним из исходных данных. Эта история уже подготовлена заранее с помощью редактора кривых и нам останется лишь загрузить готовый файл.

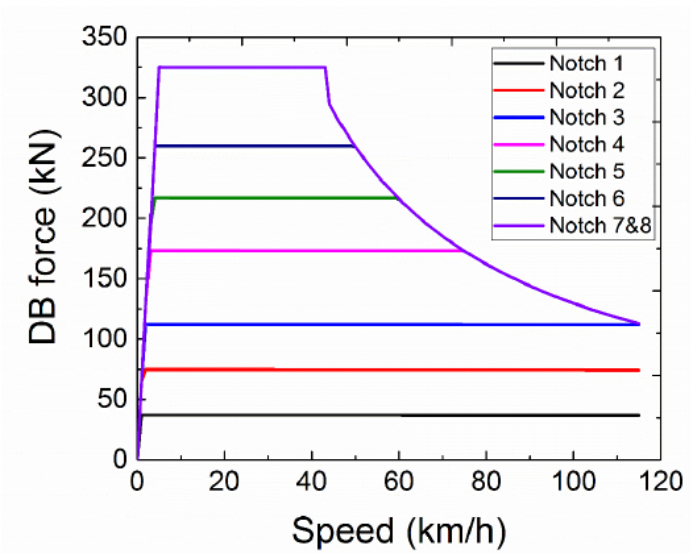


Рис. 2.8 Характеристика динамического тормоза

Для этого перейдем на вкладку **Идентификаторы | Управление идентификаторами**. Создадим идентификаторы. Нажмите на кнопку **+**, появится новое диалоговое окно. Далее нажмите на кнопку, выделенную на рис. 2.9. В появившемся списке выберите идентификатор модели **dynamic\_brake\_position** (рис. 2.10). Установите поле **Назначить значение одноименным идентификаторам** в значение **Всем**.

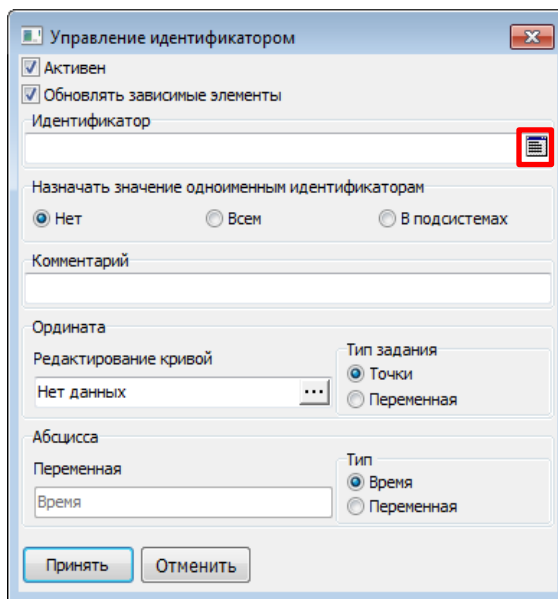


Рис. 2.9 Управление идентификатором

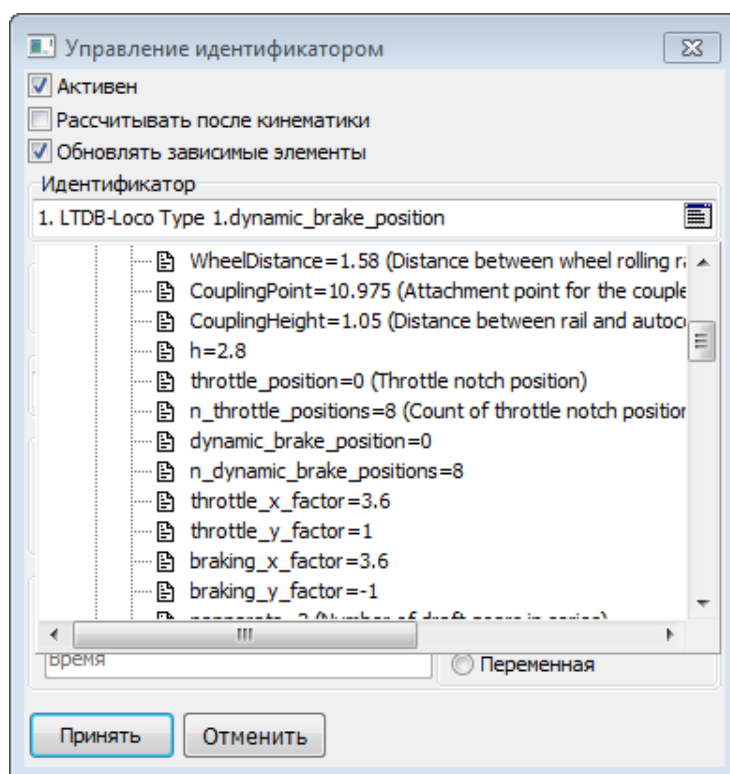


Рис. 2.10 Идентификатор **dynamic\_brake\_position**

Для того чтобы задать кривую, в поле **Редактирование кривой** нажмем **...**. Появится новое окно – **Редактор кривых**. Загрузите данные из файла, расположенного по следующему пути {Данные УМ}\Samples\Trains\LTDB-Train Configuration 1\Dynamic brake position.crv, рис. 2.11.

Далее нажмите **Применить** и **Принять**.

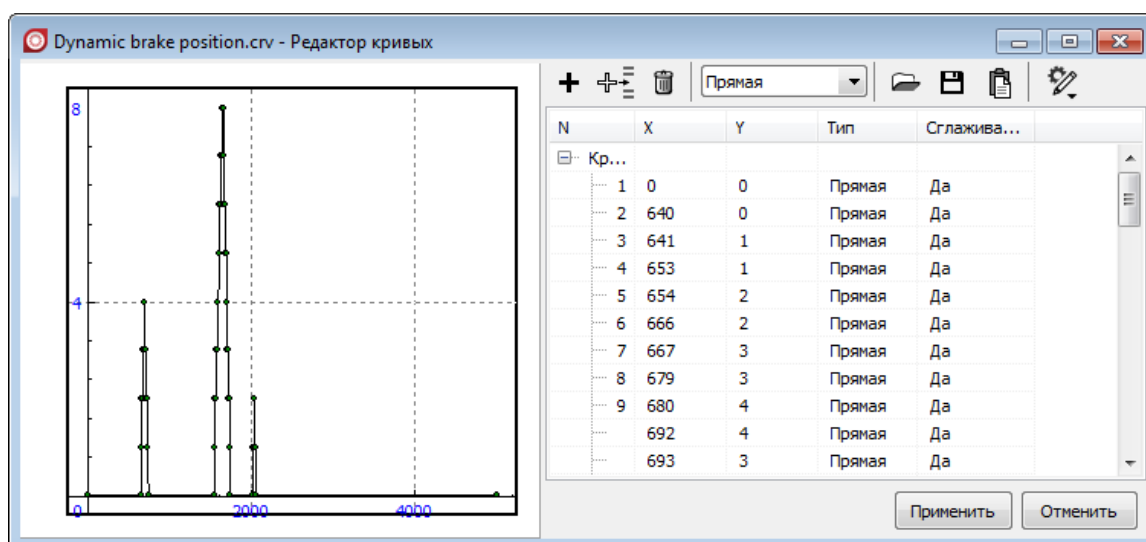


Рис. 2.11 **Редактор кривых** – положение динамического тормоза

### Задание режима тяги

Зависимость силы тяги от скорости и положения контроллера машиниста задана в модели локомотива и приведена на рис. 2.12. Также как и история изменения положения контроллера динамического торможения, история изменения позиции контроллера тяги от времени по условиям теста является одним из исходных данных. Эта история уже подготовлена заранее с помощью редактора кривых и нам останется лишь загрузить готовый файл.

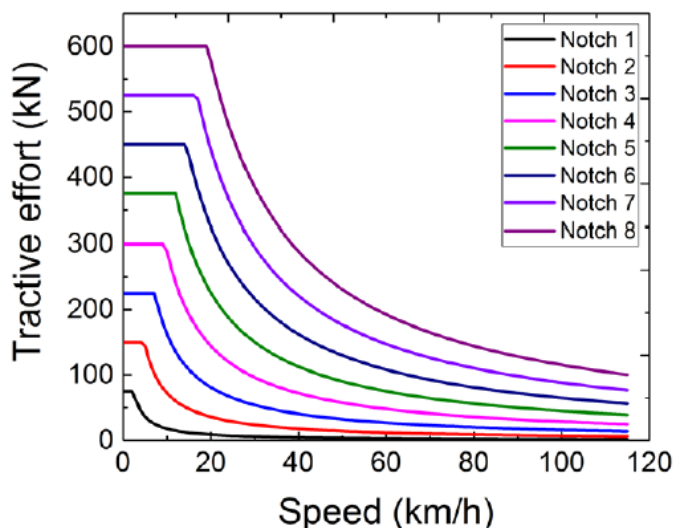


Рис. 2.12 Тяговая характеристика

Создайте еще один идентификатор, только на этот раз выберите **Throttle\_position** (рис. 2.13). Также как и ранее в поле **Назначить значение одноименным идентификаторам** установите значение **Всем**.

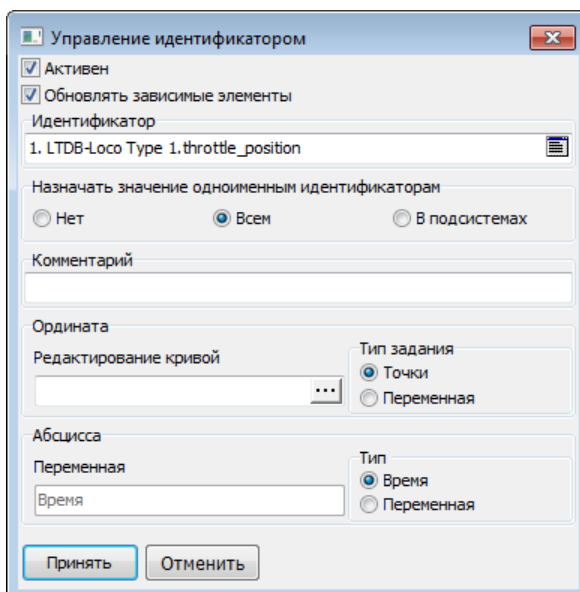


Рис. 2.13 Управление идентификатором **throttle\_position**

Откройте редактор кривых и загрузите историю изменения контроллера тяги из файла {Данные УМ}\Samples\Trains\LTDB-Train Configuration 1\Throttle position.crv, рис. 2.14.

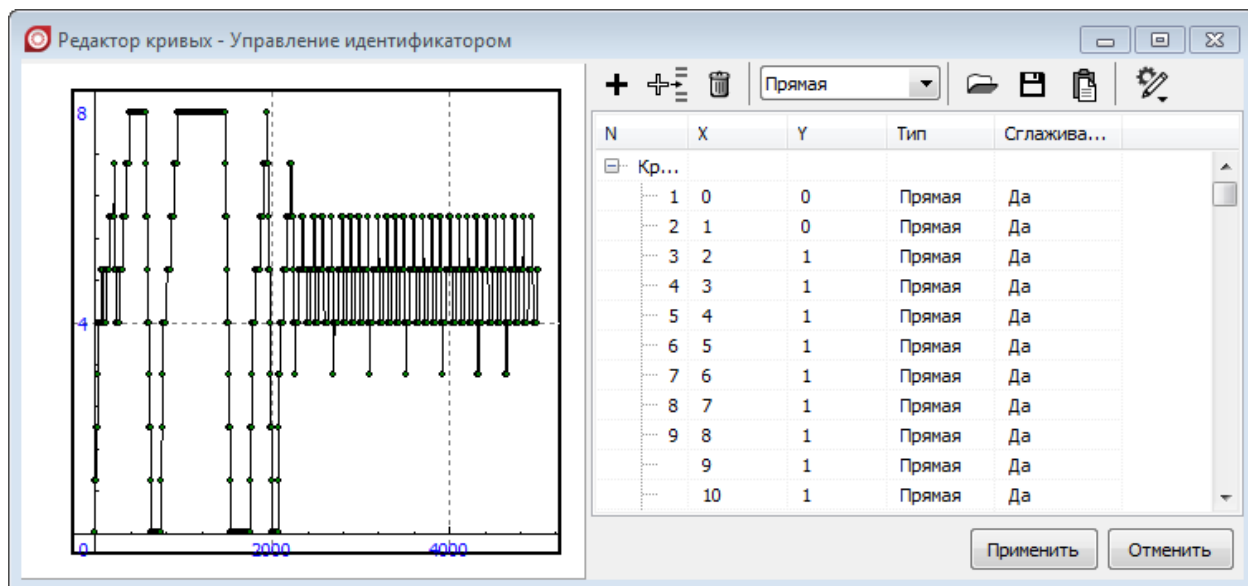


Рис. 2.14 Редактор кривых – позиция контроллера машиниста

### Задание макрогеометрии пути

На рис. 2.15 и рис. 2.16 приведены вертикальный профиль пути и кривизна пути, соответственно, заданные организаторами тестов в качестве исходных данных. Путем очевидных преобразований, которые мы опускаем в данном разделе, эти исходные данные были преобразованы в файл макрогеометрии в формате Универсального механизма, представленный на рис. 2.17.

Для загрузки заранее подготовленного файла макрогеометрии перейдите на вкладку **Поезд | Настройки | Путь** инспектора моделирования и загрузите макрогеометрию из файла {Данные УМ}\rw\MacroGeometry\LTDB-MacroGeometry.mcg, рис. 2.18.

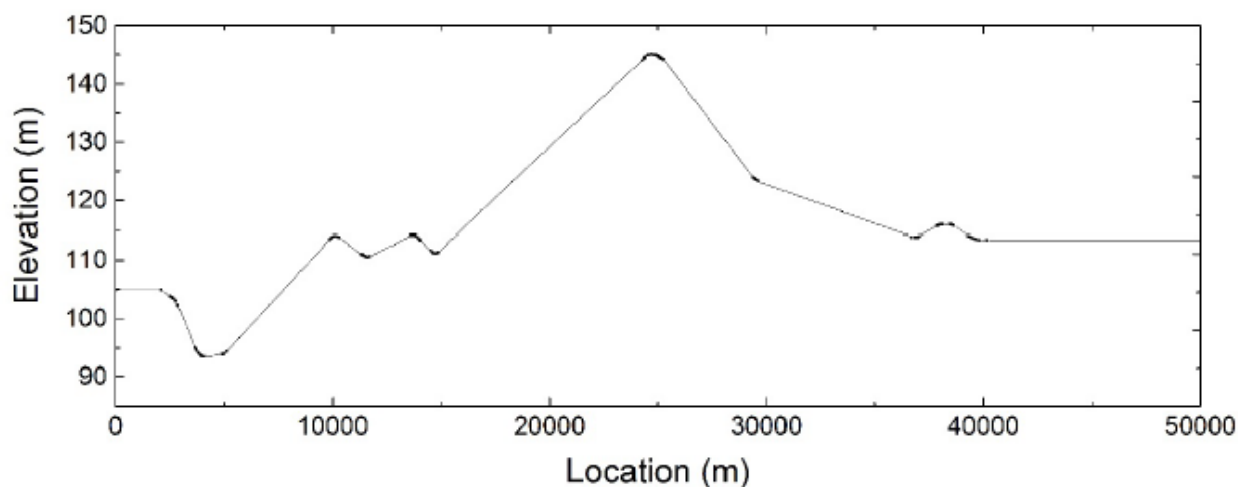


Рис. 2.15 Вертикальный профиль пути

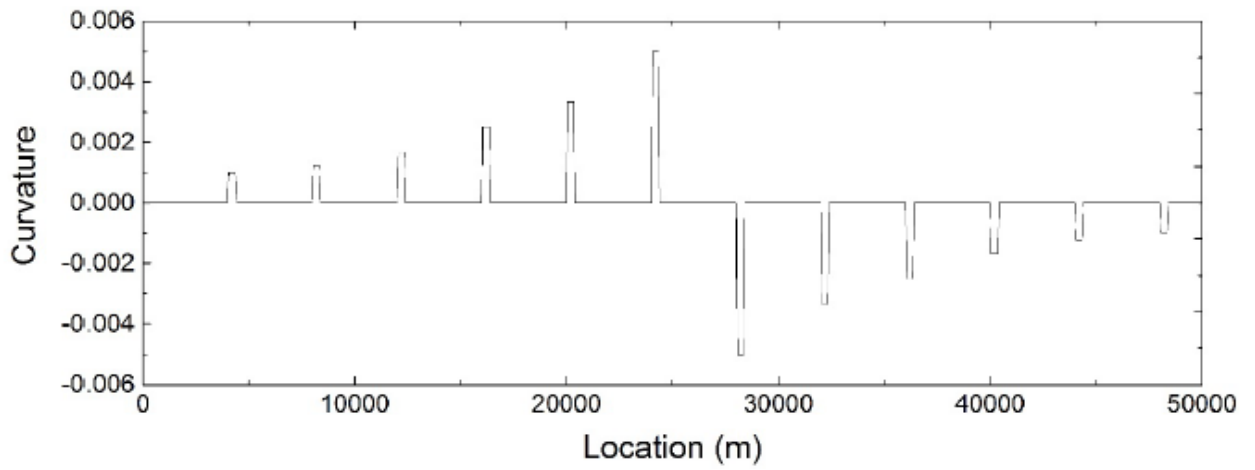


Рис. 2.16 Кривизна пути

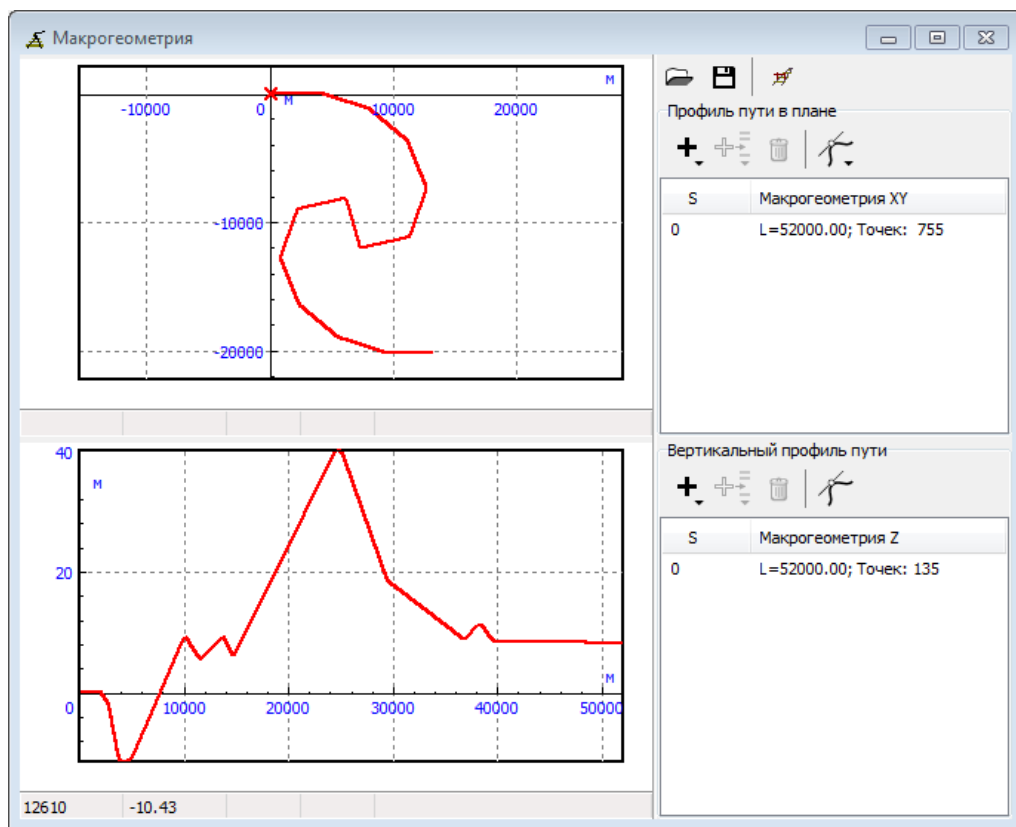


Рис. 2.17 Макрогеометрия

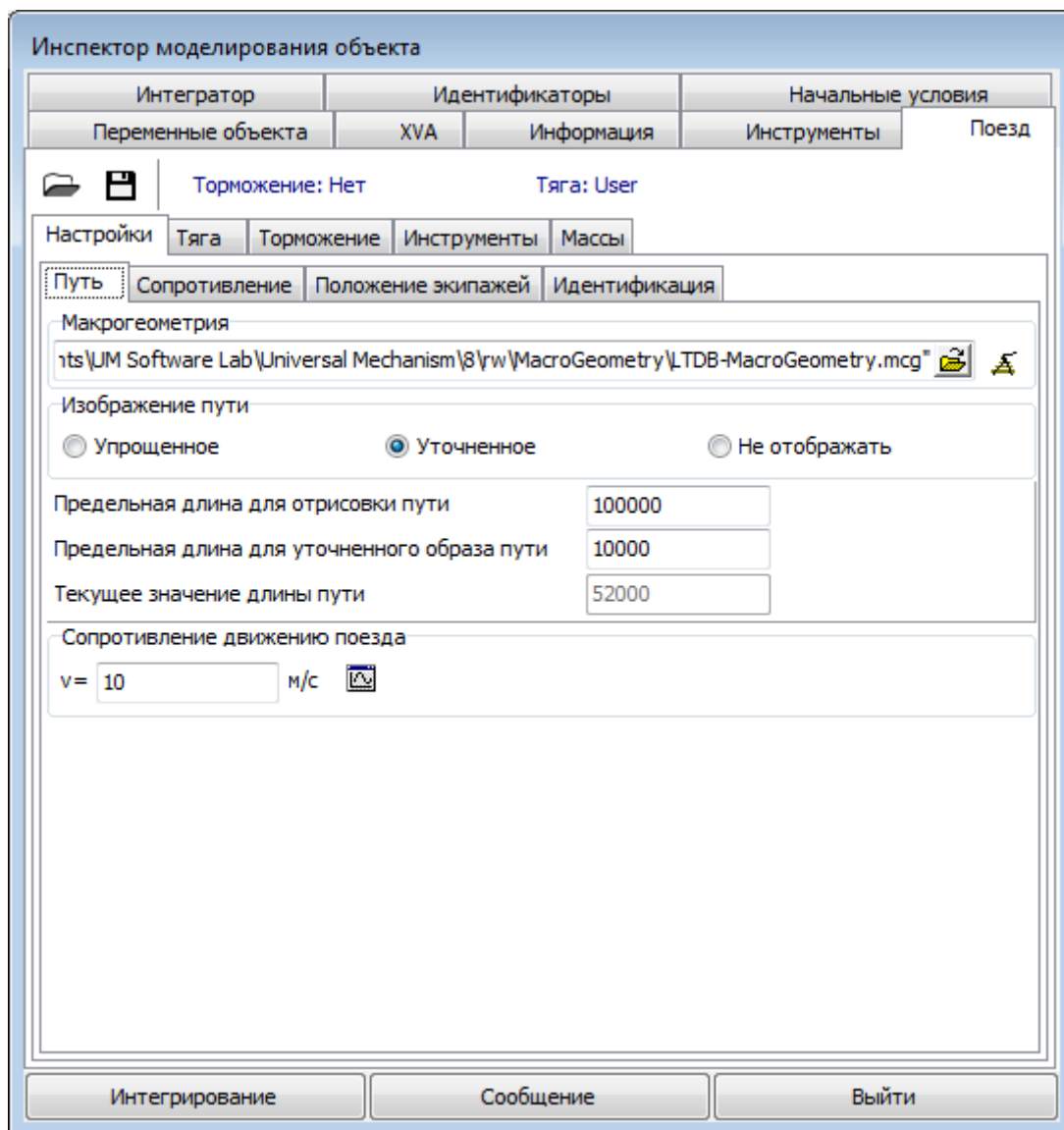


Рис. 2.18 Назначение макрогеометрии

### Назначение моделей сил сопротивления

Сопrotивление качению:

$$F_{rr} = m_w \left( 2.943 + \frac{89.2}{m_a} + 0.0306v + \frac{0.122v^2}{m_w} \right),$$

где  $m_w$  – масса вагона, т;  $m_a = 32$  – нагрузка на ось, т;  $v$  – скорость вагона.

Дополнительное сопротивление в кривой задано следующим образом:

$$F_{cr} = m_w \frac{6116}{R},$$

где  $R$  – радиус кривой.

Выберите вкладку **Сопrotивление | Основное**. Нажмите на кнопку **+** и загрузите из файла модели сил сопротивления. Нам нужны: **LTDB-Leading Locomotive.rf**, **LTDB-All Other Locomotives.rf**, **LTDB-All Wagons.rf**. Далее назначим всем **LTDB-All Wagons**, щелкнув по нему правой кнопкой мыши, рис. 2.19. Чтобы назначить первым двум локомотивам другие модели сопротивления, необходимо дважды щелкнуть в поле

**Модель сопротивления**, рис. 2.20. Первому локомотиву назначим **LTDB-Leading Locomotive**, а второму – **LTDB-All Other Locomotives**.

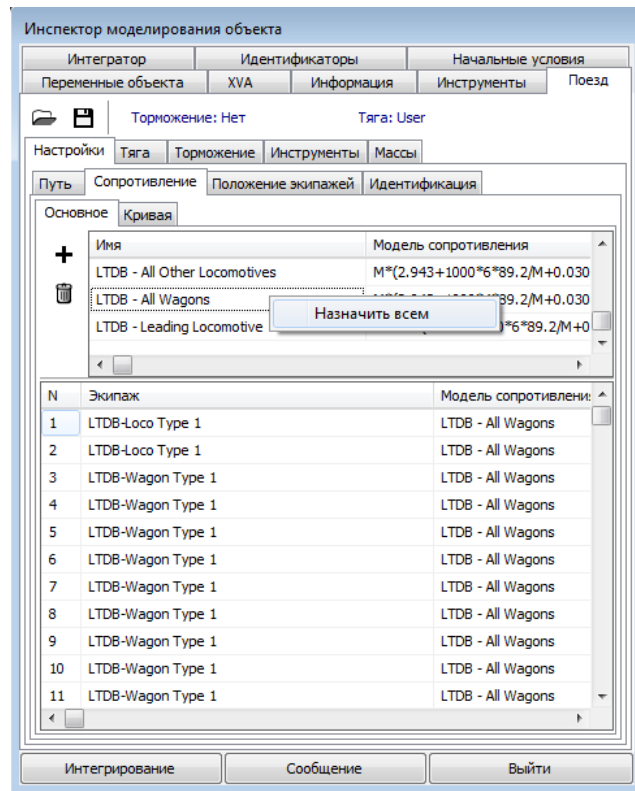


Рис. 2.19 Назначение всем модели сопротивления **LTDB-All Wagons**

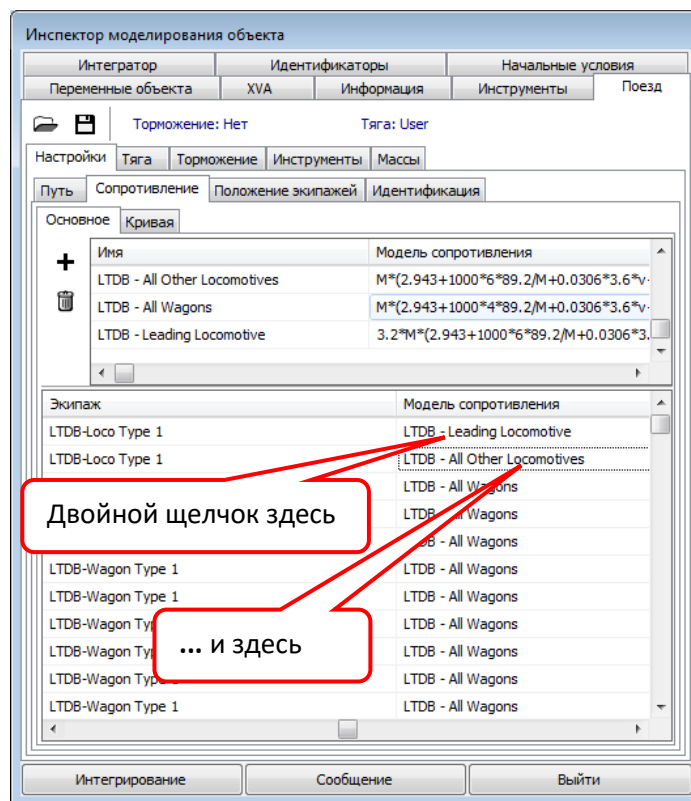


Рис. 2.20 Модели сопротивления для первых двух локомотивов

Далее перейдите на вкладку **Кривая**. Модель силы –  $a/(R - b)$ . Коэффициенты  $a=6116$ ,  $b=0$ , рис. 2.21.

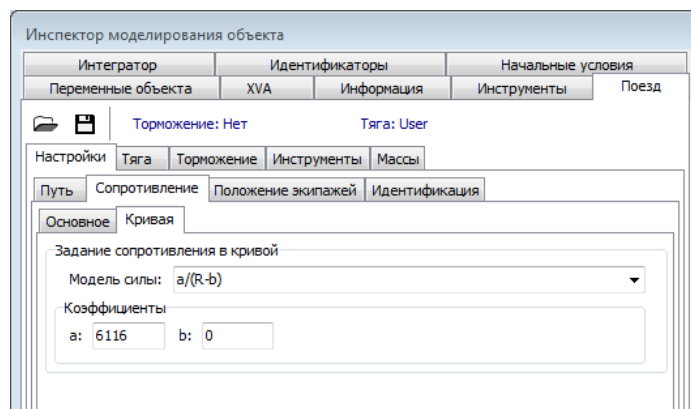


Рис. 2.21 Задание сопротивления кривой

### Задание положения экипажа

Перейдите на вкладку **Положение экипажей** и в поле **Положение первого экипажа** задайте **3011.475**, рис. 2.22.

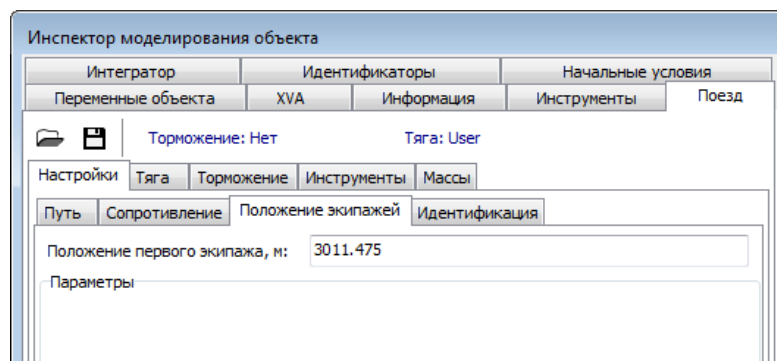


Рис. 2.22 Положение первого экипажа

### Создание списка переменных, позволяющих анализировать динамику поезда

Создайте новый **Список переменных**. Для этого выберите пункт главного меню **Инструменты | Переменные | Список переменных**. Появится диалоговое окно, представленное на рис. 2.23.

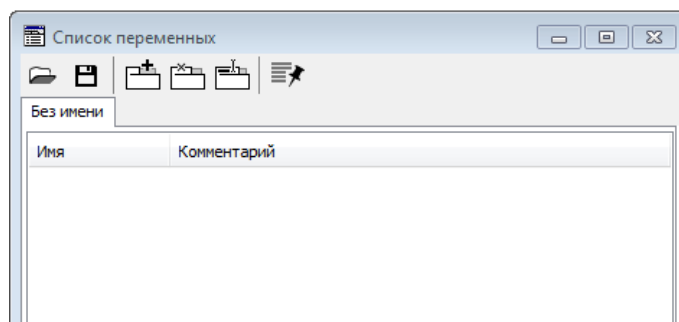


Рис. 2.23 Список переменных

Переименуйте вкладку нажатием на , как показано на рис. 2.24. Нажмите **ОК**.

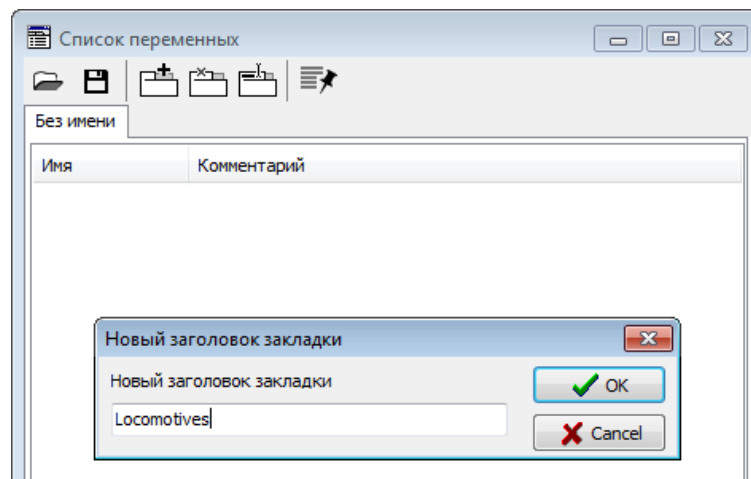


Рис. 2.24 Вкладка **Locomotives**

Теперь откройте пункт меню **Инструменты | Переменные | Мастер переменных**. На вкладке **Линейные переменные** выберите тела **Vehicle** из подсистемы **LTDB-Loco Type 1**. В поле **Компонента** выберите **X**. Создайте по очереди координату, скорость и ускорение, рис. 2.25. Перенесём их в **Список переменных**, рис. 2.26.

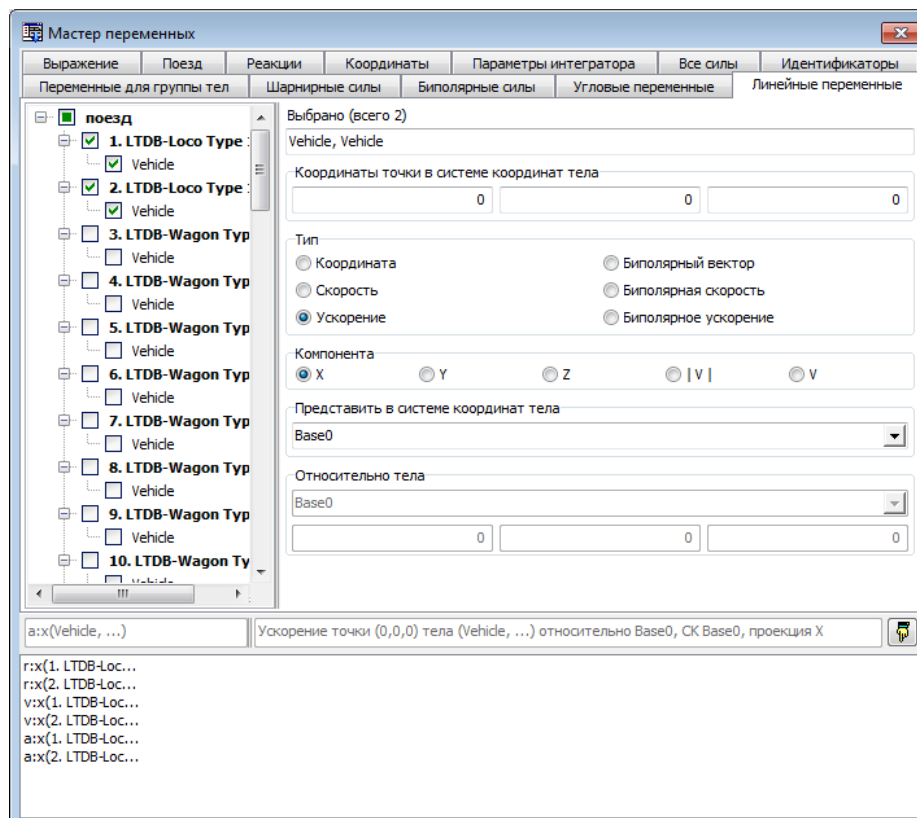


Рис. 2.25 Мастер переменных – Линейные переменные

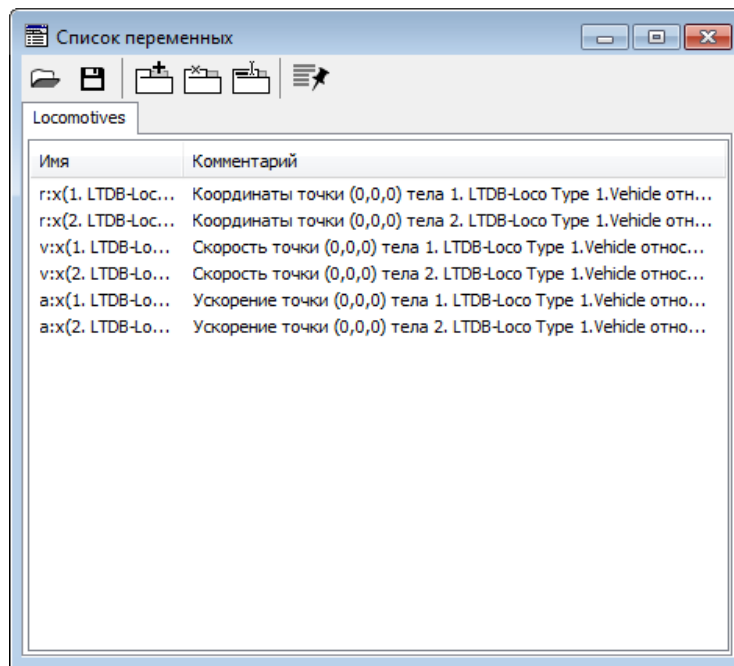


Рис. 2.26 Список переменных с заполненной вкладкой **locomotives**

Создайте еще одну вкладку **Coupler forces** в **Списке переменных**. Для ее заполнения в **Мастере переменных** перейдите на вкладку **Поезд**, выберите тела **Vehicle 2**, **Vehicle 25** и **Vehicle 51**. Создайте переменные для силы в междвагонном соединении (рис. 2.27) и перенесите их на вкладку **Coupler forces**, рис. 2.28.

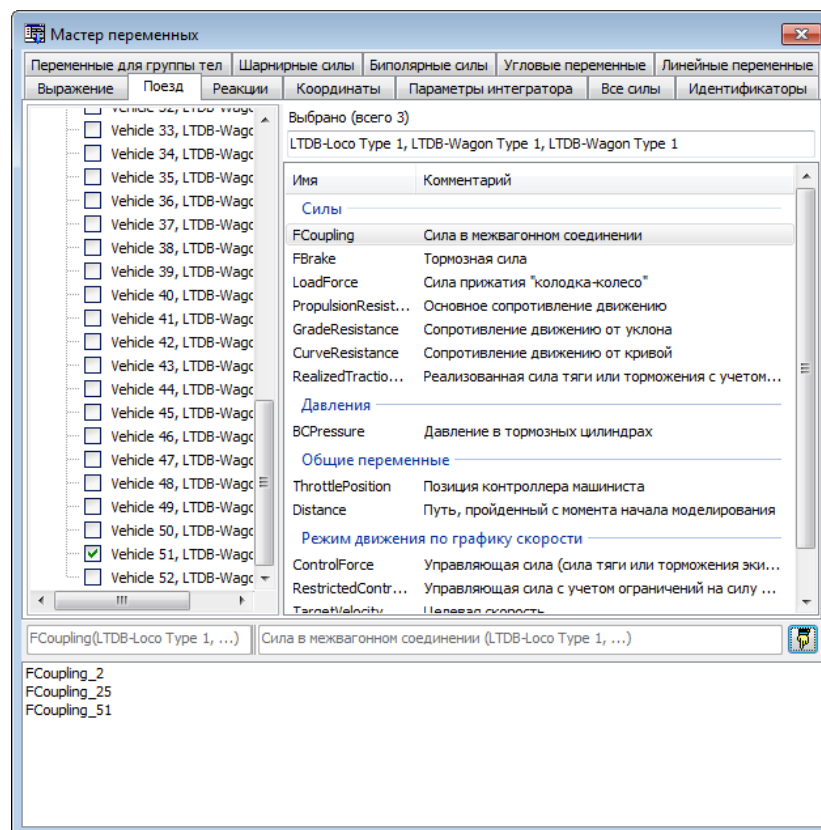


Рис. 2.27 Сила в междвагонном соединении

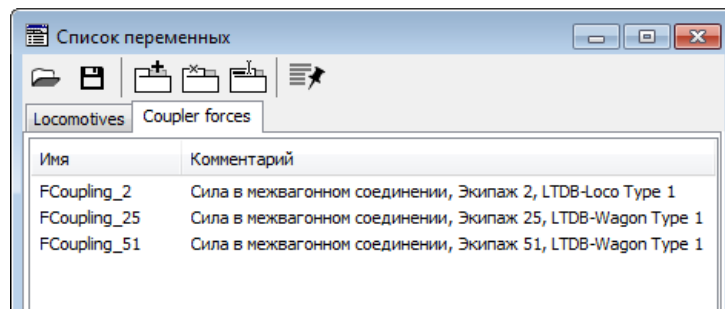


Рис. 2.28 Список переменных – Coupler forces

Создадим еще три вкладки в **Списке переменных**: **Traction Force**, **Resistance**, **Throttle position** – и будем их постепенно заполнять.

На вкладку **Traction Force** добавьте переменные «реализованная сила тяги или торможения с учетом предела по сцеплению», как показано на рис. 2.29.

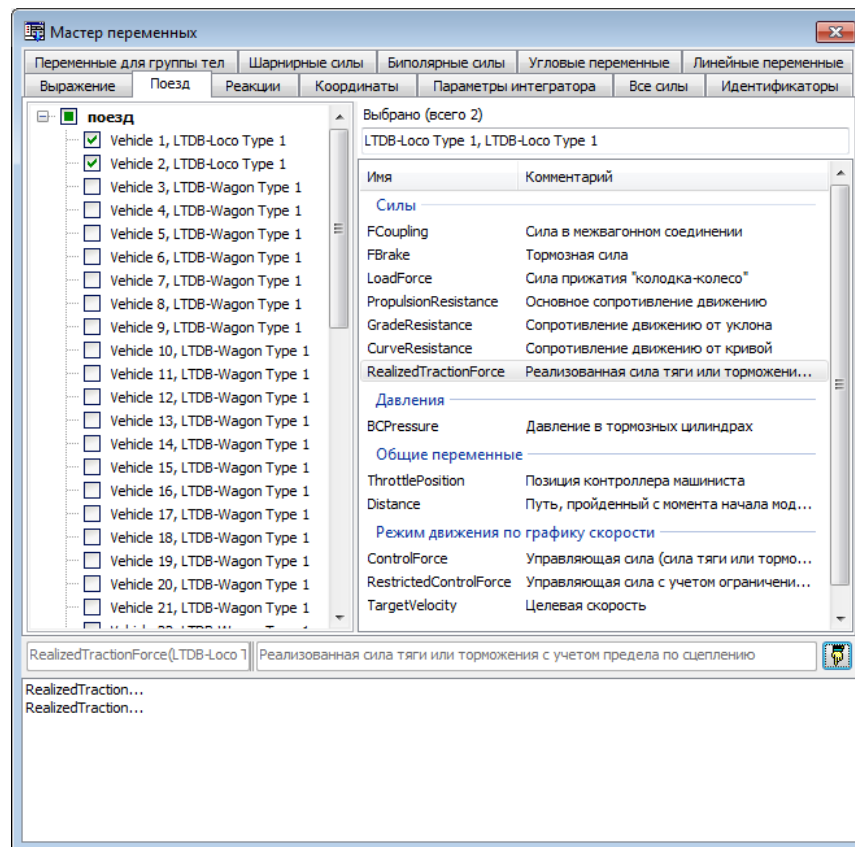


Рис. 2.29 Мастер переменных – Realized traction force

На вкладку **Resistance** перенесите силы: основное сопротивление движению, сопротивление движению от уклона, сопротивление движению от кривой, рис. 2.30.



Рис. 2.30 Сопротивление

Последние переменные для вкладки **Throttle position** мы создадим на вкладке **Идентификаторы** Мастера переменных, выбрав для **LTDB-Loco Type 1** и **LTDB-Loco Type 2** – **throttle position** и **dynamic brake position**, рис. 2.31.

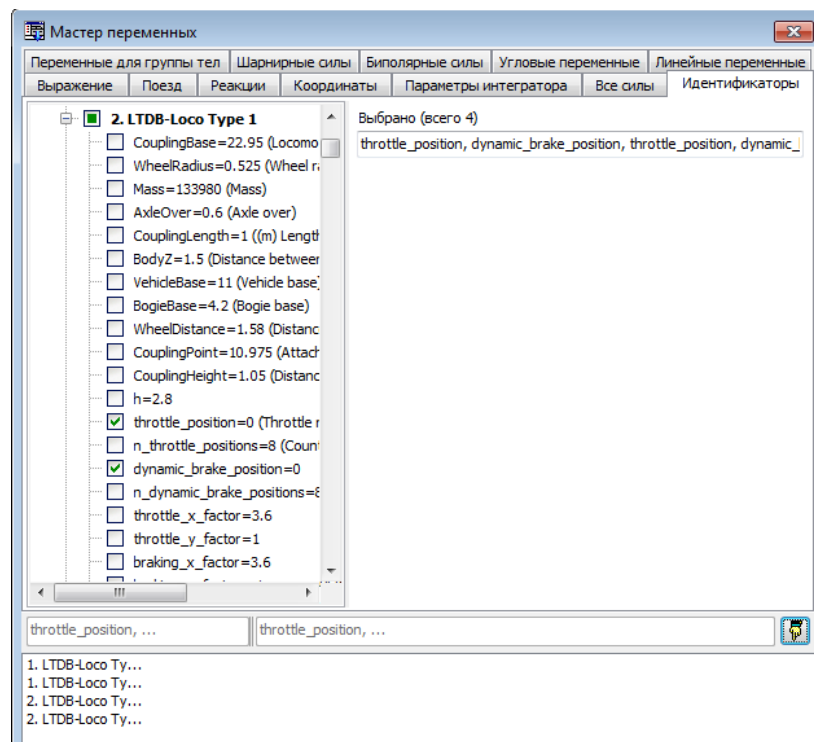


Рис. 2.31 Мастер переменных – Идентификаторы

Теперь **Список переменных** сформирован, сохраним его. Перед началом интегрирования в **Инспекторе моделирования объекта** необходимо перейти на вкладку **Переменные объекта**, загрузить **Список переменных** и установить галочку **Автоматическое сохранение переменных**, иначе результаты моделирования не сохранятся.

Для наглядности процесса создадим пять графических окон и будем добавлять переменные в них по очереди. В первое графическое окно добавим скорости локомотивов, во второе – силы сопротивления для первого локомотива, в третье – реализованную силу тяги или торможения с учетом предела по сцеплению, в четвертое – положение динамического тормоза и позиция контроллера машиниста для первого локомотива, а в пятое – силы в автосцепках.

## 2.4. Моделирование динамики поезда

Теперь все готово для моделирования динамики. Рабочий стол программы выглядит так (рис. 2.32):

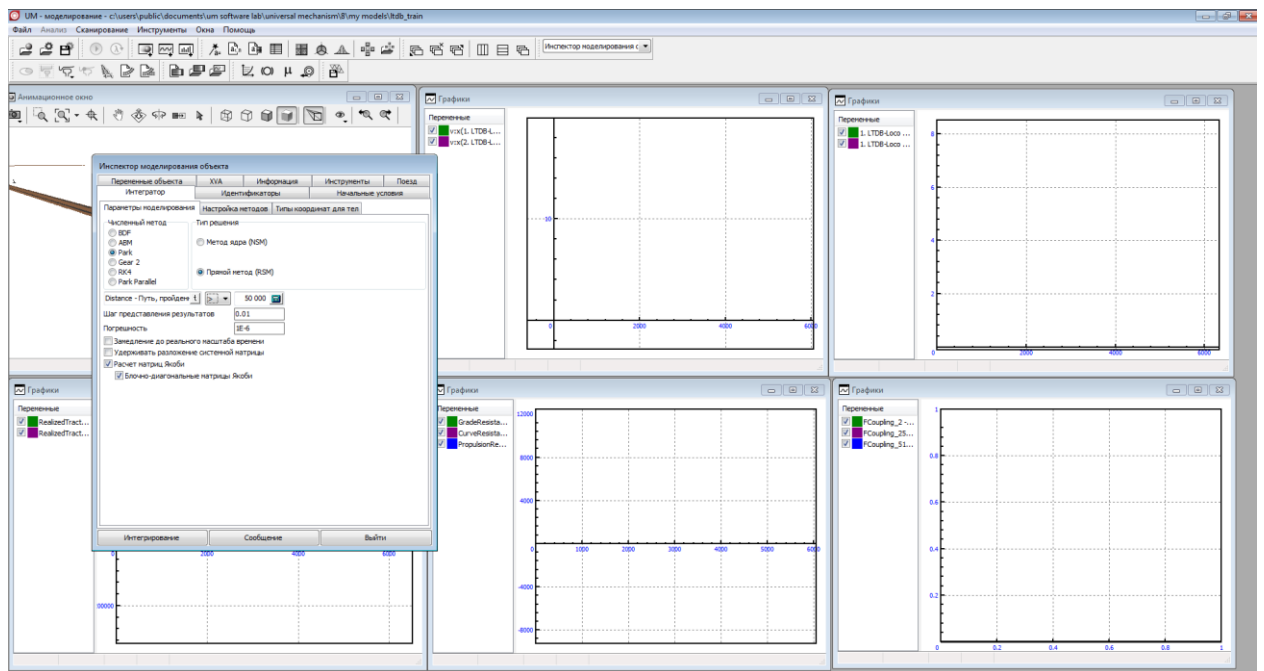


Рис. 2.32 Рабочий стол программы - все готово к моделированию

Запустите процесс моделирования с помощью кнопки *F9* на клавиатуре либо кнопки **Интегрирование** в **Испекторе моделирования**.

При первом запуске моделирования на экране появится сообщение (рис. 2.33). Поскольку каждый вагон поезда имеет одно межвагонное соединение со следующим за ним сзади, то очевидно, что для последнего вагона поезда межвагонное соединение излишне. Поэтому предлагается не рассматривать силу в этом соединении. Для выполнения расчёта в появившемся окне нужно нажать кнопку **Продолжить**. Чтобы скрыть появление предупреждения в дальнейшем можно активировать пункт "Не показывать больше данное сообщение".

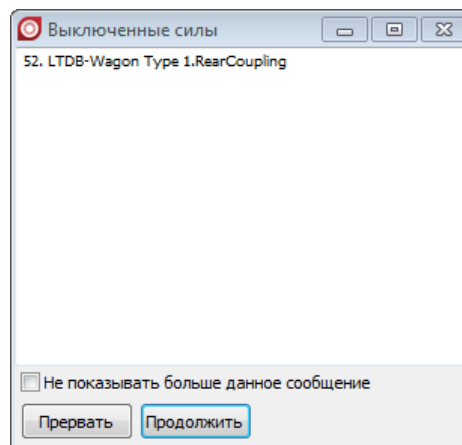


Рис. 2.33 Предупреждение перед началом интегрирования

## 2.5. Результаты моделирования

График изменения скорости движения первого и второго экипажей представлен на рис. 2.34.

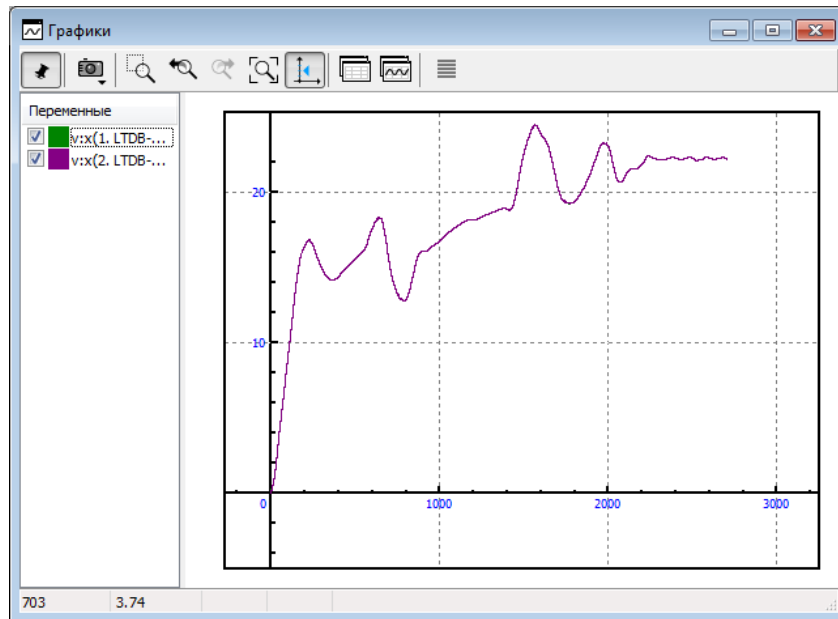


Рис. 2.34 Скорость движения первых двух экипажей

График реализованной силы тяги и торможения с учетом предела по сцеплению от времени изображен на рис. 2.35.

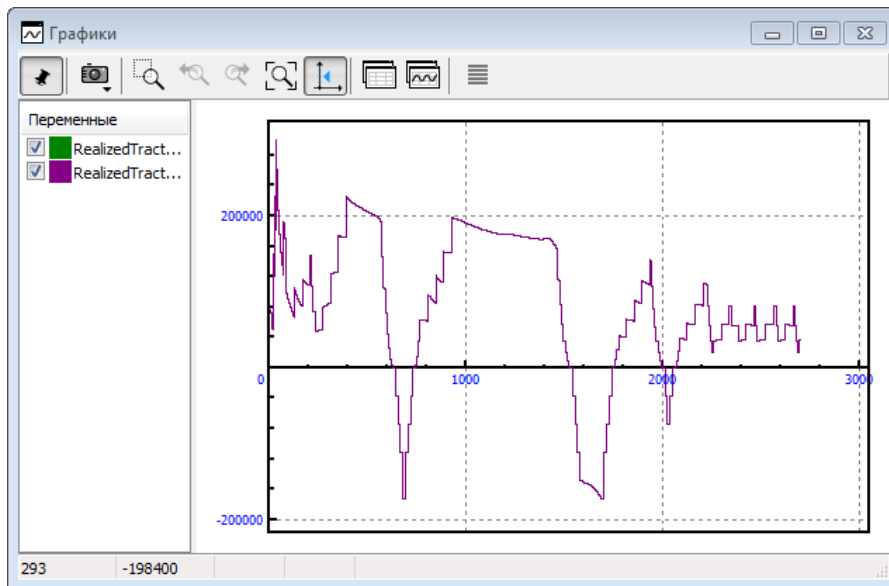


Рис. 2.35 Реализованная сила тяги и торможения с учетом предела по сцеплению для первых двух экипажей

На рис. 2.36 показаны силы сопротивления качению поезда на уклоне, в кривой и общая как функции времени.

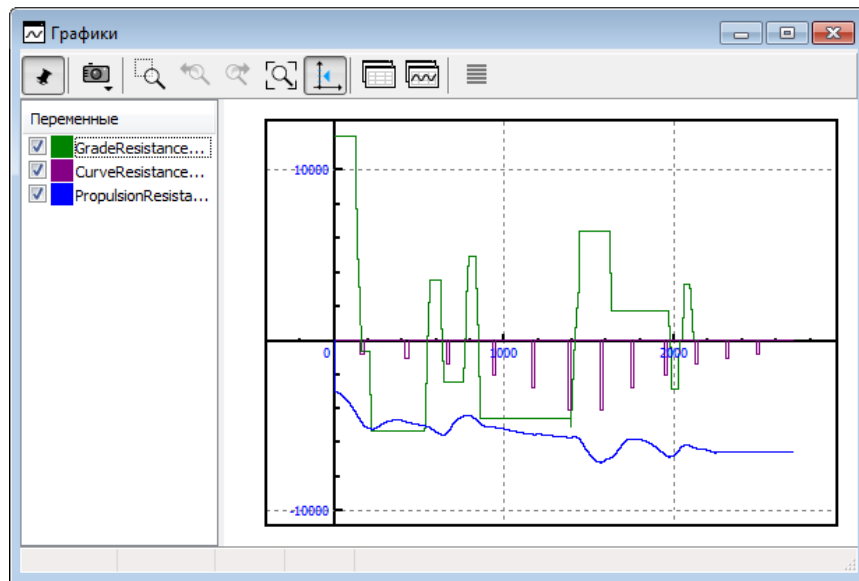


Рис. 2.36 Силы сопротивления качению поезда: на уклоне, в кривой, общая

Реализация режимов тяги и торможения с помощью изменения позиции контроллера машиниста для первого локомотива показана на рис. 2.37.

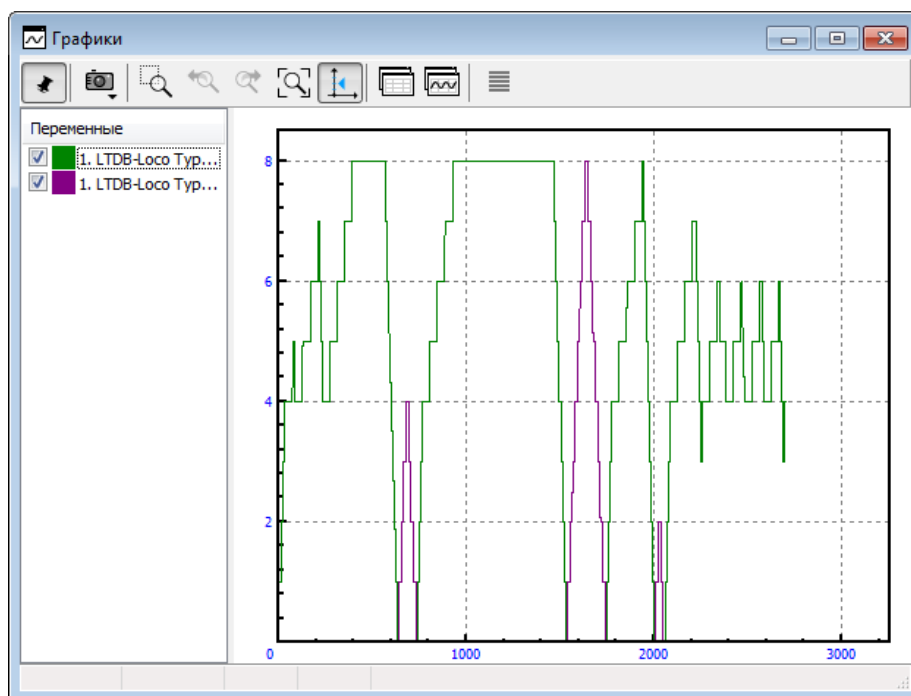


Рис. 2.37 Реализация режимов тяги и торможения с помощью изменения позиции контроллера машиниста для первого локомотива

Продольные силы, возникающие в межвагонных соединениях для контрольных вагонов 2, 25 и 51, представлены на рис. 2.38.

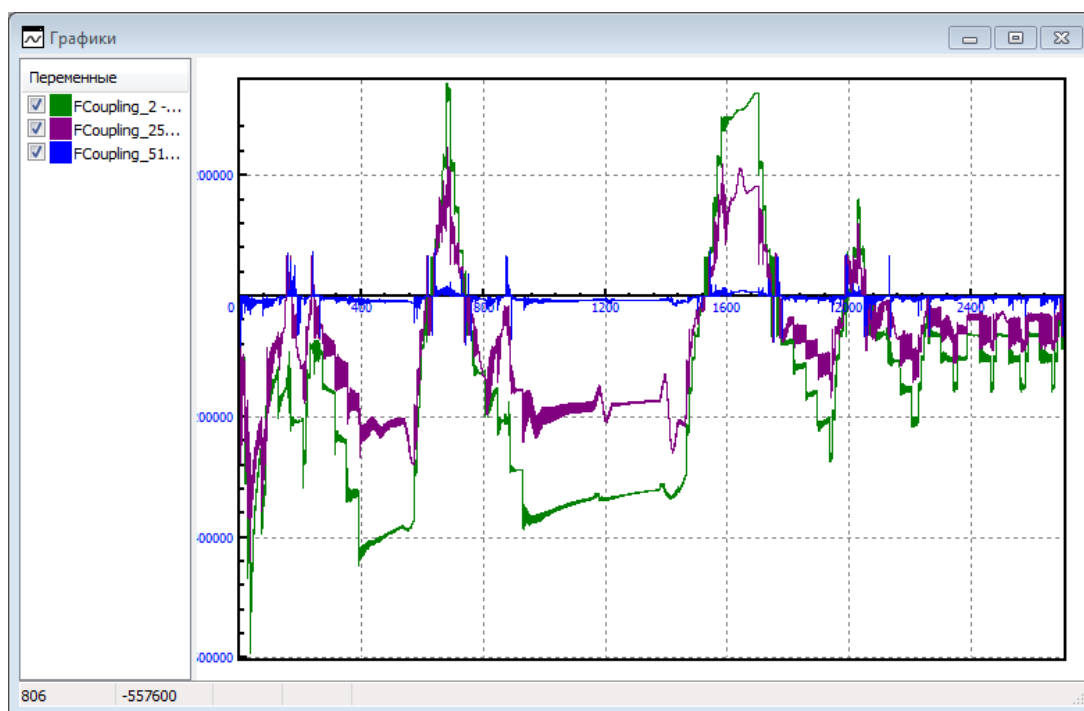


Рис. 2.38 Силы в автосцепных устройствах вагонов 2, 25 и 51

## Список литературы

- [1] Qing Wu, Maksym Spiryagin, Colin Cole, Chongyi Chang, Gang Guo, Alexey Sakalo, Wei Wei, Xubao Zhao, Nico Burgelman, Pier Wiersma, Hugues Chollet, Michel Sebes, Amir Shamdani, Stefano Melzi, Federico Cheli, Egidio di Gialleonardo, Nicola Bosso et al., International benchmarking of longitudinal train dynamics simulators: results // *Vehicle System Dynamics*. – 2018. – V.56(3). – P. 343-365. DOI: 10.1080/00423114.2017.1377840.
- [2] Maksym Spiryagin, Qing Wu, Colin Cole, International benchmarking of longitudinal train dynamics simulators: benchmarking questions // *Vehicle System Dynamics*. – 2017. – V.55(4). – P. 450-463.
- [3] Maksym Spiryagin, Qing Wu & Colin Cole, (2017) Longitudinal train dynamics, *Vehicle System Dynamics*, 55:4, 449-449, DOI: 10.1080/00423114.2017.1285510.
- [4] Slavisa Salinic, Modeling of a light elastic beam by a system of rigid bodies // *Theoret. Appl. Mech.* – 2004.– V.31(3-4) – P.395-410.
- [5] James M. Gere, Stephen P. Timoshenko, *Mechanics of materials*. Boston PWS Pub Co. 1997. 4th ed..
- [6] Euler–Bernoulli beam theory,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Euler%E2%80%93Bernoulli\\_beam\\_theory](https://en.wikipedia.org/wiki/Euler%E2%80%93Bernoulli_beam_theory).
- [7] Euler's critical load, [https://en.wikipedia.org/wiki/Euler%27s\\_critical\\_load](https://en.wikipedia.org/wiki/Euler%27s_critical_load).
- [8] В. Л. Бидерман, *Теория механических колебаний: Учебник для вузов* – М.: Высш. школа, 1980. – 408 с.
- [9] А. С. Вольмир, *Устойчивость механических систем* – М.: Наука, 1967. – 984 с.
- [10] С. П. Тимошенко, Дж. Гере, *Механика материалов: Учебник для вузов*. 2-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2002. – 672 с..
- [11] G. Xu и Y. Xu, *GPS: Theory, Algorithms and Applications 3rd ed.* -: Springer, 2016 - 489 p..
- [12] Б. К. Леонтьев, *GPS: Все, что Вы хотели знать, но боялись спросить. Неофициальное пособие по глобальной системе местопределения*, Литературное агентство «Бук-Пресс», 2006. - 352 с.
- [13] Kaplan E. D. и . C. J. Hegarty, *Understanding GPS Principles and Applications 2nd ed.*:- Springer, 207, - 723 p..
- [14] В. Hofmann-Wellenhof, Н. Lichtenegger и Е. Wasle, *GNSS - Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more* Springer Wien NewYork, 2008 – 546 p..
- [15] МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ ГОСТ 32453-2017. Глобальная навигационная спутниковая система. СИСТЕМЫ КООРДИНАТ. Методы преобразований координат определяемых точек. Издание официальное.- Москва: Стандартинформ, 2017, - 23 с..
- [16] Постановление Правительства Российской Федерации от 26 ноября 2016 г. № 1240

«Об установлении государственных систем координат, государственной системы высот и государственной гравиметрической системы».

- [17] PIDA: LiDAR in ADAS Applications Will Experience Most Rapid Growth.  
URL:<https://en.ctimes.com.tw/DispNews.asp?O=HK2C3A8BPUQSAA00NB> (Дата: 04.03.2019).
- [18] Electronics-Driver Assistance Systems. Техническая информация Hella. Hella 2003, 2004, 2005. [www.hella.com](http://www.hella.com).
- [19] Сысоева С., Датчики. Актуальные технологии и применения датчиков автомобильных систем активной безопасности. Часть 1. Новые технологии и применения датчиков автомобильных систем помощи водителю URL: [www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2006\\_08\\_34.pdf](http://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2006_08_34.pdf).
- [20] T. Yoshida, H. Kuroda, T. Nishigaito. Adaptive Driver-assistance Systems.  
[http://www.hitachi.com/ICSFiles/afieldfile/2004/11/26/r2004\\_04\\_104\\_1.pdf](http://www.hitachi.com/ICSFiles/afieldfile/2004/11/26/r2004_04_104_1.pdf).
- [21] В. И. Арнольд, Математические методы классической механики: Учеб. Пособие для вузов. – 3-е изд. испр. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1989. – 472 с.