

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ 6.0



Моделирование динамики поезда

Руководство пользователя

2010

Рассматриваются особенности автоматизированного создания и моделирования динамики поезда

Оглавление

15. МОДУЛЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПОЕЗДА	15-3
15.1. Введение	15-3
15.2. Общие положения	15-5
15.3. Создание модели поезда	15-7
15.3.1. Модель экипажа	15-9
15.3.2. Обязательные идентификаторы модели экипажа	15-13
15.3.3. Модель поглощающего аппарата	15-14
15.3.4. Модель вагона-цистерны	15-15
15.4. Моделирование продольной динамики поезда	15-16
15.4.1. Инспектор моделирования поезда	15-16
15.4.2. Настройка параметров пути	15-17
15.4.3. Силы сопротивления движению	15-18
15.4.4. Силы сопротивления движению от кривой	15-21
15.4.5. Положение экипажей	15-22
15.4.6. Тормозное оборудование	15-23
15.4.6.1. Создание модели коэффициента трения	15-23
15.4.6.2. Создание модели силы нажатия	15-25
15.4.6.3. Формирование тормозной системы поезда	15-27
15.4.6.4. Задание режимов торможения	15-31
15.4.7. Настройка параметров вагонов-цистерн	15-33
15.4.8. Задание режима тяги	15-34
15.4.8.1. Задание графиков тяги	15-35
15.4.8.2. Идентификация параметров тяги	15-36
15.5. Модель поезда Train60	15-37
15.6. Список литературы	15-38

15. Модуль моделирования динамики поезда

15.1. Введение

Значительные продольные силы в автосцепках, возникающие при трогании железнодорожного состава с места, торможении или движении по пути со сложным профилем, представляют большую опасность при движении поезда. Эти силы должны быть ограничены исходя из условий безопасности движения по прочности и устойчивости подвижного состава, для чего необходимо детально исследовать продольную динамику железнодорожного состава.

Многие задачи продольной динамики могут быть решены с применением методов компьютерного моделирования, которые могут с существенно меньшими временными и материальными затратами предсказать поведение поезда, включая ситуации, которые было бы опасно моделировать в реальных условиях.

В рамках программного комплекса «Универсальный механизм» разрабатывается модуль моделирования продольной динамики железнодорожного состава (UM Train), который полностью автоматизирует процесс создания модели поезда и анализ полученных результатов. Этот модуль позволяет рассчитывать продольную динамику поезда в режимах выбега, тяги и торможения на пути любой конфигурации. При расчете пользователю доступны не только общие для всех механических систем величины такие как координаты, скорости, ускорения, силы инерции и т.д., но специфичные для поезда величины, например силы в межвагонных соединениях и силы торможения.

В модуле UM Train имеется база данных моделей наиболее распространенных на железных дорогах локомотивов, вагонов и поглощающих аппаратов, из элементов которой можно набрать модель поезда. Пользователь может легко расширить базы данных, добавляя новые модели.

15.2. Общие положения

Модель продольной динамики состава традиционно использует упрощенное представление рельсовых экипажей, при котором пренебрегают их вертикальной и поперечной динамикой. Все тела, входящие в модели экипажей, движутся поступательно вдоль одной прямой. Отдельный экипаж может состоять из любого числа тел, соединенных силовыми элементами. Например, при моделировании цистерны, частично наполненной жидкостью, в простейшем случае вводится дополнительная масса, присоединенная к кузову упруго-диссипативным элементом. Значение присоединенной массы, коэффициентов жесткости и диссипации могут определяться либо экспериментально, либо на основании каких-либо упрощенных моделей колебания жидкости. Стандартно в УМ с этой целью используются экспериментальные данные, приведенные в открытой печати.

Движение в кривых моделируется дополнительной силой сопротивления, которая зависит от массы экипажа, радиуса кривой, а в некоторых моделях – от скорости движения. При проходе переходных кривых сила сопротивления нарастает от нуля до значения сопротивления в кривой при заезде и убывает до нуля при выезде из кривой.

При движении в наклонных участках пути (спуски или подъемы) дополнительно вводится продольная составляющая силы тяжести, имитирующая движение по переменному вертикальному профилю.

Отдельные экипажи в составе поезда соединены силовыми элементами, моделирующими поглощающие аппараты. Стандартно для этого используются биполярные силовые элементы.

При создании элементов модели поезда (вагонов, локомотивов, автосцепных устройств) следует учитывать положения:

- о стандартных идентификаторах, параметризующих некоторые геометрические, силовые и инерционные свойства экипажей;
- о стандартных именах для биполярных элементов, моделирующих автосцепные устройства;
- о стандартных комментариях, идентифицирующих элементы модели;
- о стандартных точках связи, используемых для присоединения силовых элементов, моделирующих автосцепки.

Данные положения подробно обсуждаются в первой главе руководства.

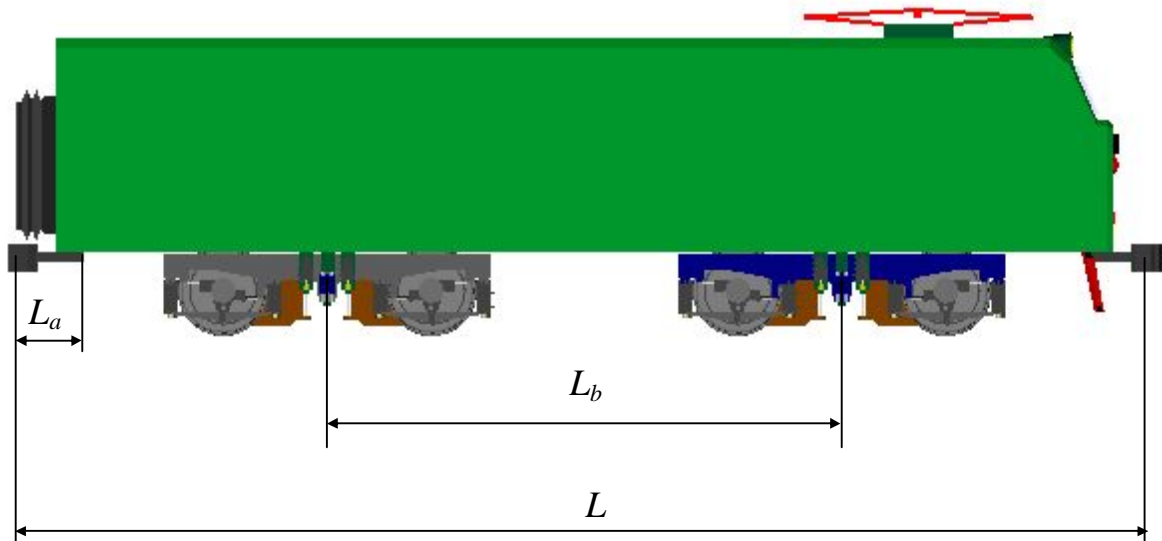


Рис. 15.1. Стандартные геометрические параметры экипажа

Для примера на рис. 15.1 приведены геометрические параметры, которым в моделях экипажей назначаются стандартные идентификаторы:

L – база экипажа по автосцепкам;

L_b – база по тележкам;

L_a – половина длины автосцепки.

15.3. Создание модели поезда

Первый этап при создании модели поезда – вызов **Мастера создания поезда**, используя пункт меню **Инструменты | Создание модели поезда**, рис. 15.2.

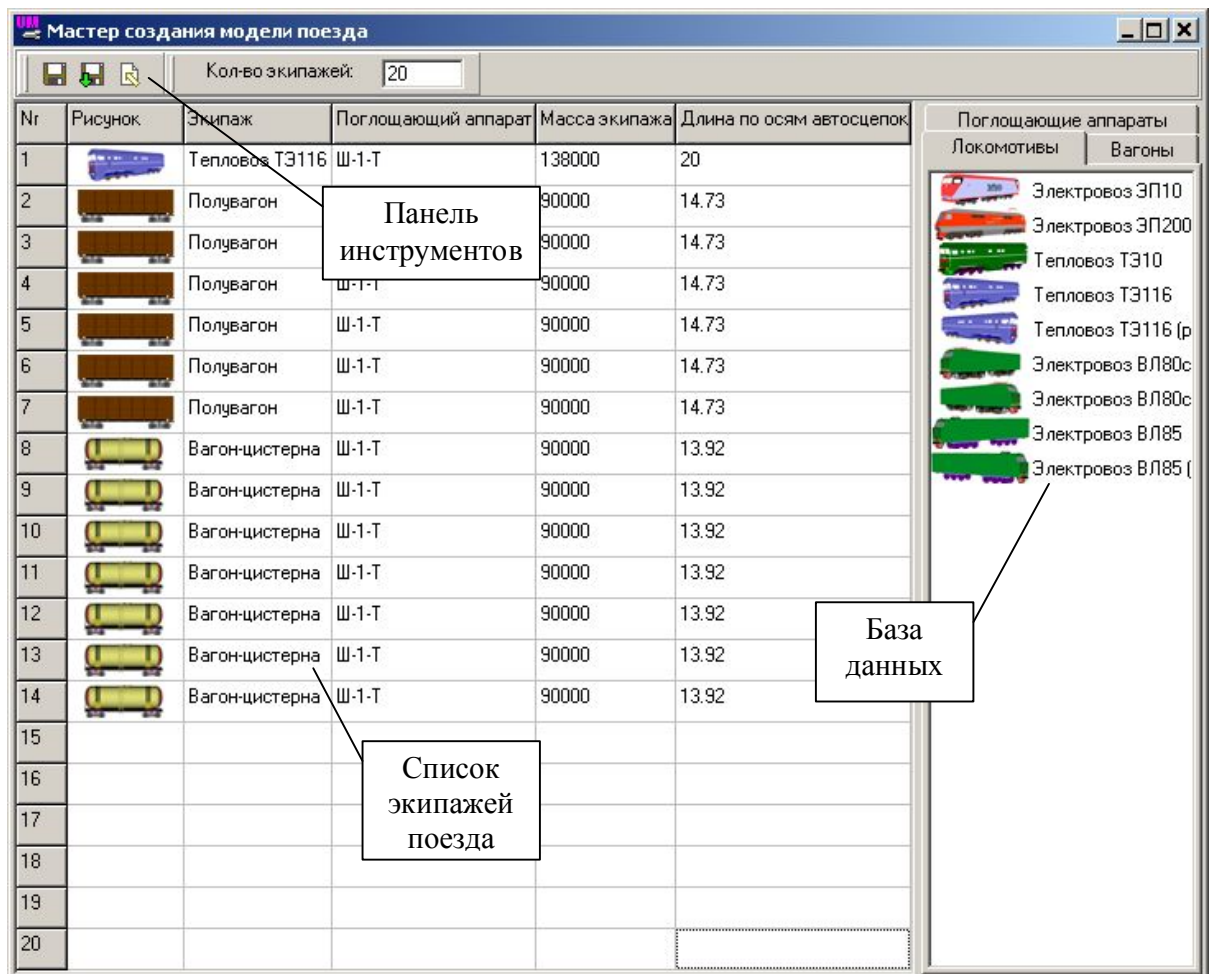
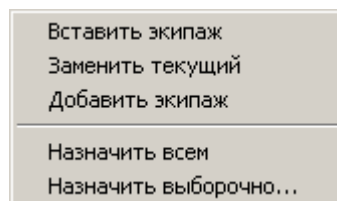


Рис. 15.2. Мастер создания модели поезда

При создании модели поезда исследователь с помощью мастера указывает количество единиц подвижного состава. С соответствующих закладок базы данных в правой части мастера выбираются необходимые локомотивы, вагоны и поглощающие аппараты, используемые на соответствующем экипаже.

Опишем более подробно работу с мастером. Двойной щелчок мышки на экипаже в базе данных вставляет выбранный экипаж в текущую позицию в списке экипажей поезда. Рассмотрим команды контекстного меню базы данных:



- **Вставить экипаж** – вставляет выбранный в базе экипаж в текущую позицию в списке экипажей поезда (аналогично двойному щелчку мышкой),
- **Заменить текущий** – заменяет текущий экипаж в списке экипажей поезда выбранным в базе,
- **Добавить экипаж** – добавляет экипаж в конец списка экипажей поезда,
- **Назначить всем** – назначить выбранный экипаж всем экипажам поезда,
- **Назначить выборочно** – выбрать из списка экипажи, которым назначить выбранный в базе (по умолчанию отмечены «пустые» экипажи – экипажи, которым не назначен ни один экипаж из базы данных), рис.15.3 .

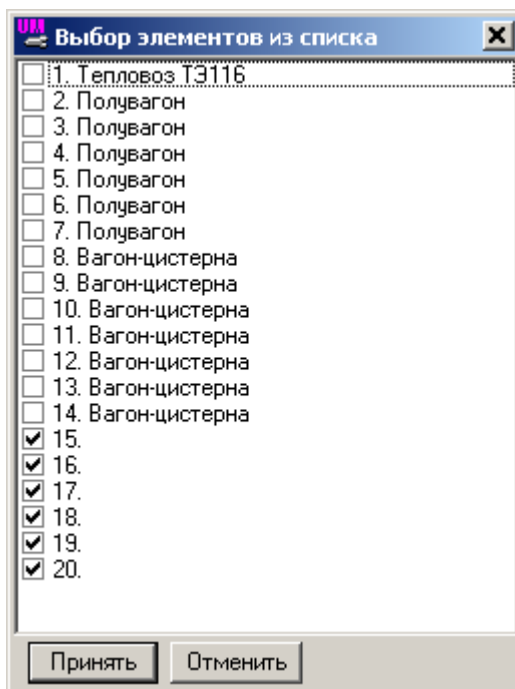





Рис. 15.3. Список экипажей поезда для пункта меню **Назначить выборочно**

После того, как модель поезда готова, необходимо либо открыть ее в новом объекте, либо сохранить. Для того чтобы открыть модель в новом объекте нажмите кнопку  на панели инструментов.

Для сохранения выберите кнопку **Сохранить**  или **Сохранить как...**  при необходимости дать модели новое имя. Далее сохраненную модель необходимо открыть в программе ввода **UM Input**, внести при необходимости изменения в модель и откомпилировать ее.

Далее рассмотрим более подробно модели экипажей из базы данных и процесс создания модели и добавления ее в базу данных.

15.3.1. Модель экипажа

База экипажей может быть дополнена моделью любого экипажа. Для этого в самом простом случае достаточно создать графический образ экипажа, задать обязательные идентификаторы (длину по осям автосцепок, массу экипажа и т.д.), тяговые характеристики для локомотивов, а также при необходимости силы, специфичные для данного экипажа. Каждая единица подвижного состава в терминах ПК УМ представляет собой подсистему, которая, вообще говоря, может быть моделью любой сложности. Несмотря на то, что в большинстве случаев достаточно одномассовой модели экипажа, в железнодорожный состав может быть включена, например, уточненная модель грузового вагона с трехэлементными тележками или модель трехвагонного сцепа для более подробного анализа динамики отдельного экипажа в поезде.

База данных находится в каталоге `[UM]\Bin\RW\Train`. Этот каталог содержит следующие подкаталоги:

- `..\Absorbers` – каталог для хранения моделей поглощающих аппаратов;
- `..\Brakes` – каталог для хранения моделей тормозных систем;
- `..\Cars` – каталог для хранения моделей вагонов;
- `..\Liquid` – каталог для хранения моделей наливных цистерн;
- `..\Locomotives` – каталог для хранения моделей локомотивов;
- `..\Resistance` – каталог для хранения моделей сил основного сопротивления движению.

Рассмотрим модель железнодорожного экипажа из базы на примере модели тепловоза ТЭ10, рис. 15.4, которая представляет собой одномассовую систему с одной степенью свободы – перемещение вдоль пути.

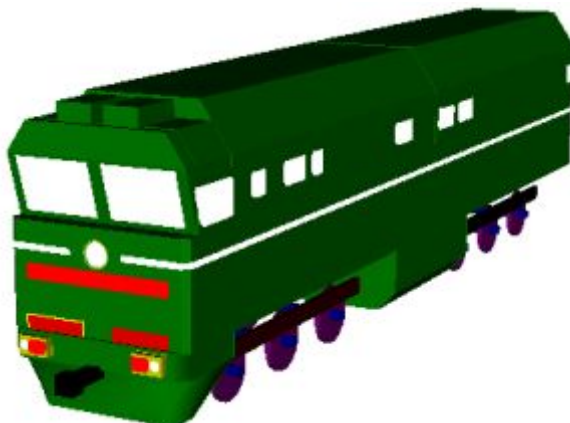


Рис. 15.4. Общий вид модели тепловоза ТЭ10

Модель состоит из одного тела с именем *Vehicle*, одного графического образа – *Локомотив*, поступательного шарнира – *jVehicle* и одной биполярной силы – *RearCoupling*.

Параметры тела *Vehicle*, который представляет собой кузов экипажа, показаны на рис. 15.5. Тело с именем *Vehicle* должно обязательно присутствовать в модели. Здесь в инерционных параметрах задан только масса, так как у тела нет вращательных степеней свободы. Масса задана с помощью обязательного для модели экипажа идентификатора *Mass*, см. п. 15.3.2.

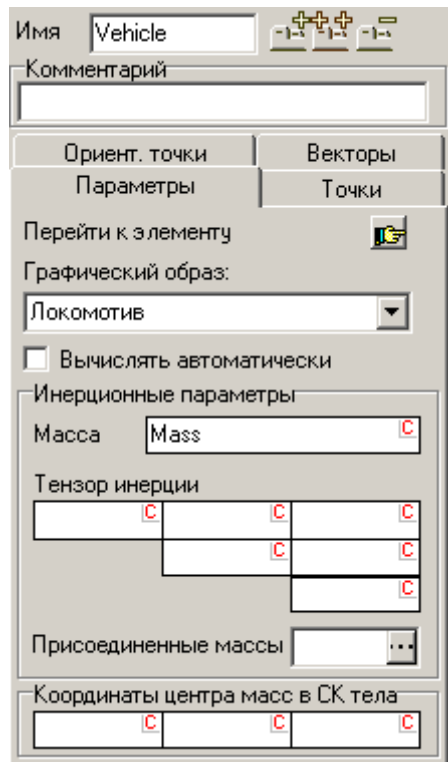


Рис. 15.5. Параметры тела *Vehicle*

Каждая модель экипажа должна иметь как минимум две точки связи на теле *Vehicle*, которые указывают места прикрепления автосцепок, рис. 15.6. По умолчанию используется передняя точка прикрепления, к которой крепится автосцепка предыдущего экипажа (обязательная биполярная сила *RearCoupling*). Передняя точка должна быть первой в списке точек связи. Удобнее задавать точки крепления, используя обязательный идентификатор *CouplingPoint*.

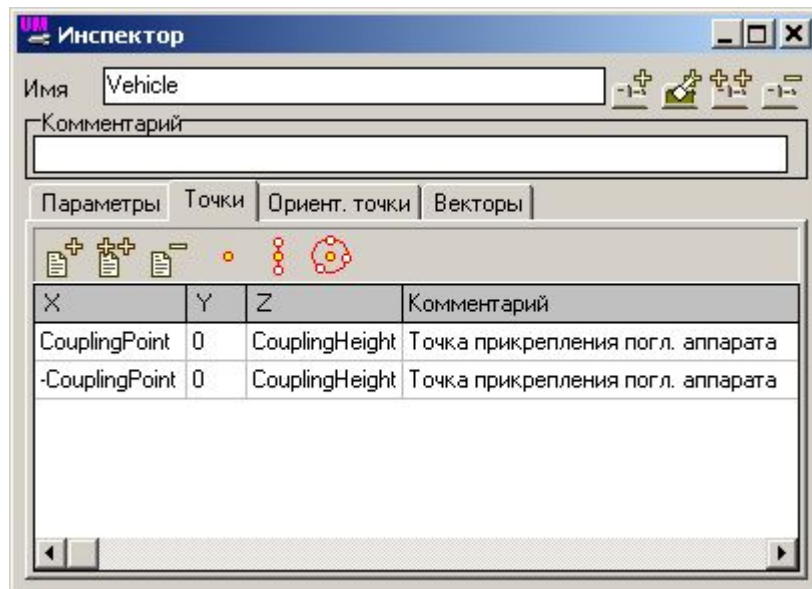


Рис. 15.6. Точки связи тела *Vehicle*

Геометрические параметры шарнира *jVehicle* представлены на рис. 15.7.

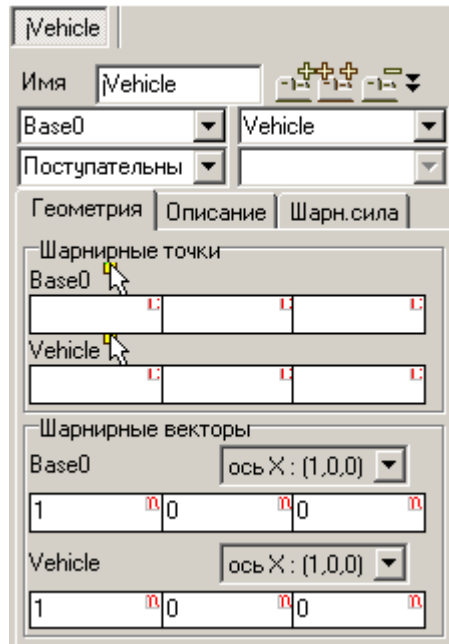


Рис. 15.7. Параметры шарнира jVehicle

Кроме того, в модель добавлена шарнирная сила *sbTraction*, моделирующая силу тяги. Это обязательный шаг для тяговой единицы.

Тип этой шарнирной силы задан как **Список характеристик**. Данный тип силы позволяет задавать зависимость силы от координаты, скорости или времени набором кривых. В данном случае, рис. 15.8, с помощью этого вида силы, используя зависимость от скорости, задано семейство тяговых кривых тепловоза ТЭ10. Поле **Идентификатор кривой** задает идентификатор, по значению которого будет выбираться кривая из списка: значение 1 обозначает первую кривую (*Curve 1*, см. рис. 15.9), 2 – вторую кривую и т.д. Присваивание нуля идентификатору обозначает нулевую силу (для локомотива – режим выбега). В примере на рис. 15.8 идентификатор *cposition* задает позицию контроллера машиниста. Присваивая ему номер кривой, можно выбирать тяговую характеристику.

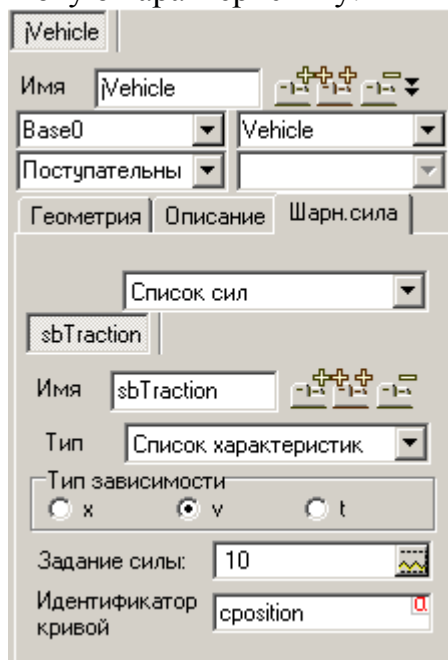


Рис. 15.8. Задание силы тяги

На рис. 15.9 показаны тяговые кривые тепловоза ТЭ10 ВЛ80. В правой нижней части рисунка представлен список кривых (*Curve1 .. Curve10*), правой верхней – список точек для текущей кривой (в данном случае для кривой *Curve1*).

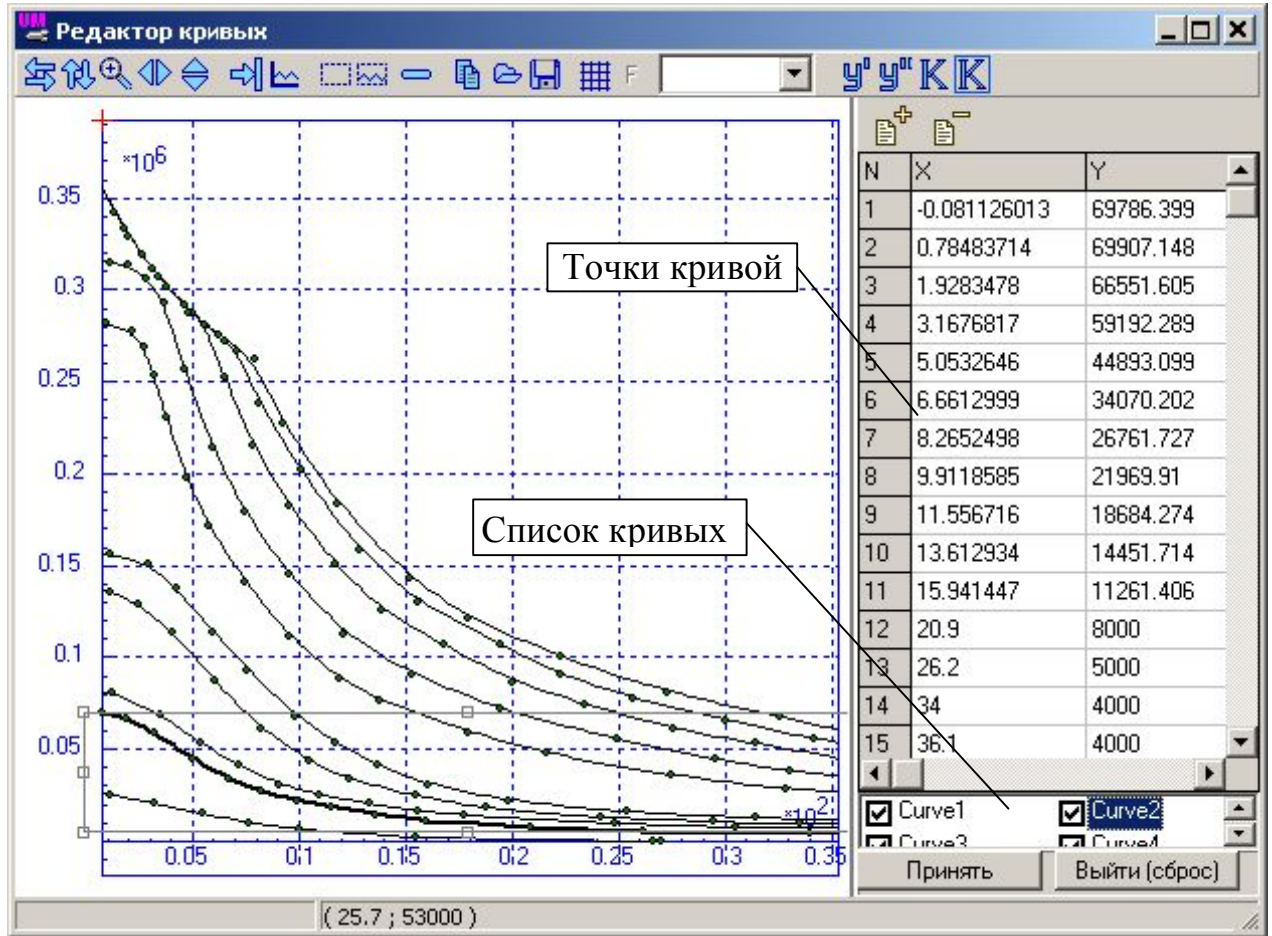


Рис. 15.9. Тяговая характеристика тепловоза

Так как для величин скоростей движения, значение которых выходят за границы абсцисс введенных точек, применяется экстраполяция, то следует доводить тяговые характеристики до ограничений (по скорости, мощности или сцеплению) либо до нуля с указанием как минимум двух точек с соответствующей ординатой (чтобы в конце кривой получился отрезок, лежащий на линии ограничений или на оси абсцисс). Это следует делать даже, если в технической характеристике кривые не доведены до ограничений или нуля, для того, чтобы избежать таких ошибок, как, например, появление отрицательной силы тяги на малых позициях контроллера машиниста при большой скорости движения, где кривая в технической характеристике уже может быть не задана, а экстраполяция даст отрицательную силу. Для примера см. модель электровоза ВЛ80с, которая находится в каталоге [UM]\Bin\RW\Train\Locomotives\VL80с. С другой стороны пользователь может вводить любые нужные ему характеристики, например, без ограничений по скорости. В этом случае необходимо внимательно следить за корректностью получаемых результатов.

В модели экипажа может быть реализована биполярная сила, моделирующая заднюю автосцепку и поглощающий аппарат для связи со следующим экипажем – *RearCoupling*, п. 15.3.3. Эта сила будет использоваться по умолчанию, если она не

будет перекрыта в **Мастере создания модели поезда** другим поглощающим аппаратом. Если сила *RearCoupling* задана в модели экипажа, то в **Мастере создания модели поезда** в столбце **Поглощающий аппарат** будет выводиться комментарий, заданный для этой силы. Если в столбце **Поглощающий аппарат** будет написано «Неизвестный погл. аппарат», то сила задана, но у нее поле **Комментарий** пустой. Если экипаж не содержит биполярную силу *RearCoupling*, то столбец **Поглощающий аппарат** для экипажа пустой, и модель поглощающего аппарата надо обязательно задать используя закладку **Поглощающие аппараты**, рис. 15.2.

Одномассовые модели вагонов аналогичны описанной модели тепловоза за исключением того, что у нее отсутствует шарнирная сила, моделирующая силу тяги.

15.3.2. Обязательные идентификаторы модели экипажа

Модели экипажей в базе данных, в том числе и модель тепловоза ТЭ10, полностью параметризованы. Приведем в табл. 1.1 идентификаторы, которые обязательно должны присутствовать в модели.

Таблица 1.1

Обязательные идентификаторы модели экипажа

Идентификатор	Описание
<i>CouplingBase</i>	Длина экипажа по осям автосцепок, м
<i>VehicleBase</i>	База экипажа, м
<i>Mass</i>	Масса экипажа, кг
<i>CouplingLength</i>	Длина одной автосцепки, м
<i>CouplingPoint</i>	Продольная координата точки крепления автосцепки к экипажу, м (вычисляется по формуле $CouplingBase/2 - CouplingLength$)

Идентификаторы *CouplingBase* и *Mass* используются в **Мастере создания поезда**, рис. 15.2: в соответствующих колонках задаются их значения. Пользователь сам должен следить за тем, чтобы в создаваемых им моделях эти идентификаторы присутствовали и правильно использовались.

В качестве примера рассмотрим, как используются эти идентификаторы в модели локомотива ТЭ10. Как уже говорилось, модель этого тепловоза состоит из одного тела – *Vehicle*. Идентификатор *Mass* задает массу именно этого тела, рис. 15.10.

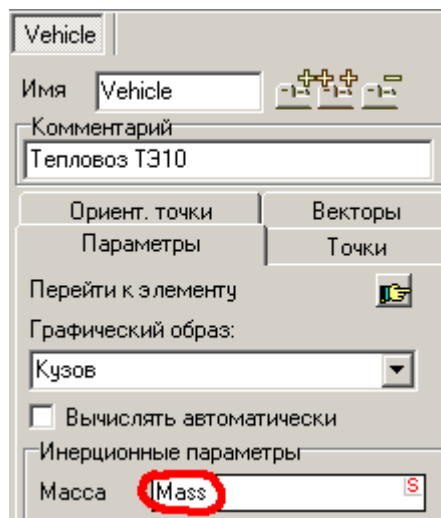


Рис. 15.10. Параметры тела Vehicle

15.3.3. Модель поглощающего аппарата

База данных поглощающих аппаратов, также как и база данных локомотивов, может дополняться. В модуле UM Train под моделью поглощающего аппарата подразумевается модель полной межвагонной связи, которая соединяет соседние вагоны (например, для грузового вагона такая модель должна включать в себя как минимум два последовательно установленных поглощающих аппарата).

В терминах ПК УМ поглощающие аппараты моделируются биполярными элементами. Как уже говорилось биполярная сила, моделирующая межвагонную связь, может быть задана непосредственно в модели экипажа (обязательно с названием *RearCoupling*). В таком случае она будет использована по умолчанию, если не будет перекрыта в **Мастере создания модели поезда**.

Рассмотрим пример создания модели межвагонной связи на примере биполярной силы типа «Упруго-2-фрикционный», см. Руководства пользователя, глава 2.

Создайте в ПК УМ новый объект. Добавьте биполярную силу. Выберите необходимый тип биполярной силы. В данном случае выберите тип «Упруго-2-фрикционный», см. рис. 15.11.

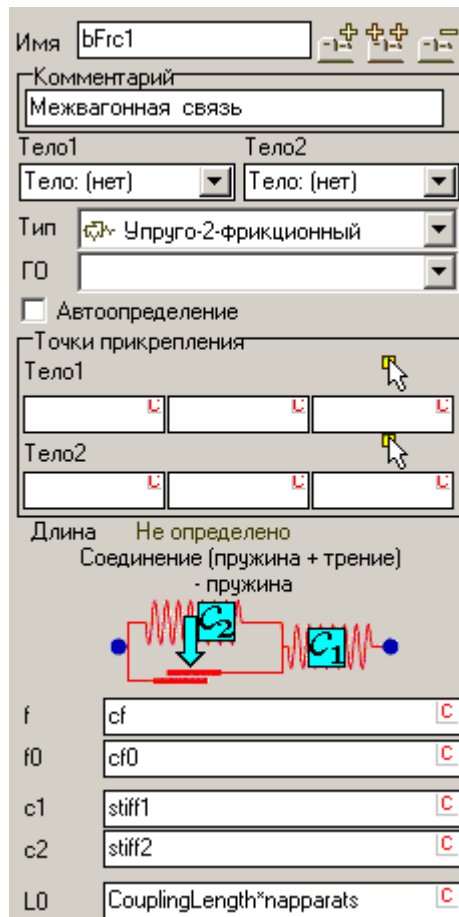


Рис. 15.11. Параметры биполярной силы

В поле **Комментарий** укажите название модели, под которым оно будет отображаться на закладке **Поглощающие аппараты** в **Мастере создания модели поезда**.

15.3.4. Модель вагона-цистерны

Для моделирования наливных поездов в базу добавлена модель вагона-цистерны *Tank_Liquid*, которая находится в каталоге *[UM]\Bin\RW\Train\Cars*. Для того чтобы модель экипажа была определена как вагон-цистерна, у него должно быть тело с именем *liquid*, моделирующее жидкость.

Модель вагона-цистерны *Tank_Liquid* является двухмассовой системой, рис. 15.12, в которой жидкость представлена грузом с приведенной массой M_l , связанным с корпусом цистерны (M_c) упруго-диссипативными силовыми элементами со следующими характеристикам: k – обобщенный коэффициент жесткости, ν – обобщенный коэффициент диссипации [1]. Коэффициент диссипации определяется по формуле: $\nu = 2\beta\sqrt{M_l k}$, где β – доля демпфирования (0,05–0,2).

Масса корпуса цистерны: $M_c = M - M_l$, где M – общая масса вагона-цистерны.

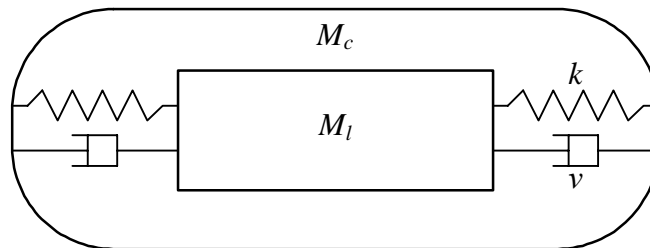


Рис. 15.12. Модель вагона-цистерны

Зависимости приведенных масс и жесткостей от уровня свободной поверхности жидкости хранятся в каталоге *[UM]\Bin\RW\Train\Liquid* в файлах с расширением *lqd*. В файле *TankCar4Axle.lqd* находится зависимость, взятая из [1], рис. 15.13.

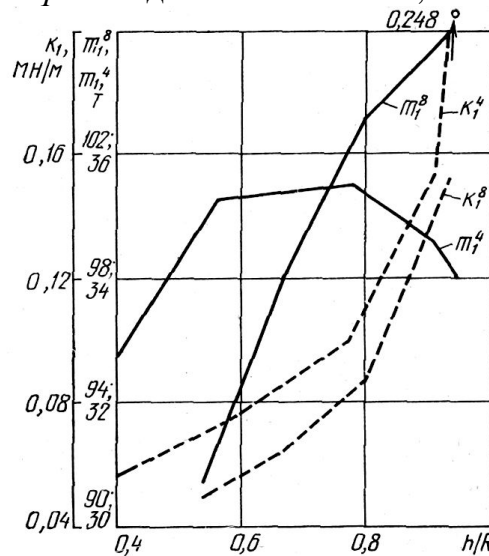



Рис. 15.13. Зависимость приведенных масс (m_l^4 и m_l^8) и жесткостей (k_l^4 и k_l^8) соответственно для четырехосной и восьмиосной цистерн от уровня свободной поверхности жидкости:
 h – наименьшее расстояние от поверхности невозмущенной жидкости до продольной оси геометрической симметрии бака цистерны; R – радиус цилиндрической части бака.

15.4. Моделирование продольной динамики поезда

После того как модель поезда собрана с помощью **Мастера создания поезда** и откомпилирована в программе ввода **UMInput**, можно приступить к следующему этапу – исследованию динамики поезда в программе моделирования **UMSimul**. Для этого запустите файл *UMSimul.exe* и с помощью пункта меню **Открыть** или кнопки  откройте модель поезда.

15.4.1. Инспектор моделирования поезда

В инспекторе моделирования объекта для моделей поезда добавляется еще одна закладка **Поезд**, рис. 15.14. На этой закладке располагается ещё несколько закладок:

- **Настройки** – общие настройки модели поезда,
- **Тяга** – настройка режимов тяги,
- **Торможение** – настройка тормозной системы,
- **Инструменты** – инструменты подготовки данных для задания режимов тяги,

На закладке **Настройки** располагаются закладки **Путь**, **Соппротивление**, **Положение экипажей**, **Наливной состав**, **Идентификация**, рис. 15.14.

Опишем эти закладки:

Закладка **Путь** позволяет устанавливать параметры пути, подробнее см. п.15.4.2

На закладке **Соппротивление** задаются силы основного сопротивления движению поезда и дополнительное сопротивление при движении в кривой, подробнее см. п. 15.4.3

На закладке **Положение экипажей** задается положение первого экипажа и положение трехмерных моделей экипажей (модуль UM Train 3D), см. п. 15.4.5

Закладка **Наливной состав** доступна, если в модели поезда присутствуют наливные цистерны. На этой закладке настраиваются модели продольных колебаний цистерны с жидкостью, подробнее см. п. 15.4.7.

На закладке **Идентификация** для тяговых единиц указываются идентификаторы, задающие позиции контроллера машиниста, подробнее см. п. 15.4.8.2

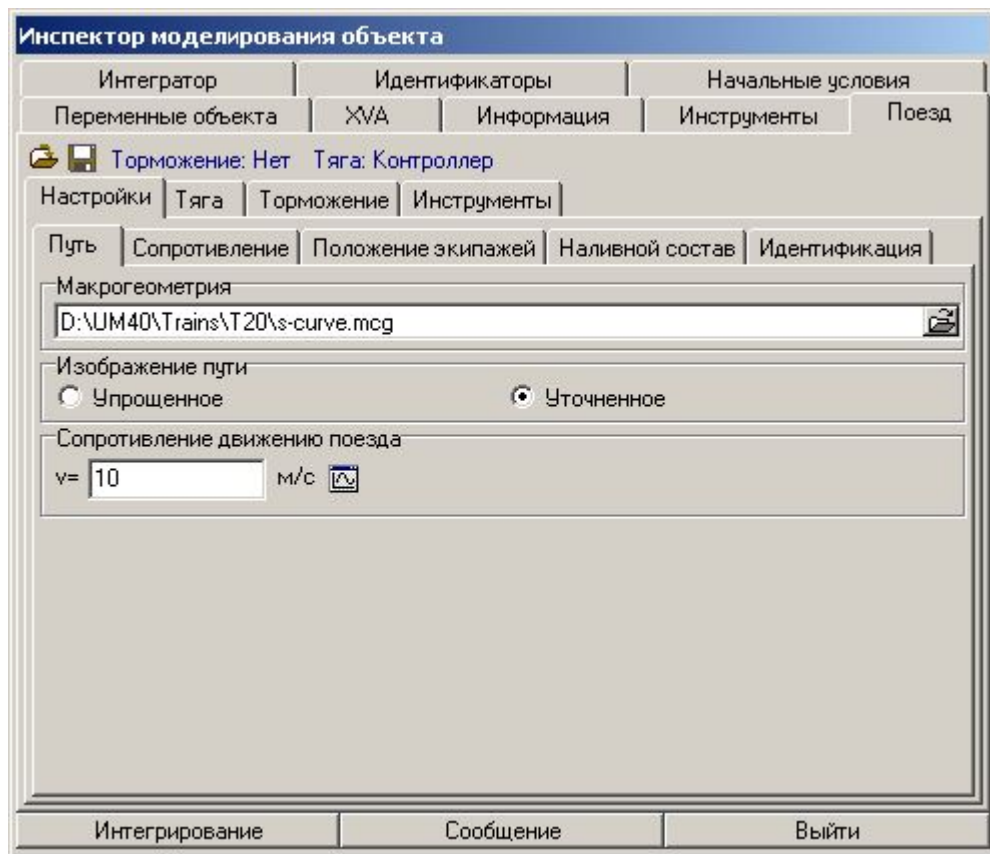


Рис. 15.14. Инспектор моделирования

15.4.2. Настройка параметров пути

Параметры железнодорожного пути, по которому движется поезд, настраиваются на закладке **Путь**, рис. 15.14.

- **Макрогеометрия** – подгрузить файл с вертикальным и горизонтальным профилем железнодорожного пути. Подробное описание окна создания макрогеометрии пути находится в **Главе 8** п. 8.5.1.3 **Создание файла макрогеометрии**.
- **Изображение пути** – задание режима отображения ж.-д. пути в анимационном окне: упрощенный или уточненный.
- **Суммарное сопротивление вдоль пути** – позволяет для заданной скорости получить график сопротивления движению поезда для текущего файла макрогеометрии пути. На рис. 15.15 показан пример расчета сил сопротивления для поезда, состоящего из 62 груженых вагонов, в S-образной кривой на скорости 10 м/с.

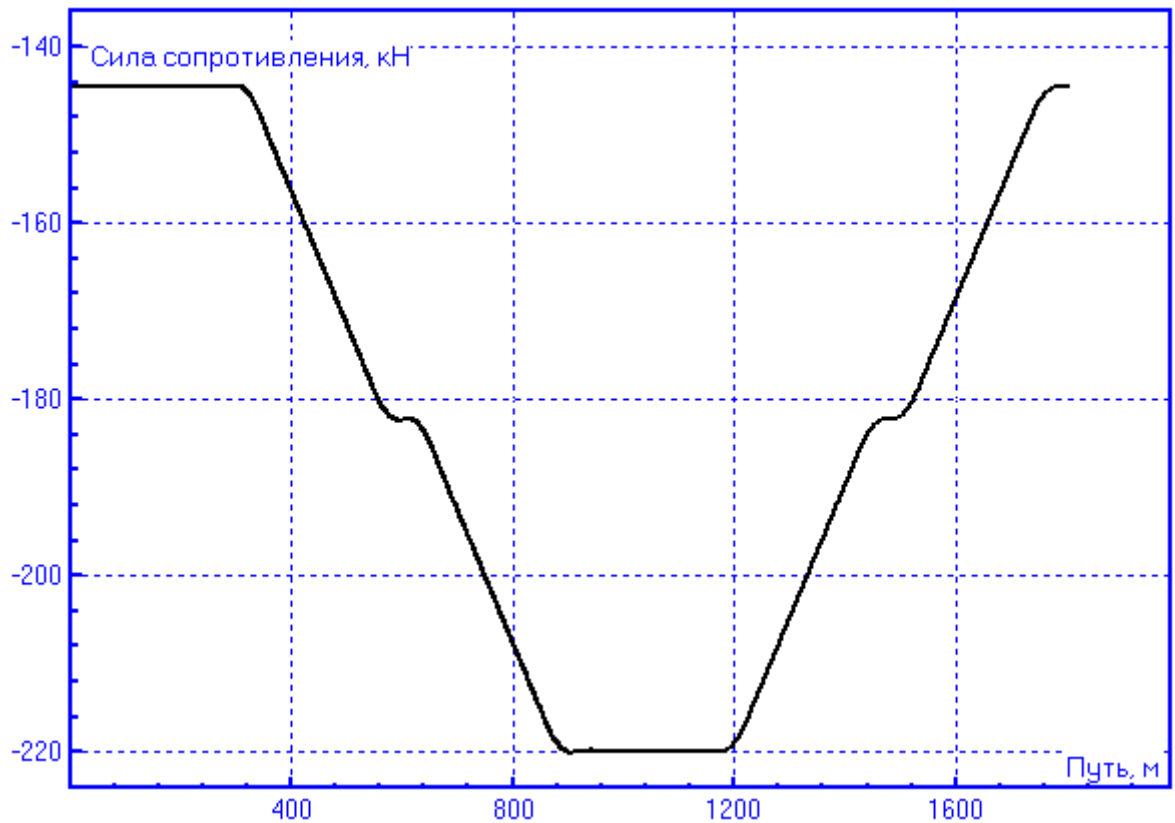


Рис. 15.15. График силы сопротивления движению поезда

15.4.3. Силы сопротивления движению

Силы сопротивления поезда это внешние неуправляемые силы, направленные против движения поезда. Как правило, силы сопротивления движения разделяют на силы основного сопротивления и дополнительного.

Силы основного сопротивления действуют постоянно при движении поезда. К их составляющим относятся: силы трения в подшипниках, сила трения качения колес по рельсам, сила сопротивления воздушной среды и т.п.

Силы основного сопротивления для каждого экипажа поезда задаются на закладке **Сопротивление | Основное**, рис. 15.16.

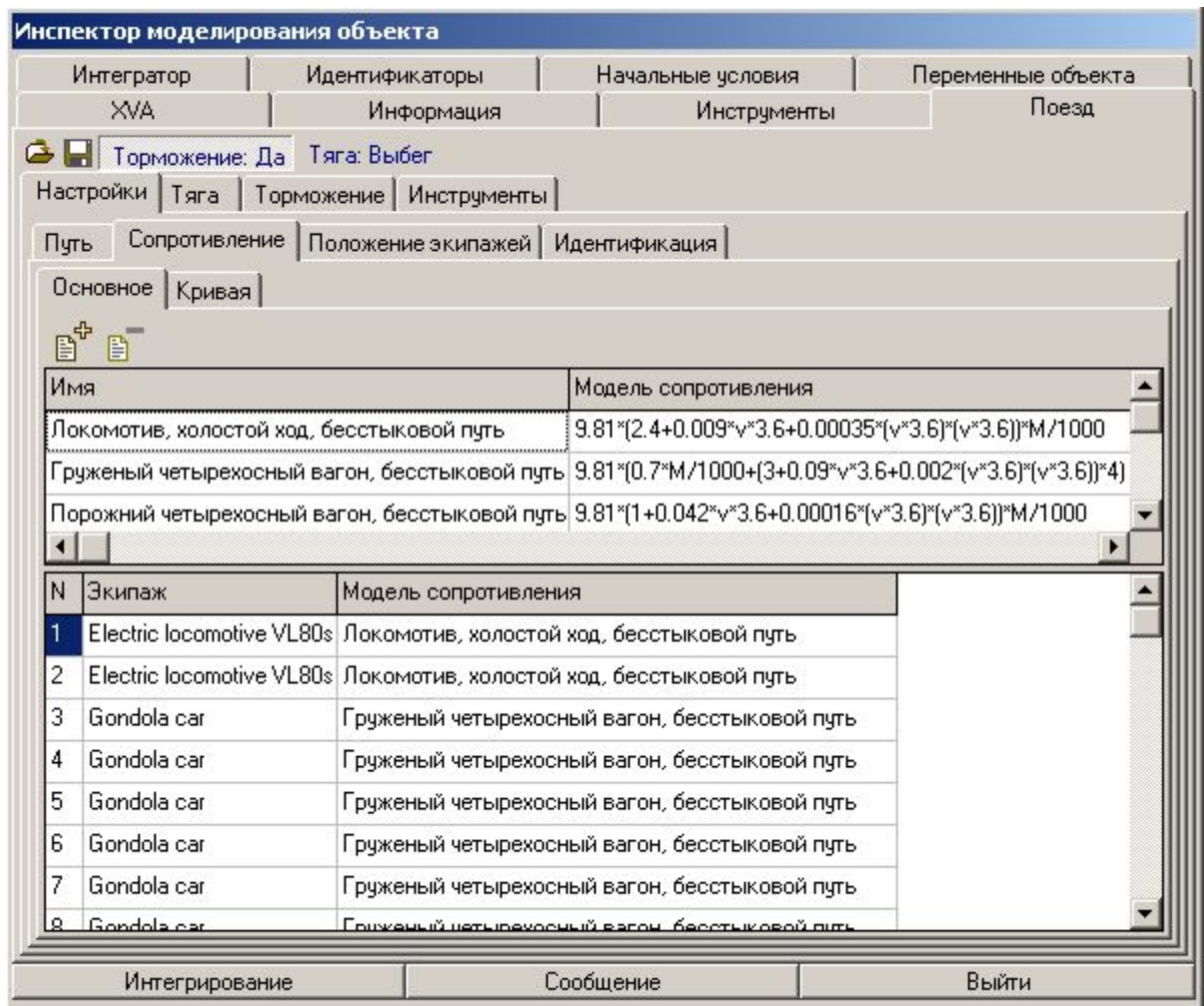




Рис. 15.16. Задание сил основного сопротивления движению

На это закладке расположены два списка. Верхний список (список загруженных моделей сил) содержит загруженные для данной модели поезда модели сил основного сопротивления. С помощью кнопок  и  можно соответственно добавить или удалить модель силы сопротивления. Нижний список (список назначения моделей сил) содержит список экипажей поезда и назначенные им модели из верхнего списка.

Для задания экипажу модели сил из списка загруженных моделей используется двойной щелчок мыши на поле **Модель сопротивления** соответствующего экипажа. Каждый щелчок перебирает модели из верхнего списка. Кроме того, если выбрать команду контекстного меню **Назначить всем** для модели из верхнего списка, то всем экипажам будет задана соответствующая модель.

В модуле существуют 4 стандартные модели сил основного сопротивления [2] для движения по стыковому пути, которые всегда присутствуют в списке загруженных моделей сил и не могут быть удалены из него:

- **Локомотив** – сила основного сопротивления электровозов и тепловозов:

$$W'_0 = 9.81(2.4 + 0,009v \cdot 3.6 + 0,00035(v \cdot 3.6)^2)M / 1000, \text{ Н},$$

где v – скорость движения, м/с,

M – масса экипажа, кг.

- **Груженный вагон** – сила основного сопротивления груженных четырехосных вагонов на роликовых подшипниках и вагонов рефрижераторных поездов в составе поезда:

$$W_o'' = 9.81(0.7M / 1000 + (3 + 0.09v \cdot 3.6 + 0,002(v \cdot 3.6)^2) \cdot 4), \text{ Н.}$$

- **Порожний вагон** – сила основного сопротивления порожних четырехосных и шестиосных вагонов на роликовых подшипниках:

$$W_o'' = 9.81(1 + 0,042v \cdot 3.6 + 0,00016(v \cdot 3.6)^2)M / 1000, \text{ Н.}$$

- **Пассажирский вагон** – сила основного сопротивления пассажирских цельнометаллических вагонов на роликовых подшипниках для скоростей движения до 160 км/ч:

$$W_o'' = 9.81(0.7M / 1000 + (8 + 0,16v \cdot 3.6 + 0,0023(v \cdot 3.6)^2)4), \text{ Н.}$$

По умолчанию при первом открытии модели поезда тяговым единицам назначается модель сил сопротивления **Локомотив**, вагонам – **Груженный вагон**.

С помощью инструмента, входящего в состав модуля, можно задать модель сил основного сопротивления следующего вида:

$$W_o = W_o(m, x, v, t),$$

где W_o – сила сопротивления, Н;

m – масса экипажа, кг;

x – пройденный путь, м;

v – скорость движения, м/с;

t – время, с.

Для открытия инструмента необходимо выбрать команду меню **Инструменты | Поезд | Силы сопротивления...** Общий вид окна задания силы основного сопротивления показан на рис. 15.17, где в качестве примера введена сила основного сопротивления локомотива на бесстыковом пути.

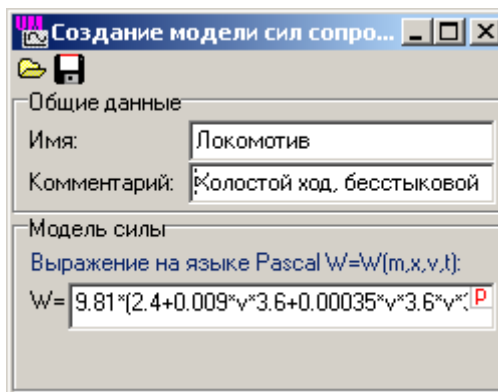


Рис. 15.17. Создание модели силы основного сопротивления движению

15.4.4. Силы сопротивления движению от кривой

Силы сопротивления движения от кривой задаются на закладке **Сопротивление | Кривая**, рис.15.18.

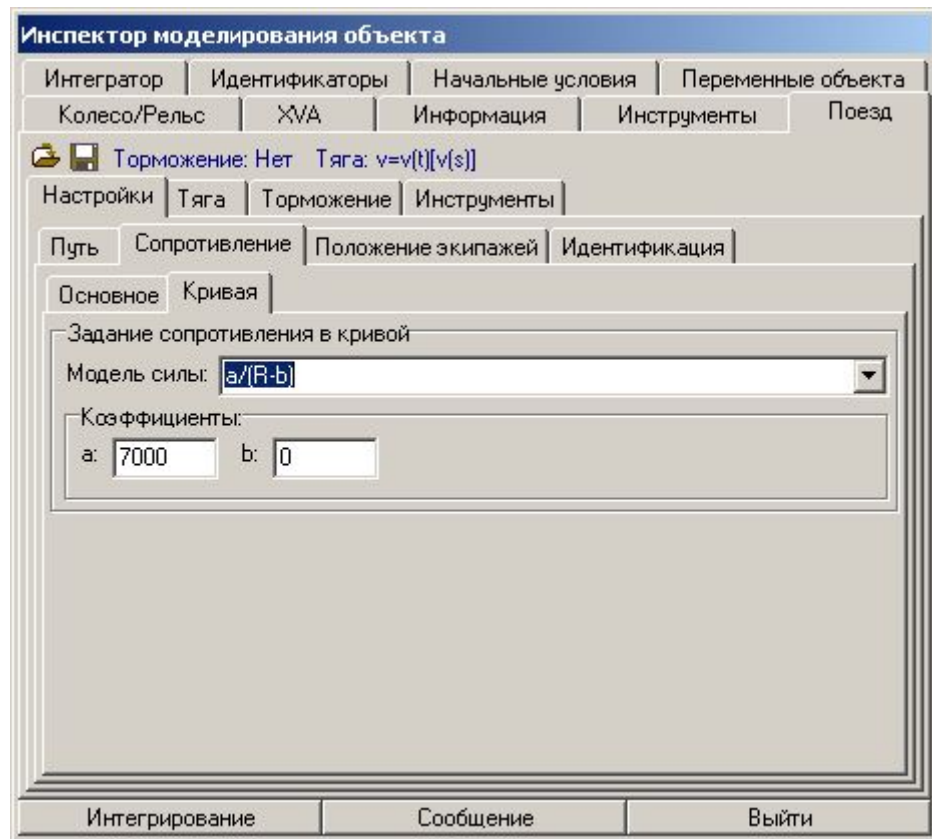


Рис. 15.18. Задание сил сопротивления движению от кривой

Доступны следующие модели сил:

- $a/(R-b)$ – формула, где R – радиус кривой, a и b – эмпирические коэффициенты (при $a = 7000$, $b = 0$ получаем зависимость из [2]);
- **без смазки, комб. смазка** – регрессионные зависимости, полученные с помощью моделей четырехосных грузовых вагонов с трехэлементными тележками, созданных на ПК УМ.

15.4.5. Положение экипажей

На закладке **Положение экипажей**, **m** задается положение первого экипажа поезда (в метрах), рис. 15.19. Задание положения первого экипажа позволяет устанавливать поезд в любом месте пути перед началом моделирования. При наличии в модели поезда трехмерных моделей существует ограничение: положение первого экипажа должно быть таким, чтобы все трехмерные модели находились на прямом участке пути (программа не позволит задать значение выше максимально допустимого по этому ограничению).

Кроме того, на этой закладке задается положение трехмерных моделей экипажей (модуль UM Train 3D).

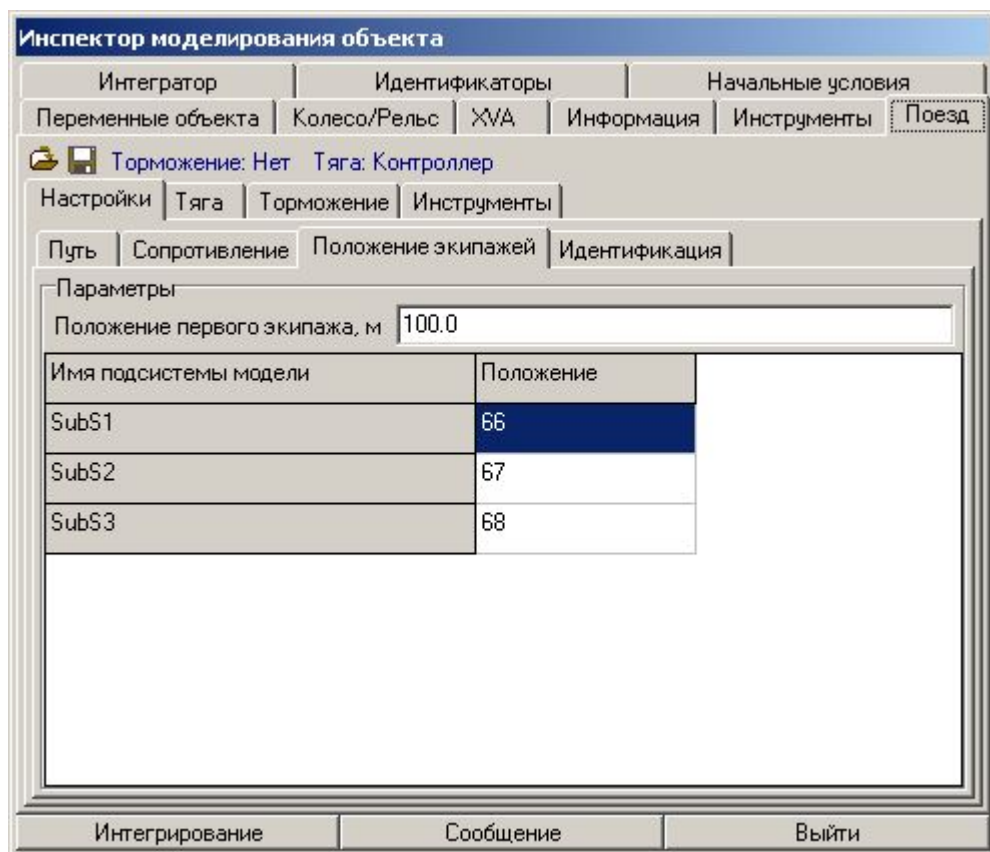


Рис. 15.19. Окно задания положения экипажей

15.4.6. Тормозное оборудование

Как правило, в поездах режимы торможения (торможение, отпуск, перекрыша и т.д.) задаются либо изменением давления в тормозной магистрали (пневматические тормоза), либо изменением напряжения в электрической системе управления (электропневматические тормоза). В таком случае на каждом экипаже установлены один или более тормозных цилиндров, изменение давления сжатого воздуха в которых в зависимости от режима торможения задает силу нажатия тормозных колодок на колесо. Сила на штоке тормозного цилиндра через систему рычагов передается на тормозные колодки, прижатие которых к колесам и реализует тормозную силу.

При создании тормозной системы поезда необходимо задать скорости волны отпуска и торможения, индикаторные диаграммы заполнения тормозных цилиндров, их количество, параметры рычажной системы, количество тормозных колодок и коэффициент трения между тормозными колодками и колесом.

Формула для определения силы торможения выглядит следующим образом:


$$F_m = f_{mp} \cdot F_n$$

где f_{mp} – коэффициент трения между колодкой и колесом, F_n – сила нажатия тормозных колодок.

Сила нажатия тормозной колодки и коэффициент трения между колодкой и колесом для каждого экипажа рассчитываются отдельно с учетом количества пар трения колодка–колесо. Для этого создаются модели коэффициента трения и силы нажатия и назначаются соответствующим экипажам в модели поезда, см. ниже.

Коэффициент трения может быть задан графиком зависимости от скорости движения или функцией силы нажатия, пройденного пути, скорости движения и времени. Модель силы нажатия задается с помощью индикаторной диаграммы заполнения тормозного цилиндра.

15.4.6.1. Создание модели коэффициента трения

Для создания модели сил нажатия необходимо с помощью пункта меню **Инструменты | Коэф. трения «колодка-колесо»** или кнопки  панели инструментов открыть окно создания коэффициента трения. В зависимости от вида задания окно может выглядеть, как показано на рис. 15.20.

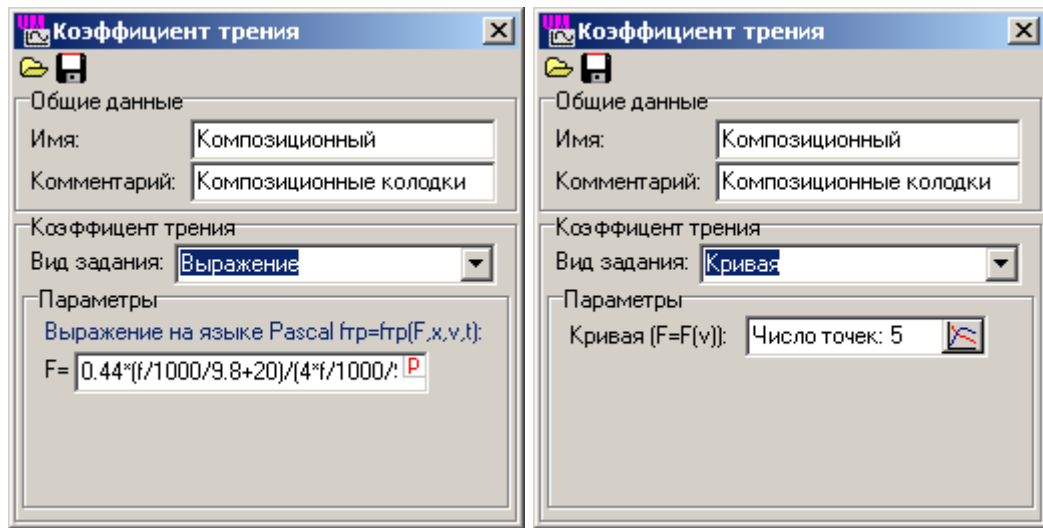


Рис. 15.20. Окно создания моделей коэффициентов трения

Модели коэффициентов трения хранятся в файлах с расширением *cf* в каталоге по умолчанию *[UM]\Bin\RW\Train\Brakes\Coefs*.

Кнопки и предназначены для открытия и сохранения модели соответственно. Поля **Имя** и **Комментарий** задают имя и комментарий для модели коэффициента трения. **Вид задания** определяет, каким образом задается коэффициент трения: **выражение** – коэффициент трения является функция силы нажатия (идентификатор – *F*), пройденного пути (*x*), скорости движения (*v*) или времени (*t*); **кривая** – коэффициент трения задается графиком в зависимости от скорости движения. Все величины задаются в системе СИ, то есть сила – в Ньютонах, пройденный путь – в метрах, скорость – в метрах в секунду, время – в секундах.

В качестве примера рассмотрим создание модели коэффициента трения между колесом и тормозной колодкой из композиционного материала. Зависимость коэффициента трения от силы нажатия и скорости движения экипажем в таком случае задается уравнением [2]:

$$f_{mp} = 0,44 \frac{F_n + 20}{4F_n + 20} \frac{v + 150}{2v + 150},$$

где F_n задается в тс, а v – в км/ч.

Чтобы задать такую формулу для коэффициента трения, выбираем вид задания **Выражение** и вводим следующую формулу, учитывая перевод величин в систему СИ:

$$f_{mp} = 0,44 * (f/1000/9.8 + 20)/(4 * f/1000/9.8 + 20) * (3.6 * v + 150)/(2 * 3.6 * v + 150).$$

Нажимаем кнопку для сохранения созданной модели. Теперь созданную модель можно назначить тормозной системе любого экипажа.

Далее покажем, как задать коэффициент трения графиком от скорости движения. Заметим, что этот способ менее удобный, так как в нем нельзя задать зависимость коэффициента трения от силы нажатия. А, как показывает практика, коэффициент трения сильно зависит от силы нажатия.

Создадим кривую зависимости коэффициента трения композиционных колодок о колеса от скорости движения при $F_n = 25,4$ кН. Для этого выберем вид зада-

ния **Кривая**. Далее нажмем кнопку , в открывшемся **Редакторе кривых** необходимо задать кривую, рис. 15.21.

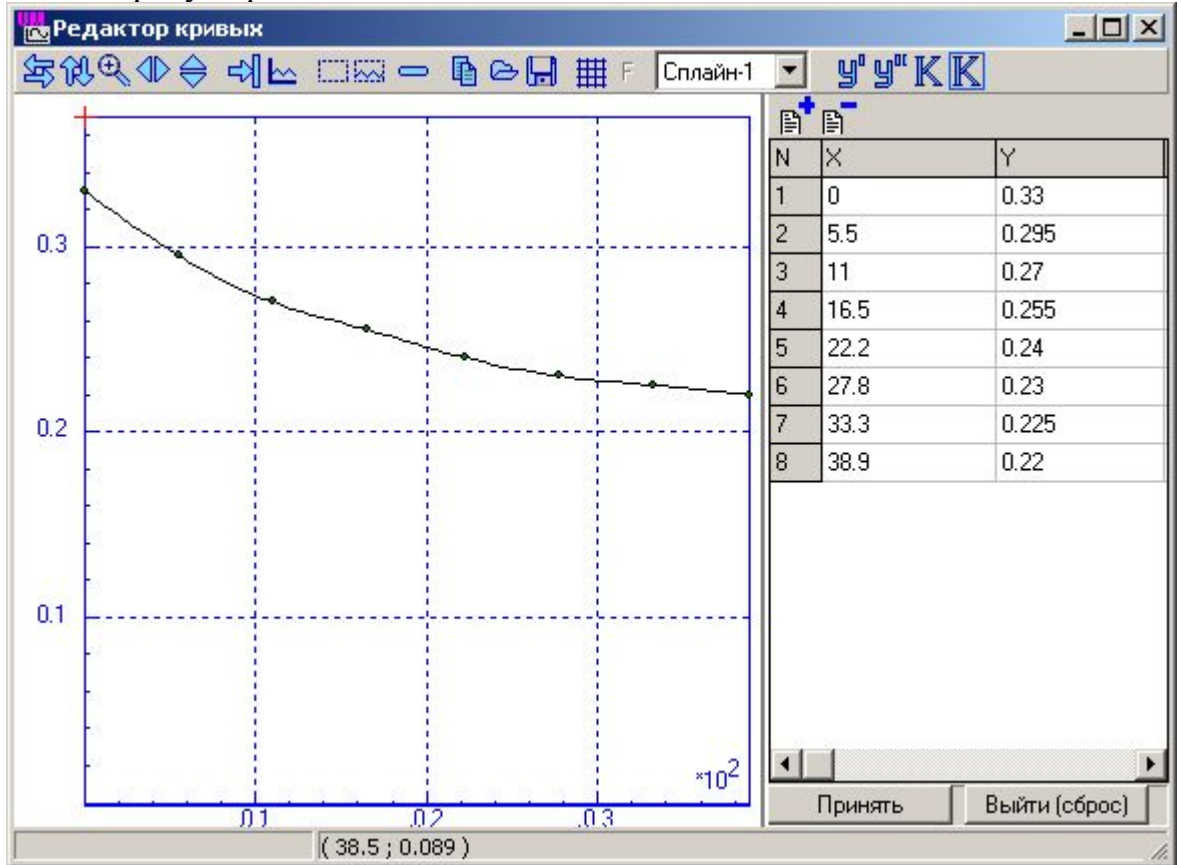



Рис. 15.21. Редактор кривых

Нажимаем кнопку **Принять** для того, чтобы назначить кривую модели коэффициента трения, и далее сохраняем модель.

15.4.6.2. Создание модели силы нажатия

Окно создания модели силы нажатия колодки на колесо открывается при помощи пункта меню **Инструменты | Сила нажатия** или кнопки  на панели инструментов, рис. 15.22.

Силы нажатия рассчитывается по следующей формуле:

$$F_n = n_{цил} i \eta (p S \eta_{ц} - F_{пр}) / m_k,$$

где $n_{цил}$ – количество тормозных цилиндров, установленных на экипаже; i – передаточное число рычажной передачи; η – к.п.д. рычажной передачи; p – давление сжатого воздуха в тормозном цилиндре, Па; S – площадь поршня тормозного цилиндра, м²; $\eta_{ц}$ – к.п.д. тормозного цилиндра; $F_{пр}$ – усилие отпускной пружины, Н; m_k – количество тормозных колодок на экипаже (число пар трения колодка–колесо).

Все указанные параметры задаются на форме задания модели сил нажатия, рис. 15.22.

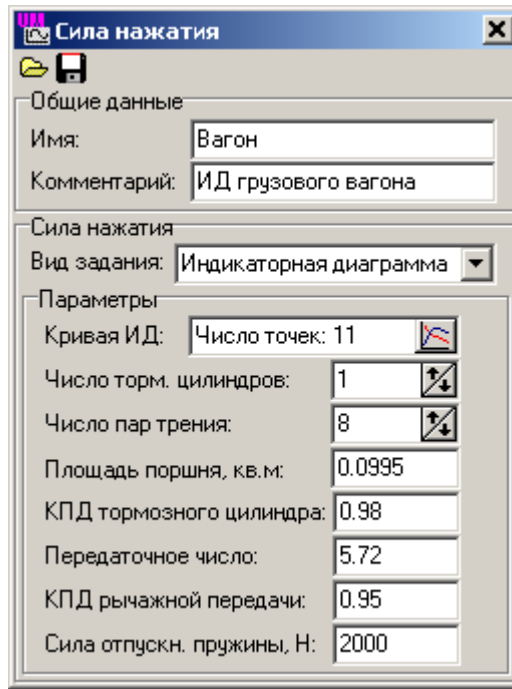


Рис. 15.22. Задание силы нажатия при помощи индикаторной диаграммы

Часто в экспериментальных исследованиях замеряют не давление в тормозном цилиндре, а непосредственно величину силы нажатия тормозной колодки на колесо. В этом случае также можно воспользоваться моделью силы нажатия, заданной индикаторной диаграммой. Например для четырехосного грузового вагона, надо установить следующие параметры: число тормозных цилиндров – $n_{цил} = 1$, число пар трения – $m_k = 8$, площадь поршня – $S = 1$, к.п.д. тормозного цилиндра – $\eta_c = 1$, передаточное число – $i = 1$, к.п.д. рычажной передачи – $\eta = 1$, сила отпускной пружины – $F_{пр} = 0$, рис. 15.23.

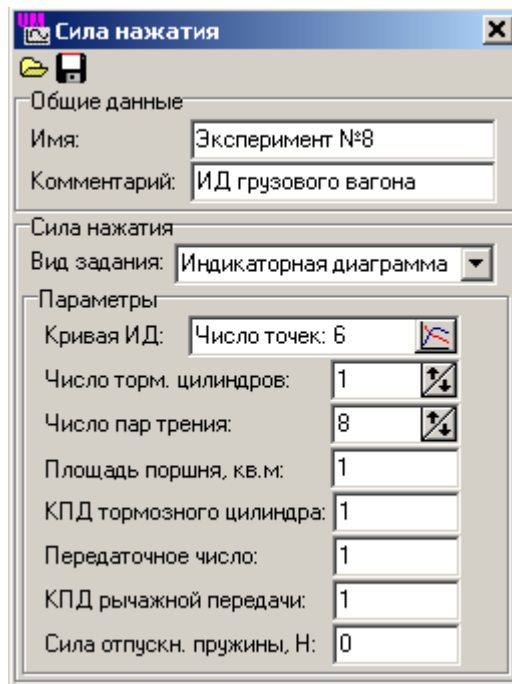


Рис. 15.23. Задание силы нажатия

Как видно, в таком случае график, заданный в индикаторной диаграмме, является графиком силы нажатия, непосредственно прикладываемой к тормозной колодке.

Модели сил нажатия, созданные с помощью описываемого окна, должны быть добавлены в список на закладке **Поезд | Торможение | Тормозное оборудование | Сила нажатия** для возможности их использования при формировании тормозной системы поезда.

Окно **Сила нажатия** используется не только для задания силы нажатия в режиме торможения, при котором давление в тормозном цилиндре растёт, но и для задания изменения силы нажатия в режиме отпуска. Для того, чтобы воспользоваться созданной моделью отпуска ее надо добавить в список на закладке **Поезд | Торможение | Тормозное оборудование | Отпуск** и назначить требуемым экипажам на закладке **Поезд | Торможение | Тормозное оборудование | Магистраль** в столбце **Отпуск**.

15.4.6.3. Формирование тормозной системы поезда

Тормозное оборудование поезда задается в инспекторе моделирования на закладке **Поезд | Торможение | Тормозное оборудование**, рис. 15.24. Группа элементов **Торможение** предназначена для задания параметров распространения волны торможения и отпуска. В соответствующих полях задаются скорости распространения волн в м/с. Если скорость распространения волны торможения непостоянна, это можно учесть, задавая участки нулевой силы соответствующей длины для экипажа в его модели силы нажатия. При этом скорость распространения волны надо не учитывать – убрать флажок **Скорость тормозной волны**.

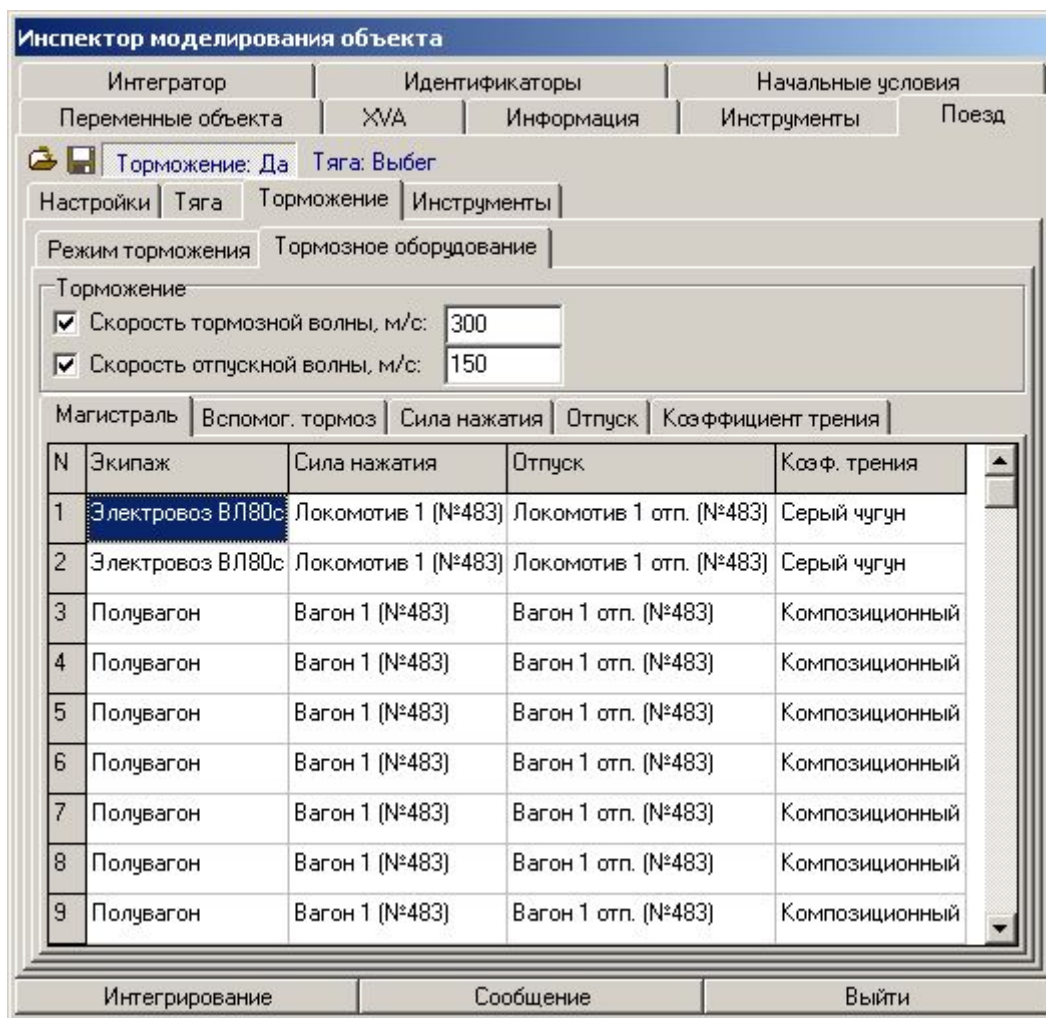


Рис. 15.24. Закладка задания тормозного оборудования

На этой закладке находятся несколько вложенных закладок:

Магистраль – эта закладка предназначена для задания параметров тормозной магистрали поезда, рис. 15.24. Здесь созданные модели сил нажатия, отпуска и коэффициентов трения назначаются экипажам поезда. Так, например, если необходимо задать режим торможения для поезда, который тянут однотипные локомотивы и все вагоны одинаковые, то для всей модели поезда достаточно создать по две модели коэффициентов трения и сил нажатия – по одной для локомотивов и вагонов. А в случае, если на всем поезде используются только композиционные колодки, то можно создать только одну модель коэффициента трения и назначить ее всем экипажам. Для изменения модели необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши в соответствующем поле. Перечисленные модели выбираются из списков, сформированных на закладках **Сила нажатия**, **Отпуск**, **Коэффициент трения**.

Вспомог. тормоз – на этой закладке задаются параметры вспомогательного тормоза локомотива. Его параметры задаются таким же образом, как и на закладке **Магистраль**.

Сила нажатия, **Отпуск** и **Коэффициент трения** – на этих закладках формируются списки, элементы которых используются при формировании тормозной системы на закладках **Магистраль** и **Вспомог. тормоз**.

Покажем порядок загрузки моделей сил нажатия, рис. 15.25. В списке моделей всегда находятся две встроенные модели: **(нет данных)** и **(интерполяция)**, которые нельзя удалить из списка. Модель **(нет данных)** выдает нулевую силу, т.е. ее необходимо применять, если ж.-д. экипаж по каким-то причинам не может реализовать тормозную силу, например, вышел из строя тормозной цилиндр. Модель **(интерполяция)** рассчитывает силу нажатия по линейной интерполяции, используя данные ближайших экипажей слева и справа, для которых назначены модели сил нажатия.

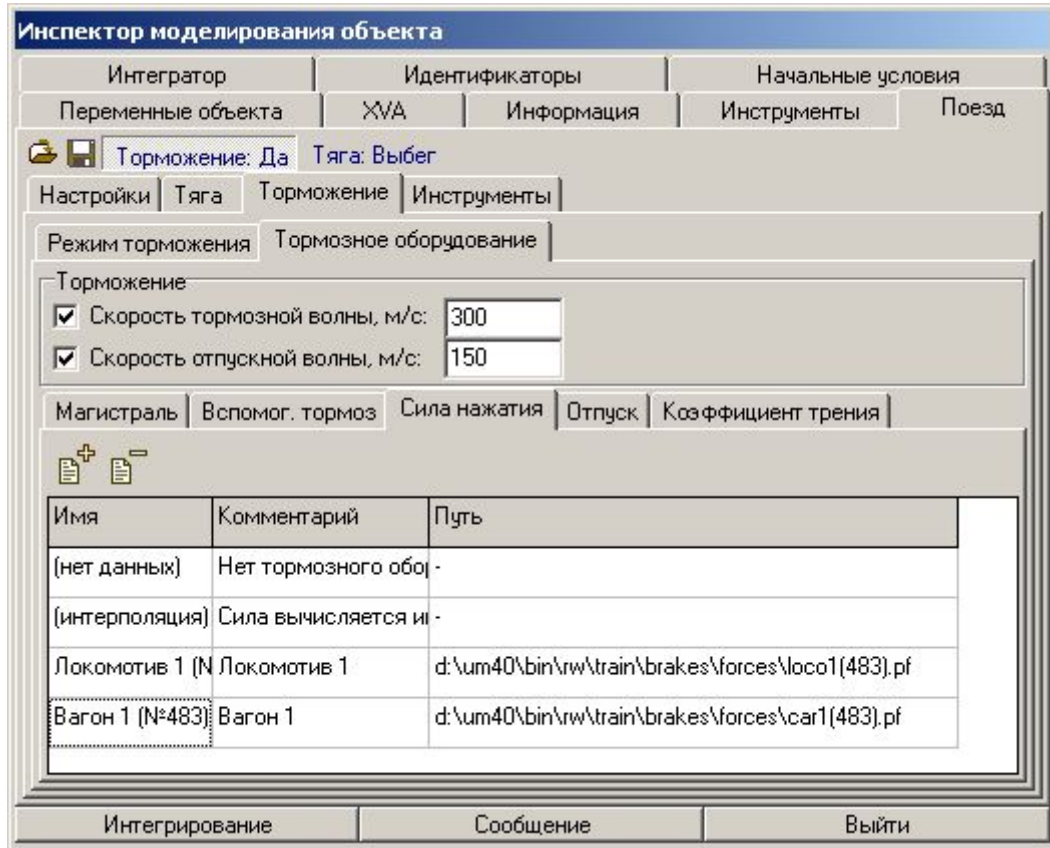


Рис. 15.25. Закладка «Сила нажатия»

Рассмотрим пример экстренного торможения поезда, состоящего из 61 грузового вагона. Модель силы нажатия примем по характеристикам из [1], где представлены экспериментальные данные по силам нажатия для 2, 12, 27, 43 и 60 вагонов для поезда из 61 вагона. В данном случае **Кривая ИД** по сути является графиком силы нажатия, то есть, принимаем остальные параметры силы нажатия как на рис. 15.23. Для второго вагона полученная кривая нажатия – сила нажатия в зависимости от времени – показана на рис. 15.26. Как видно из рисунка, в данной зависимости учитывается процесс распространения тормозной волны в главной магистрали, так как, начиная от времени $t = 0$, есть участок нулевой силы нажатия. В таком случае нет необходимости задавать скорость распространения тормозной волны, так как время начала торможения для каждого экипажа также будет вычисляться с помощью линейной интерполяции.

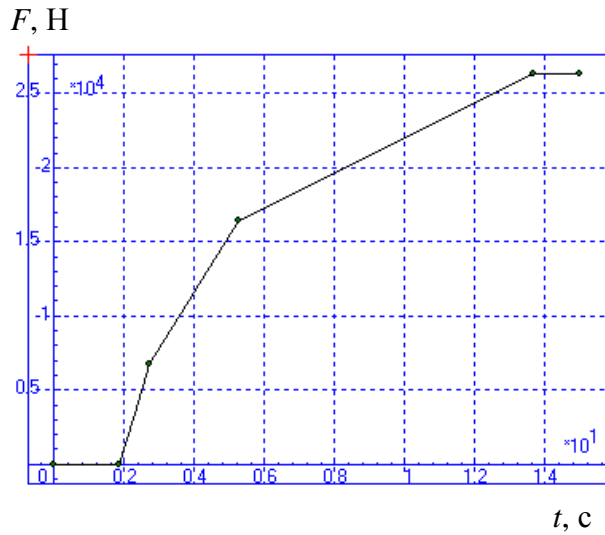


Рис. 15.26. Кривая силы нажатия для второго вагона

Для создаваемой модели поезда заданы силы нажатия с учетом времени распространения тормозной волны для 2, 12, 27, 43 и 61 вагонов в составе. На рис. 15.27 приведены графики тормозных сил для экипажей поезда с 6 по 35. Силы нажатия и время начала торможения для остальных экипажей определялась с помощью интерполяции.

Тормозные силы и силы в межвагонных соединениях (силы в автосцепках) для любого экипажа поезда доступны для вывода в графические окна. Для этого стандартным образом на закладке **Поезд** в **Мастере переменных** необходимо сформировать соответствующие переменные.

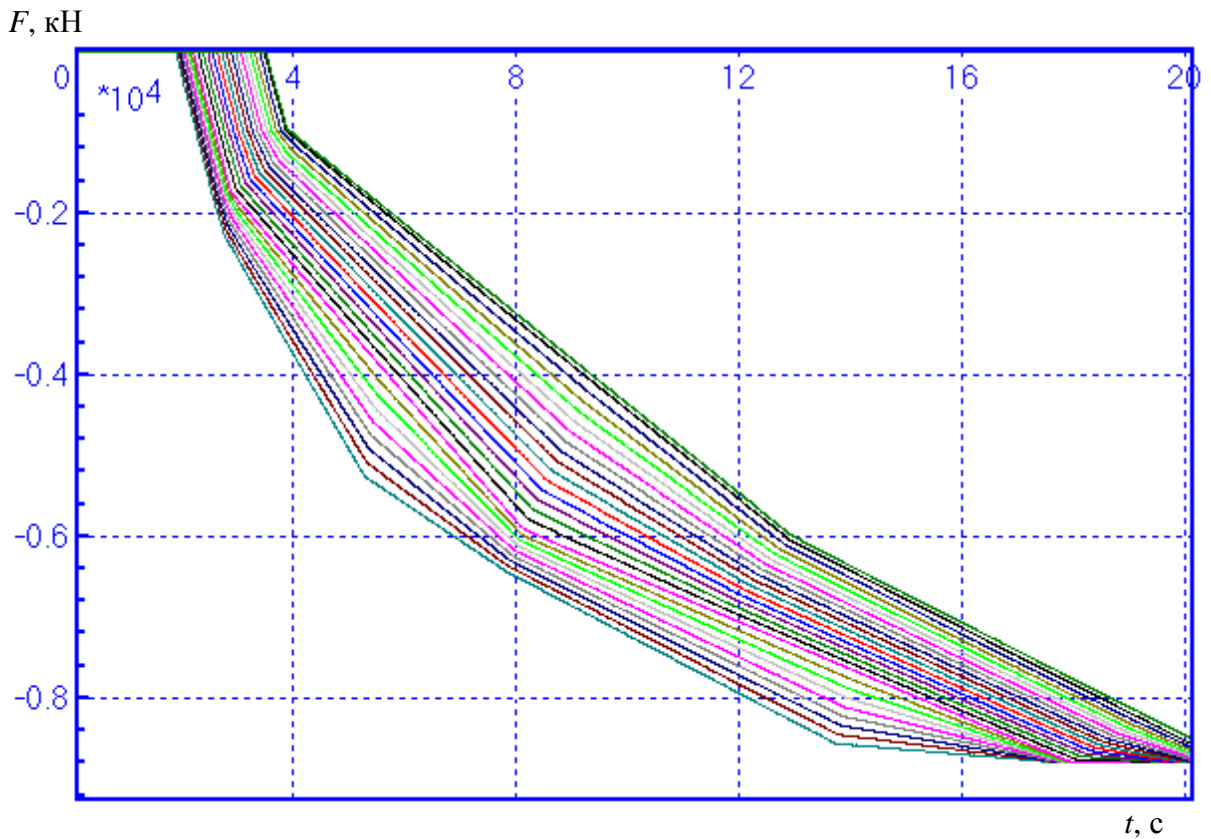


Рис. 15.27. Тормозные силы

На рис. 15.28 показана закладка настроек тормозной системы.

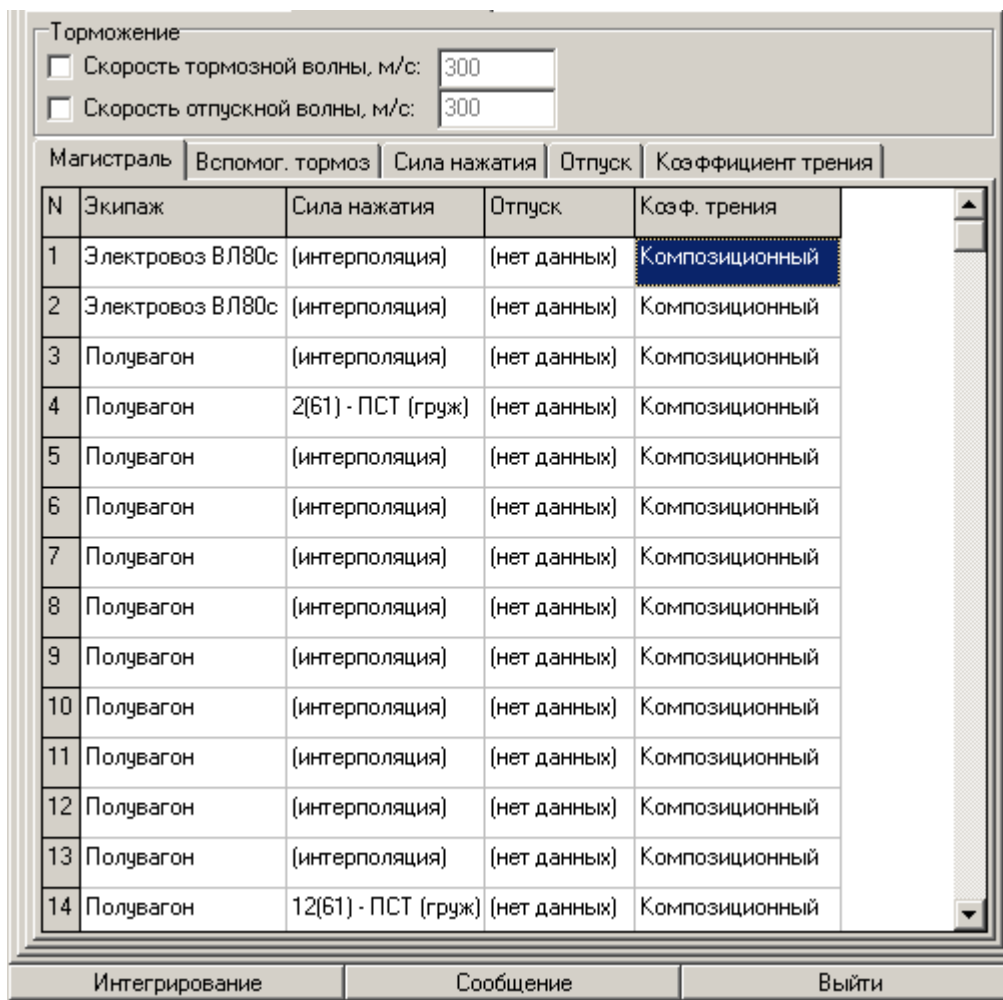



Рис. 15.28. Настройка тормозной системы

15.4.6.4. Задание режимов торможения

На закладке **Поезд | Торможение | Режим движения** задается режим торможения поезда, рис. 15.29.

Флажок **Торможение** указывает, будет ли при моделировании работать тормозная система. Этот флажок работает синхронно с кнопкой **Торможение: Да (Нет)**, расположенной вверху слева на закладке **Поезд**: нажатая кнопка (надпись на кнопке **Торможение: Да**) включает флажок, отжатая (надпись на кнопке **Торможение: Нет**) – выключает флажок, и наоборот.

С помощью кнопок  добавляются, или удаляются закладки, на которых настраиваются режимы торможения. В поле ввода **Время, с (Путь, м)** указывается момент времени в секундах (метр пройденного пути), с которого начинает работать заданный режим. В списке **Тип тормоза** выбирается типа тормоза, для которого задается данный режим: для **тормозной магистрали** поезда или **вспомогательного тормоза** локомотива.

Из списка **Режим** выбирается режим торможения. Этот список содержит три элемента: **торможение**, **отпуск** и **перекрыша**. При движении в режим **торможения** и **отпуска** может учитываться скорость распространения волны, см. п. 15.4.6.3.

На рис. 15.30 показан график сил торможения первого и последнего вагона поезда. В этом примере задан режим торможения с начала моделирования ($t = 0$ с).

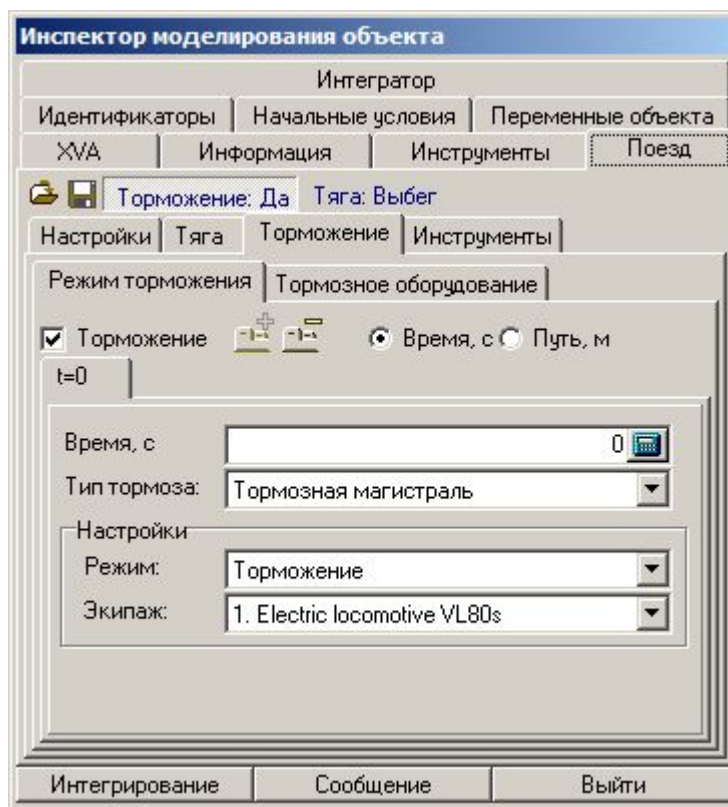


Рис. 15.29. Настройка режимов торможения

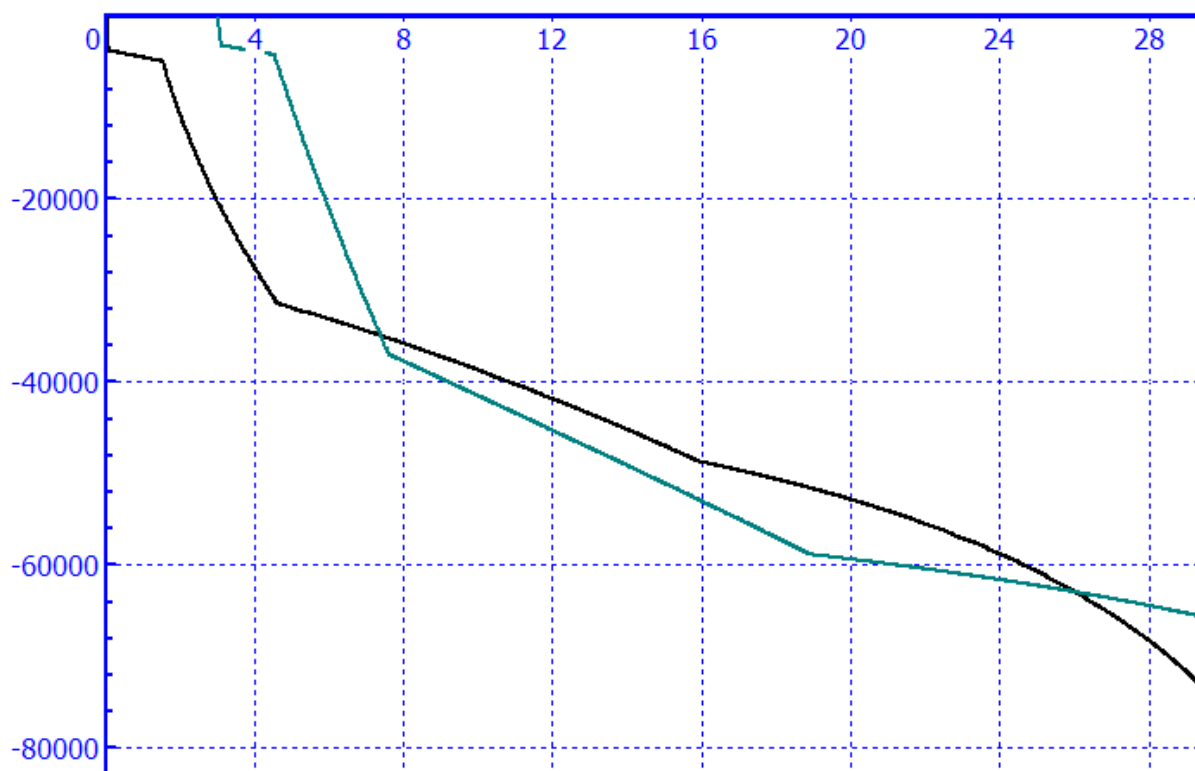




Рис. 15.30. Тормозные силы

15.4.7. Настройка параметров вагонов-цистерн

Закладка **Поезд | Настройки | Наливной состав** предназначена для задания параметров вагонов-цистерн, входящих в состав модели поезда, рис. 15.31. С помощью кнопок   добавляются модели жидкости в список **Модели параметров жидкости**, находящийся в верхней части закладки. С помощью команды контекстного меню **Назначить всем** можно всем вагонам-цистернам назначить текущую модель жидкости из списка.

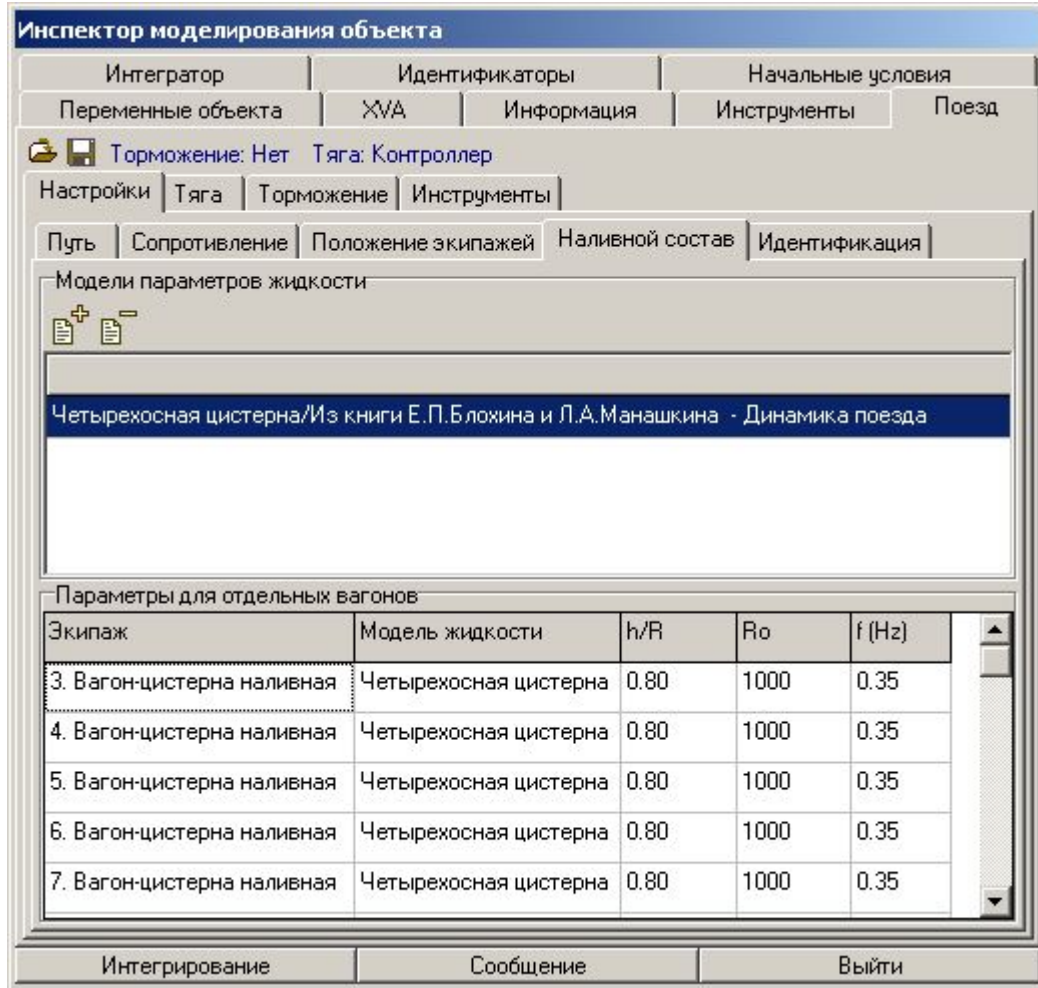


Рис. 15.31. Закладка задания параметров вагонов-цистерн

В списке **Параметры для отдельных вагонов** представлены все вагоны-цистерны, входящие в состав поезда. Двойной щелчок левой кнопки мыши в столбце **Модель жидкости** перебирает все модели из списка **Модели параметров жидкости**. В столбце **h/R** задается уровень свободной поверхности жидкости, где h – наименьшее расстояние от поверхности невозмущенной жидкости до продольной оси геометрической симметрии бака цистерны, R – радиус цилиндрической части бака. В столбец **Ro** вводится значение плотности жидкости (кг/м^3), значение по умолчанию – 1000 кг/м^3 . В столбце **f (Hz)** рассчитывается частота собственных колебаний груза, моделирующего жидкость, по введенным параметрам.

15.4.8. Задание режима тяги

Далее рассмотрим задание режима тяги поезда, которые настраиваются на закладке **Поезд | Тяга**. В программном комплексе «Универсальный механизм» существуют несколько способов задания режима тяги: по графику позиции контроллера машиниста, по графику скорости, по графику силы тяги, а также режим квазистатики с приложением постоянной силы к локомотивам, рис. 15.32. Рассмотрим эти режимы более подробно:

- **Контроллер** – задание режима тяги по графику позиции контроллера машиниста. График может быть загружен для любого из локомотивов поезда, см. п. 15.4.8.1
- **$F=F(t)[F(s)]$** – задание режима тяги по графику силы тяги. График может быть загружен для любого из локомотивов поезда, см. п. 15.4.8.1
- **$v=v(t)[v(s)]$** – задание режима тяги по графику скорости экипажа. График задается для экипажа, указанного в поле **Тяговая единица для режима задания скорости**.
- **Квазистатика** – режим, при котором к локомотивам прикладывается постоянная сила. Данный режим может применяться для расчета, сохранения и последующего использования начальных условий, например, с целью моделирования движения поезда из растянутого или сжатого состояния.

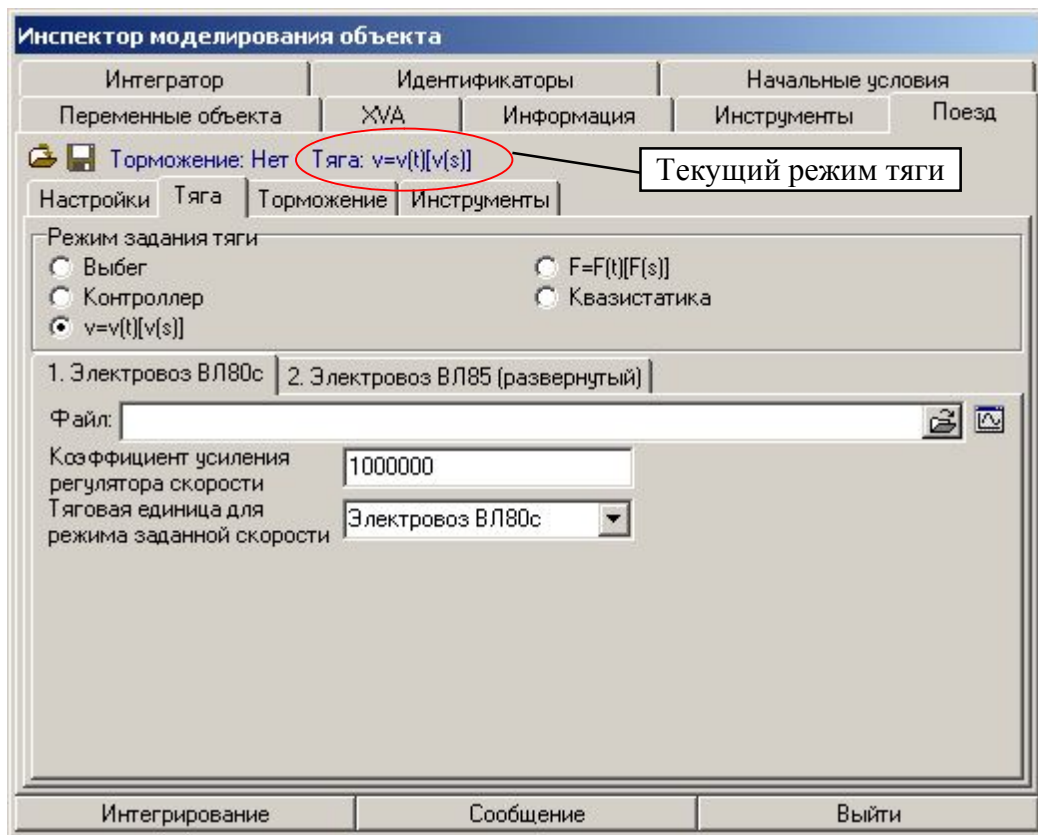


Рис. 15.32. Закладка задания режима тяги

Наверху на закладке **Поезд** выводится справочная информация с текущим режимом тяги, рис. 15.32.

15.4.8.1. Задание графиков тяги

На закладке **Поезд | Инструменты** находятся инструменты создания графиков позиции контроллера, скорости и силы тяги, рис. 15.33. На панели **Выбора инструментов** указывается вид создаваемого графика: **график позиции контроллера**, **график скорости (м/с)**, **график силы тяги (Н)** и его имя. На панели **Тип зависимости** выбирается зависимость графика от времени (в секундах) или от пути (в метрах). Ввод или редактирование графика осуществляется с помощью окна редактирования кривых, вызываемого кнопкой **...**.

При задании режима тяги графиком позиции контроллера текущее значение на графике округляется до ближайшего целого числа.

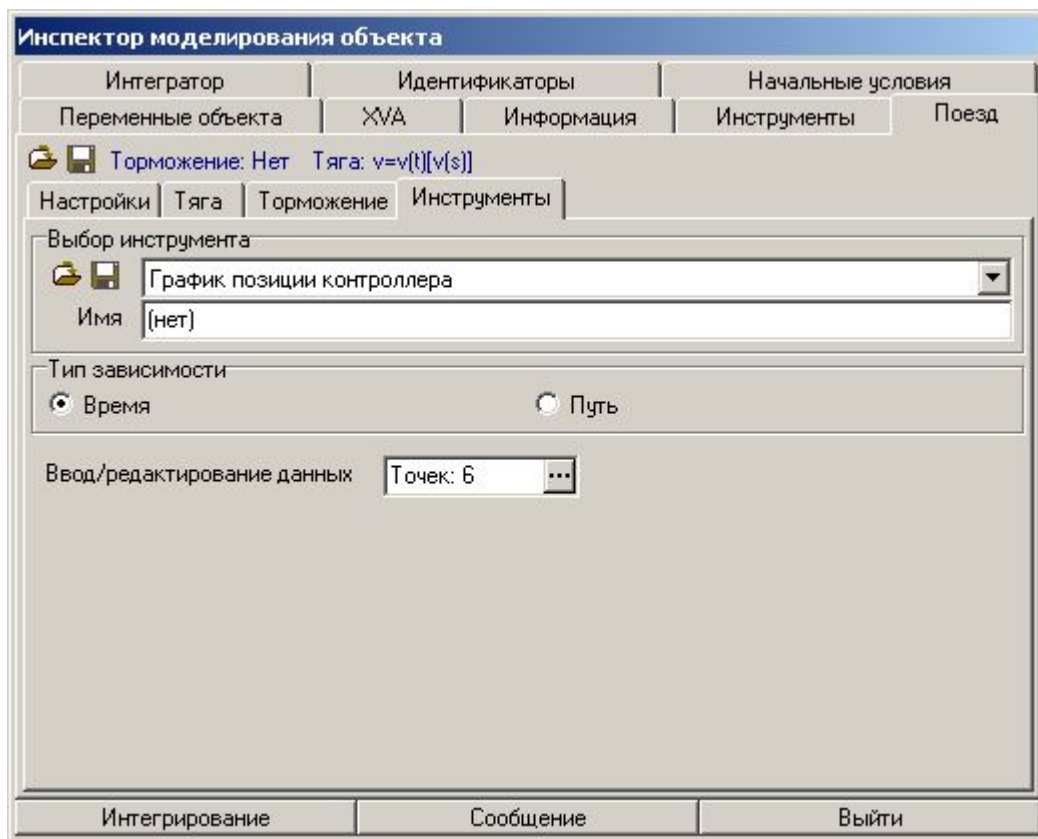


Рис. 15.33. Закладка **Инструменты**

15.4.8.2. Идентификация параметров тяги

На закладке **Поезд | Настройки | Идентификация** для каждого локомотива указывается идентификатор, который задает номер позиции контроллера машиниста, рис. 15.34. Как правило, это идентификатор *cposition*, который является идентификатором кривой в биполярном силовом элементе типа *Список характеристик*, который содержит тяговые кривые. Выбранные на этой закладке идентификаторы используются при движении в режиме тяги по позиции контроллера, см. п. 15.4.8.

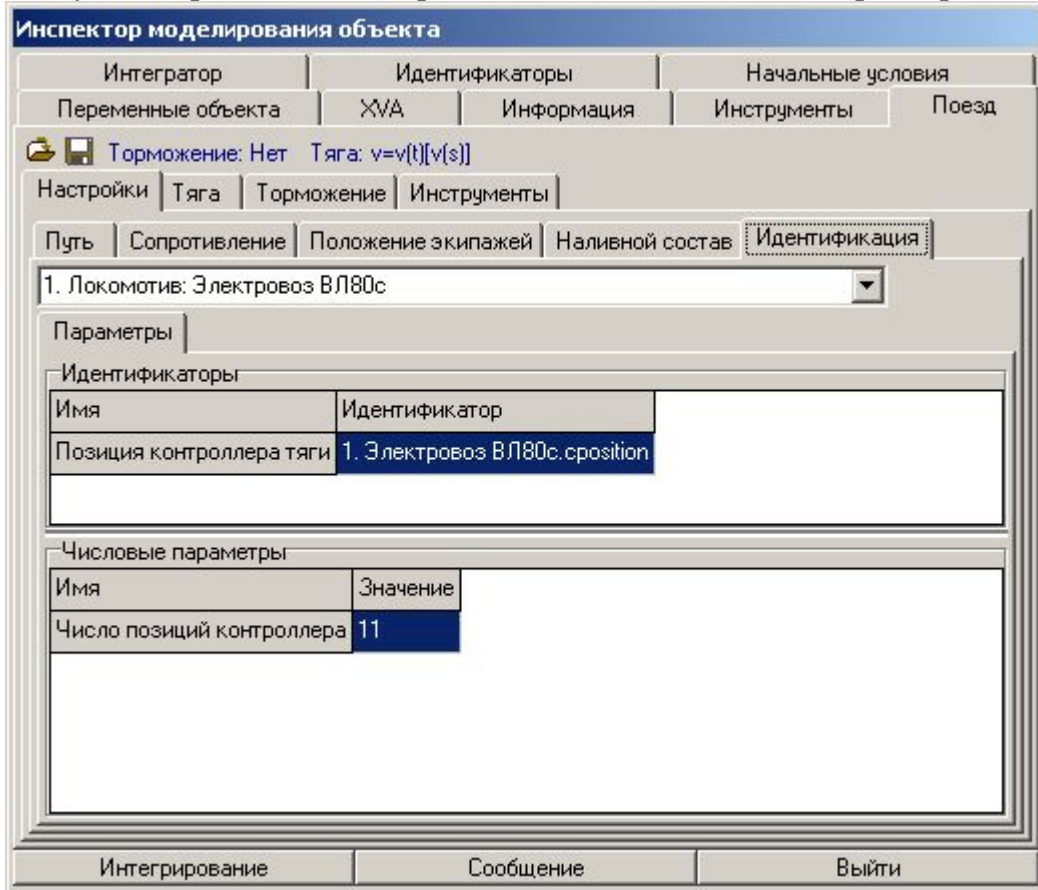


Рис. 15.34. Закладка идентификации параметров

15.5. Модель поезда Train60

В поставке программного комплекса имеется пример модели поезда, состоящего из двухсекционного электровоза ВЛ80 и 60 грузовых вагонов, рис. 15.35.

Путь к модели: `[UM]\Bin\Samples\Trains\Train60`

Для этой модели в программе моделирования настроен режим торможения со следующими параметрами:

- Модели сил нажатия: для локомотивов – *Locomotive* (путь – `[UM]\Bin\RW\Train\Brakes\Forces\Loco_ID.pf`, для вагонов – *Freight Car* (путь – `[UM]\Bin\RW\Train\Brakes\Forces\Car_ID.pf`).
- Модели коэффициентов трения: для локомотивов – *Grey iron* (путь – `[UM]\Bin\RW\Train\Brakes\Coefs\Grey_iron.cf`, для вагонов – *Composite* (путь – `[UM]\Bin\RW\Train\Brakes\Coefs\composite.cf`).

Торможение начинается с пятой секунды времени моделирования, до этого момента поезд движется в режиме выбега.

В качестве пути задана S-образная кривая, файл макрогеометрии которой находится в каталоге модели (*s-curve.msg*).

В графических окнах строятся графики тормозных сил и сил в автосцепках экипажей поезда.

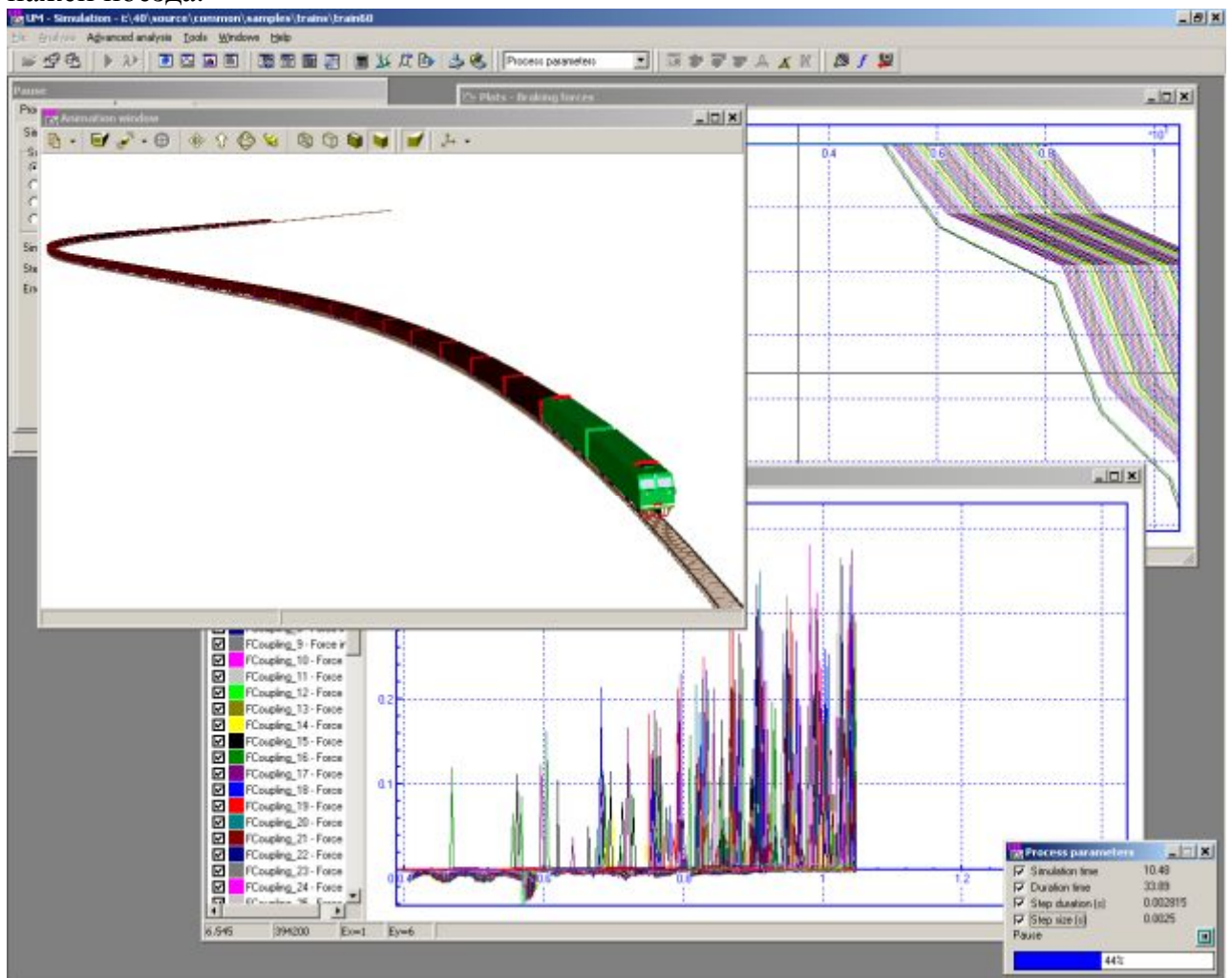


Рис. 15.35. Модель поезда Train60

15.6. Список литературы

1. Блохин Е.П., Иноземцев В.Г., Крылов В.В., Стамблер Е.Л., Урусяк Л.А.
Торможение поездов разной длины при воздухораспределителе № 483.
2. Правила тяговых расчетов из поездной работы. – М.: Транспорт, 1985, 287 с.