



Руководство пользователя



# Моделирование динамики поезда

Рассматриваются особенности автоматизированного создания и моделирования динамики поезда

## Оглавление

|  |              |
|--|--------------|
| <b>15. МОДУЛЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПОЕЗДА .....</b>      | <b>15-3</b>  |
| <b>15.1. ВВЕДЕНИЕ .....</b>                                | <b>15-3</b>  |
| <b>15.2. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ .....</b>                         | <b>15-4</b>  |
| <b>15.3. МОДЕЛЬ ПОЕЗДА .....</b>                           | <b>15-6</b>  |
| <b>15.4. СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ПОЕЗДА.....</b>                   | <b>15-7</b>  |
| 15.4.1. База данных .....                                  | 15-9         |
| 15.4.2. Обязательные элементы модели экипажа .....         | 15-9         |
| 15.4.3. Дополнительные элементы модели экипажа .....       | 15-10        |
| 15.4.4. Модель экипажа .....                               | 15-11        |
| 15.4.5. Модель межвагонных соединений .....                | 15-15        |
| 15.4.6. Модель вагона-цистерны.....                        | 15-16        |
| <b>15.5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ПОЕЗДА.....</b> | <b>15-17</b> |
| 15.5.1. Инспектор моделирования поезда .....               | 15-17        |
| 15.5.2. Настройка параметров пути .....                    | 15-18        |
| 15.5.3. Силы сопротивления движению .....                  | 15-19        |
| 15.5.4. Силы сопротивления движению от кривой .....        | 15-22        |
| 15.5.5. Положение экипажей .....                           | 15-23        |
| 15.5.6. Тормозное оборудование .....                       | 15-24        |
| 15.5.6.1. Создание модели коэффициента трения .....        | 15-24        |
| 15.5.6.2. Задание силы нажатия .....                       | 15-26        |
| 15.5.6.3. Формирование тормозной системы поезда .....      | 15-29        |
| 15.5.6.4. Задание расписания режимов торможения .....      | 15-31        |
| 15.5.7. Настройка параметров вагонов-цистерн .....         | 15-34        |
| 15.5.8. Задание режима тяги.....                           | 15-35        |
| 15.5.8.1. Задание графиков режимов тяги .....              | 15-36        |
| 15.5.8.2. Идентификация параметров тяги .....              | 15-38        |
| 15.5.9. Режим тяги по графику скорости .....               | 15-39        |
| <b>15.6. РАССЧИТЫВАЕМЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ.....</b>                | <b>15-41</b> |
| <b>15.7. МОДЕЛЬ ПОЕЗДА TRAIN60.....</b>                    | <b>15-43</b> |
| <b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>                             | <b>15-44</b> |

## 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» разработан 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 вы бега, 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 автосцепках и силы торможения.

В модуле **UM Train** имеется база данных моделей наиболее распространенных на железных дорогах локомотивов, вагонов и сцепных устройств, 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 межвагонные соединения. Стандартно для этого используются биполярные силовые элементы.

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

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

Данные положения подробно обсуждаются ниже.

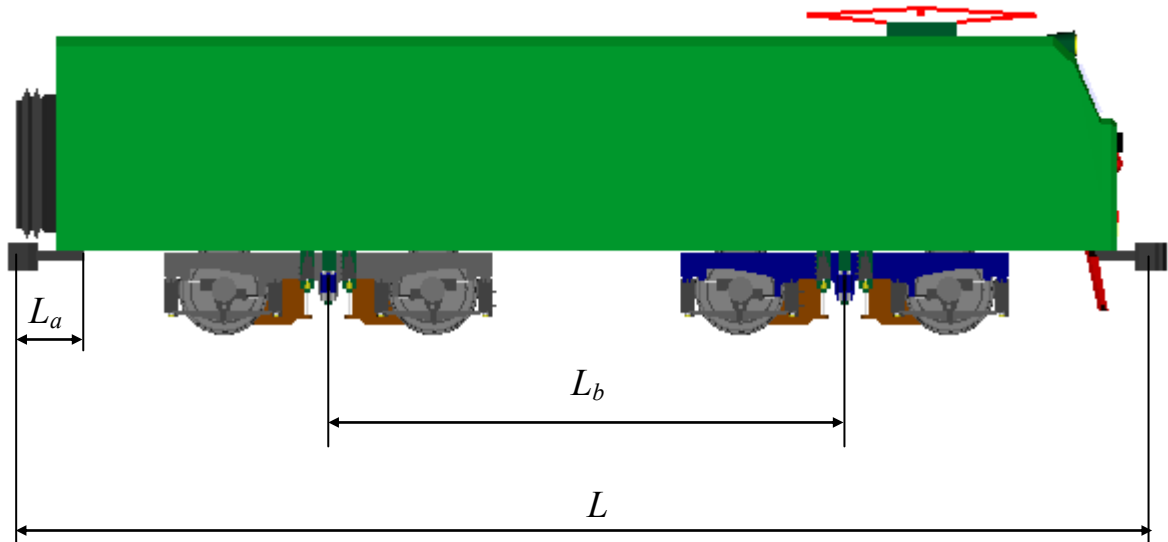


Рис. 15.1. Стандартные геометрические параметры экипажа

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 межвагонного соединения.

### 15.3. Модель поезда

Схематично модель поезда, применяемую в модуле **UM Train**, можно представить в следующем виде, рис. 15.2.

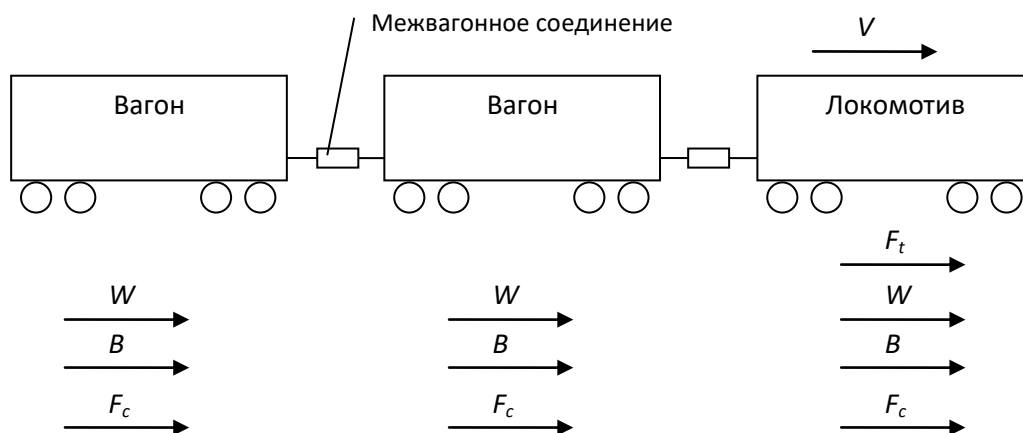


Рис. 15.2. Модель поезда

Силы на схеме:  $F_t$  – сила тяги или динамического тормоза,  $W$  – сила сопротивления движению,  $B$  – сила пневматического тормоза,  $F_c$  – суммарная сила в межвагонных соединениях.

Как уже говорилось ранее, отдельный экипаж может быть описан моделью любой сложности.

Силы  $F_t$  и  $B$  ограничены силой сцепления экипажа  $F_{сц}$ , которая рассчитывается по формуле:

$$F_{сц} = \eta \cdot \psi \cdot 9,81 \cdot M, \tag{15.1}$$

где  $\eta$  – коэффициент использования сцепного веса (используется и в режиме тяги, и в режиме торможения),  $\psi$  – коэффициент сцепления между колесом и рельсом,  $M$  – масса экипажа, кг.

Коэффициент использования сцепного веса показывает, какую долю от теоретически возможной силы тяги может реализовать локомотив. Для современных локомотивов этот показатель, как правило, выше 0,92. Этот же коэффициент используется и при ограничении максимальной тормозной силы.

Указанные параметры в модели экипажа задаются следующим образом:

Коэффициент использования сцепного веса задается в модели идентификатором *adhesive\_weight\_factor*. Если идентификатор не добавлен в модель, то коэффициент использования сцепного веса равен 1.

Коэффициент сцепления задается коэффициентом трения между колесом и рельсом при создании модели пути, см. [Главу 8](#), п. 8.5.1.3. *Создание файла макрогеометрии*.

Масса экипажа задается обязательным идентификатором *Mass*, см. п. 15.4.2. *"Модуль моделирования динамики поезда"*, с. 15-3.

## 15.4. Создание модели поезда

Первый этап при создании модели поезда – вызов Мастера создания поезда, используя пункт меню **Инструменты | Создание модели поезда**, рис. 15.3.

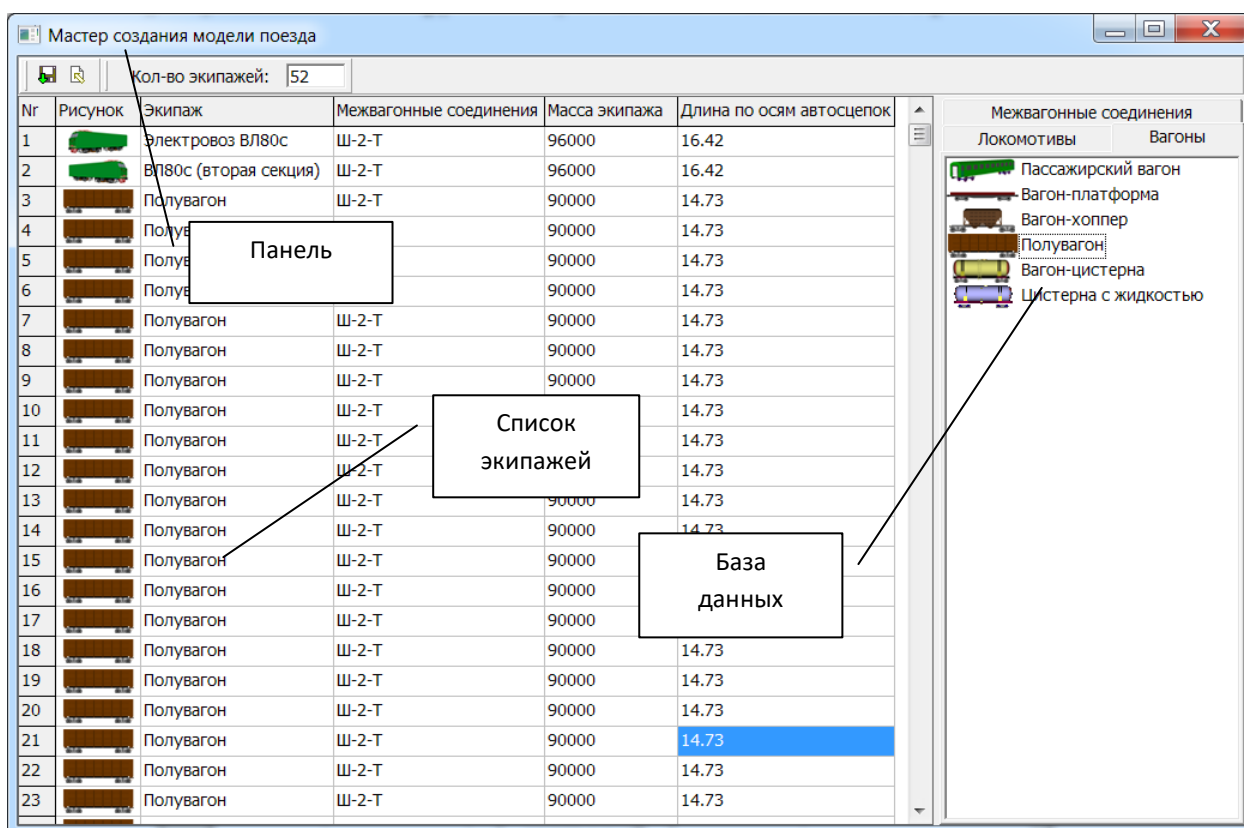
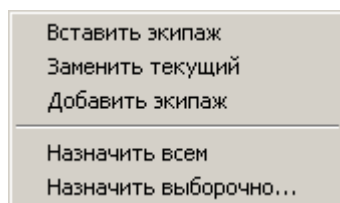


Рис. 15.3. Мастер создания модели поезда

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 межвагонные соединения, 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. 15.4.

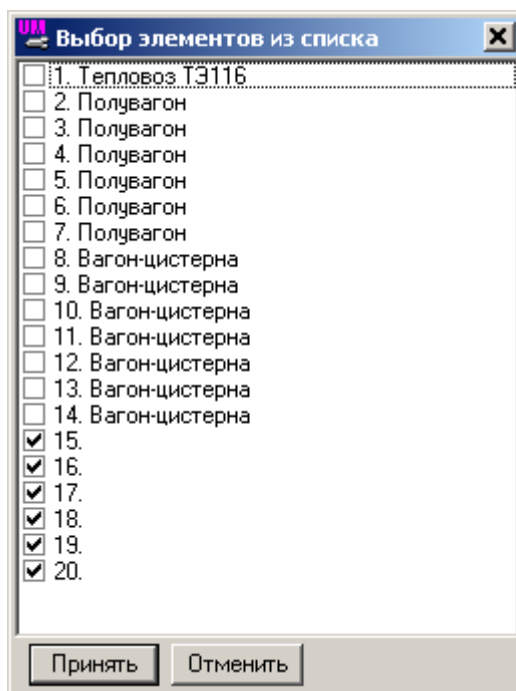




Рис. 15.4. Список экипажей поезда для пункта меню **Назначить выборочно**

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 как...** . Далее при необходимости внести изменения сохраненную модель необходимо открыть в программе ввода **UM Input**.

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

### 15.4.1. База данных

База данных может быть дополнена моделью любого экипажа. Для этого в самом простом случае достаточно создать графический образ экипажа, задать обязательные параметры (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 {Данные УМ}\RW\Train. Этот каталог содержит следующие подкаталоги:

*Absorbers* – каталог для хранения моделей межвагонных соединения;

*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.

### 15.4.2. Обязательные элементы модели экипажа

Далее приведем список обязательных элементов модели экипажа, которая добавляется в базу данных экипажей и используется в **Мастере создания поезда** для автоматизированного формирования модели поезда, табл. 15.1. Пользователь, который создает новые модели экипажей, должен следить за тем, чтобы в них присутствовали все обязательные элементы и правильно использовались.

Таблица 15.1

**Обязательные элементы модели экипажа**

| Имя                       | Тип                  | Описание   |
|---------------------------|----------------------|--|
| <i>CouplingBase</i>       | <i>идентификатор</i> | Длина экипажа по осям автосцепок, м.   |
| <i>VehicleBase</i>        | <i>идентификатор</i> | База экипажа, м.   |
| <i>Mass</i>               | <i>идентификатор</i> | Масса экипажа, кг.   |
| <i>Throttle_Position</i>  | <i>идентификатор</i> | Номер позиции контроллера машиниста. Обязательно только при создании моделей локомотива. |
| <i>FrontCouplingPoint</i> | <i>точка связи</i>   | Точка связи с предыдущим экипажем.   |
| <i>RearCouplingPoint</i>  | <i>точка связи</i>   | Точка связи со следующим экипажем. Используется для связи с трехмерными экипажами.       |
| <i>Vehicle</i>            | <i>тело</i>          | Тело, к которому прикладываются внешние силы.  |
| <i>Liquid</i>             | <i>тело</i>          | Тело, моделирующее жидкость. Обязательно   |

|  |  |  |
|--|--|--|
|  |  | только при создании моделей вагонов-цистерн. |
|--|--|--|

Идентификаторы *CouplingBase* и *Mass* используются в **Мастере создания поезда**, рис. 15.3: в соответствующих колонках задаются их значения. Обратите внимание, что идентификатор *Mass* задает полную массу всего экипажа, т.е. сумму всех тел, входящих в модель экипажа. Так, например, в состав модели вагона-цистерны *Tank\_liquid*, поставляемой вместе с ПК УМ (см. п. 15.4.6. "Модель вагона-цистерны", с. 15-16), входят два тела *Liquid* массой *MLiquid* и *Vehicle* массой *Mass-MLiquid*, т.е. суммарная масса экипажа равна *Mass*.

Идентификатор *VehicleBase* задает шкворневую базу экипажа.

Идентификатор *Throttle\_Position* задает номер позиции контроллера машиниста в модели локомотива. Экипаж будет идентифицирован как локомотив только, если в его составе присутствует этот идентификатор.

Любая модель должна содержать две точки связи *FrontCouplingPoint* и *RearCouplingPoint*, первая из них используется для связи с предыдущим экипажем, а вторая используется для связи с трехмерными экипажами, добавленными в модель поезда.

Любая модель экипажа должна содержать тело с именем *Vehicle*, к которому прикладываются внешние силы. Если модель содержит только это тело, то его масса должна быть задана идентификатором *Mass*.

Тело с именем *Liquid* должно присутствовать в модели, если создается модель вагона-цистерны, которая будет использовать встроенные в ПК УМ модели жидкости, параметры которых настраиваются на соответствующих закладках. Если пользователь самостоятельно реализует модели жидкости, то это требование необязательно.

### 15.4.3. Дополнительные элементы модели экипажа

Кроме обязательных элементов, которые необходимы при сборке модели поезда, в модель экипажа могут быть добавлены идентификаторы, задающие параметры экипажей. Приведем в табл. 15.2. список этих идентификаторов.

Таблица 15.2

Дополнительные элементы модели экипажа

| Имя                              | Тип                  | Описание  |
|----------------------------------|----------------------|---|
| <i>N_throttle_positions</i>      | <i>идентификатор</i> | Число позиций контроллера машиниста в положении тяги.                           |
| <i>Dynamic_brake_position</i>    | <i>идентификатор</i> | Номер позиции контроллера машиниста в положении торможения.                     |
| <i>N_dynamic_brake_positions</i> | <i>идентификатор</i> | Число позиций контроллера машиниста в положении торможения.                     |
| <i>Adhesive_weight_factor</i>    | <i>идентификатор</i> | Коэффициент использования сцепного веса, см. п. 15.3. "Модель поезда", с. 15-6. |

#### 15.4.4. Модель экипажа

Рассмотрим модель железнодорожного экипажа из базы на примере модели тепловоза ТЭ10, рис. 15.5, которая представляет собой одномассовую систему с одной степенью свободы – перемещение вдоль пути.

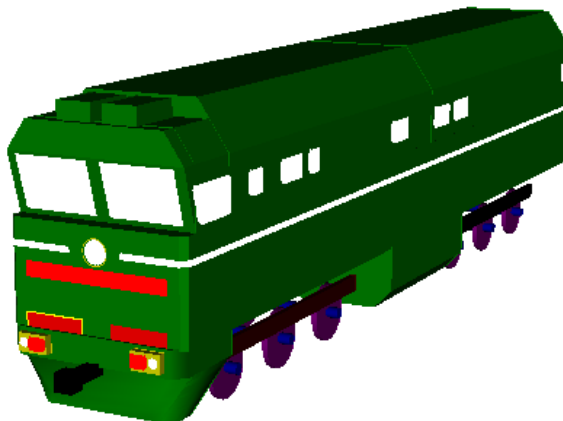


Рис. 15.5. Общий вид модели тепловоза ТЭ10

Модель состоит из одного тела с именем *Vehicle*, нескольких графических образов, поступательного шарнира – *jVehicle* и одной биполярной силы – *RearCoupling*.

Параметры тела *Vehicle*, который представляет собой весь экипаж, показаны на рис. 15.6. Тело с именем *Vehicle* должно обязательно присутствовать в модели. К этому телу прикладываются внешние силы сопротивления движению и силы торможения. В данном случае в инерционных параметрах тела задана только масса, так как у тела нет вращательных степеней свободы. Масса задана с помощью обязательного для модели экипажа идентификатора *Mass*, см. п. 15.4.2. "Обязательные элементы модели экипажа", с. 15-9.

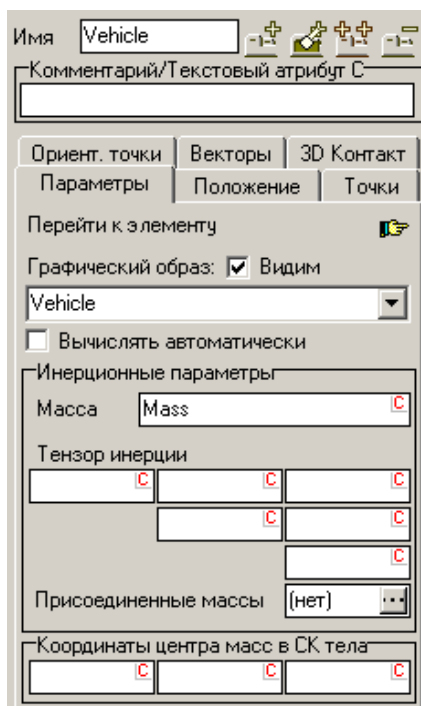


Рис. 15.6. Параметры тела Vehicle

Каждая модель экипажа должна иметь две обязательные точки связи, которые указывают места прикрепления автосцепок, рис. 15.7. Для связи одномерных моделей экипажей передняя точка прикрепления *FrontCouplingPoint*, к которой крепится автосцепка предыдущего экипажа. Задняя точка *RearCouplingPoint* используется для связи с трехмерными экипажами.

Данные точки крепления могут принадлежать любому телу в модели экипажа. В данном примере обе точки связи принадлежат телу *Vehicle*.

| Имя                | X              | Y | Z              |
|--------------------|----------------|---|----------------|
| FrontCouplingPoint | CouplingPoint  | 0 | CouplingHeight |
| RearCouplingPoint  | -CouplingPoint | 0 | CouplingHeight |

Рис. 15.7. Точки связи тела Vehicle

Геометрические параметры шарнира *jVehicle* представлены на рис. 15.8.

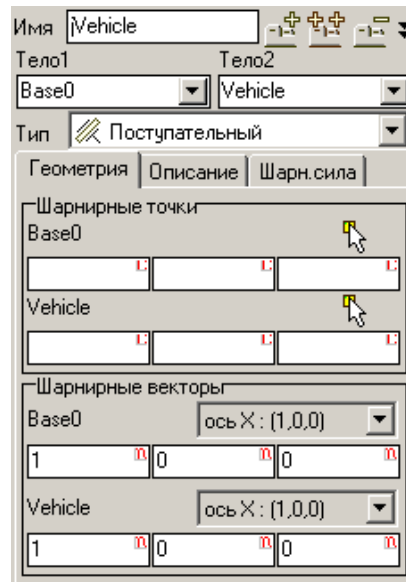


Рис. 15.8. Параметры шарнира *jVehicle*

Модель тепловоза полностью параметризована. Список идентификаторов, добавленных в модель, представлены на рис. 15.9. Идентификаторы *CouplingBase*, задающий базу экипажа по автосцепкам, *VehicleBase*, задающий шкворневую базу локомотива, и *throttle\_position*, задающий позицию контроллера, являются обязательными.

| Весь список          |                                     |          |  |
|----------------------|-------------------------------------|----------|--|
| Имя                  | Выражение                           | Значение | Комментарий                              |
| CouplingBase         | 16.969                              |          | База экипажа по автосцепкам              |
| WheelRadius          | 0.525                               |          | Радиус колеса                            |
| Mass                 | 1.2750000E+5                        |          | Масса экипажа                            |
| AxleOver             | 0.6                                 |          | Вылет оси                                |
| CouplingLength       | 2                                   |          | Длина автосцепки                         |
| BodyZ                | 1.5                                 |          | Расстояние от рельса до кузова           |
| VehicleBase          | 8.6                                 |          | База локомотива                          |
| BogieBase            | 4.2                                 |          | База тележки                             |
| WheelDistance        | 1.58                                |          | Расстояние между кругами катания колес   |
| CouplingPoint        | $CouplingBase/2 - CouplingLength/2$ | 7.4845   | Точка прикрепления поглощающего аппарата |
| CouplingHeight       | 1.05                                |          | Расстояние от рельса до оси автосцепки   |
| h                    | $1.3 + BodyZ$                       | 2.8      |  |
| throttle_position    | 0                                   |          | Позиция контроллера                      |
| n_throttle_positions | 15                                  |          | Количество позиций контроллера           |

Рис. 15.9. Идентификаторы модели

Кроме того, в модель добавлена шарнирная сила *sbTraction*, моделирующая силу тяги.

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. 15.10, 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. 15.11), 2 – вторую кривую и т.д. Присваивание нуля идентификатору обозначает нулевую силу (для локомотива – режим выбега). В

данном случае этот идентификатор *throttle\_position* задает позицию контроллера машиниста. Присваивая ему номер кривой, можно выбирать тяговую характеристику.

**Важно!** Создание идентификатора *throttle\_position* – обязательный шаг для тяговой единицы. Без этого идентификатора модель экипажа не будет определена программой как локомотив.

Если нет необходимости моделировать силу тяги, но важно, чтобы модель определялась как локомотив, например, для режима движения по профилю скорости, то следует ввести идентификатор *throttle\_position* фиктивно, то есть просто добавить его в список идентификаторов.

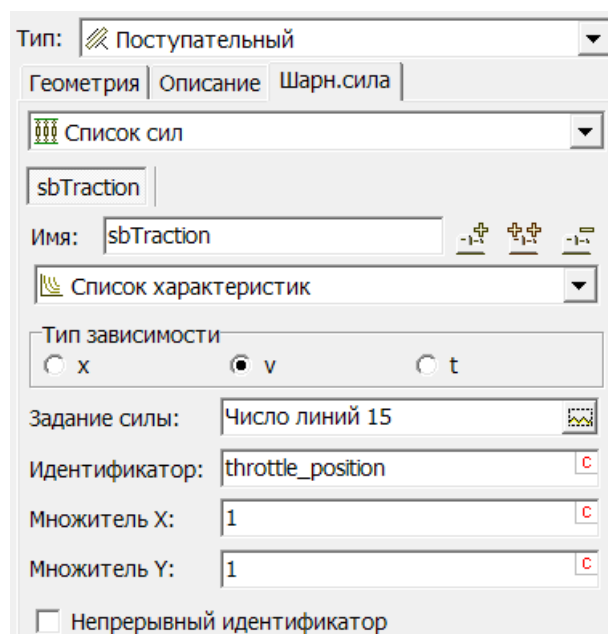


Рис. 15.10. Задание силы тяги

На рис. 15.11 показаны тяговые кривые тепловоза ТЭ10. В правой нижней части рисунка представлен список кривых (*Curve1 .. Curve10*), правой верхней – список точек для текущей кривой (в данном случае для кривой *Curve1*).

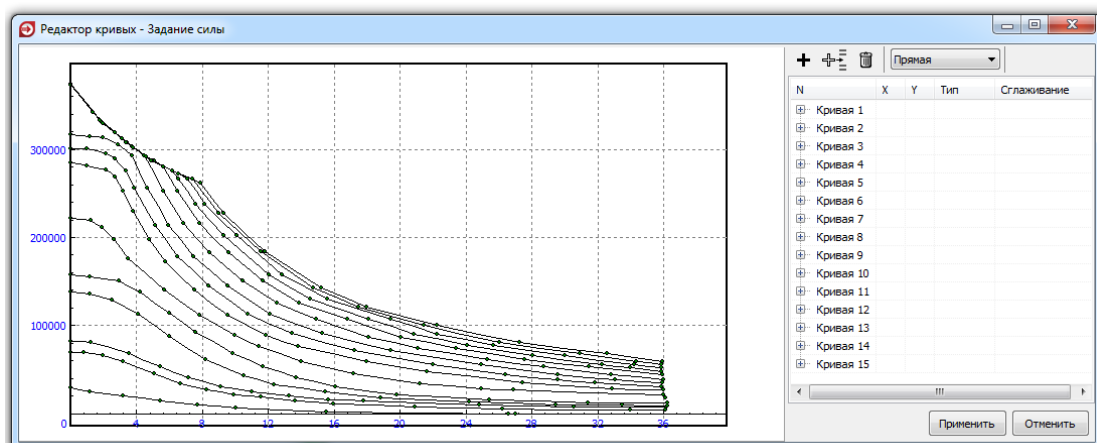


Рис. 15.11. Тяговая характеристика тепловоза

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 {Данные УМ}\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 межвагонную связь со следующим экипажем – *RearCoupling*. Так, например, для грузовых вагонов эта биполярная сила должна моделировать автосцепку и два поглощающих аппарата. Эта сила будет использоваться по умолчанию, если она не будет перекрыта в **Мастере создания модели поезда** другой моделью межвагонной связи. Если сила *RearCoupling* задана в модели экипажа, то в **Мастере создания модели поезда** в столбце **Межвагонные связи** будет выводиться комментарий, заданный для этой силы. Если в столбце **Межвагонные связи** будет написано «Неизвестный погл. аппарат», то сила задана, но у нее поле **Комментарий** пустой. Если экипаж не содержит биполярную силу *RearCoupling*, то столбец **Межвагонные соединения** для экипажа пустой, и модель надо обязательно задать используя закладку **Межвагонные соединения**, рис. 15.3.

Одномассовые модели вагонов аналогичны описанной модели тепловоза за исключением того, что у нее отсутствует шарнирная сила, моделирующая силу тяги и идентификатор *throttle\_position*.

#### 15.4.5. Модель межвагонных соединений

Межвагонные соединения в модели поезда в **UM Train** представляют собой силовой элемент, моделирующий поведение всего набора ударно-тяговых устройств, соединяющих два соседних вагона. Так, например, для грузового вагона такая модель должна включать в себя как минимум два последовательно установленных поглощающих аппарата.

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

База данных межвагонных соединений, также как и база данных экипажей, может дополняться.

### 15.4.6. Модель вагона-цистерны

Для моделирования наливных поездов в базу добавлена модель вагона-цистерны *Tank\_Liquid*, которая находится в каталоге {Данные УМ}\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,  $\nu$  – обобщенный коэффициент диссипации [1]. Коэффициент диссипации определяется по формуле:  $\nu = 2\beta\sqrt{M_l k}$ , где  $\beta$  – доля демпфирования (0,05–0,2).

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

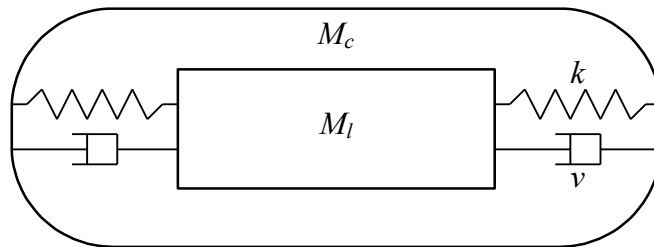


Рис. 15.12. Модель вагона-цистерны

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

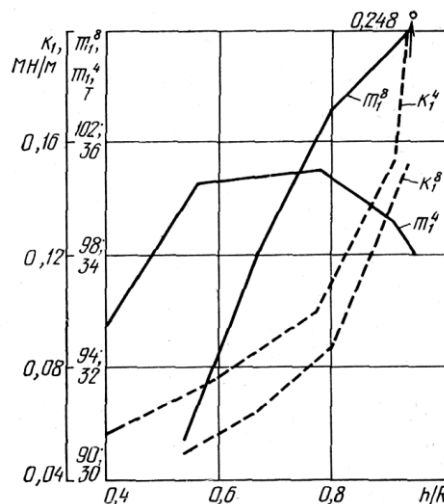



Рис. 15.13. Зависимость приведенных масс ( $m_1^4$  и  $m_1^8$ ) и жесткостей ( $k_1^4$  и  $k_1^8$ ) соответственно для четырехосной и восьмиосной цистерн от уровня свободной поверхности жидкости:  $h$  – наименьшее расстояние от поверхности невозмущенной жидкости до продольной оси геометрической симметрии бака цистерны;  $R$  – радиус цилиндрической части бака

## 15.5. Моделирование продольной динамики поезда

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

### 15.5.1. 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,
- **Массы** – настройка таблицы изменения массы экипажей модели поезда.

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. 15.5.2. "*Настройка параметров пути*", с. 15-18.

На закладке **Соппротивление** задаются силы основного сопротивления движению поезда и дополнительное сопротивление при движении в кривой, подробнее см. п. 15.5.3. "*Силы сопротивления движению*", с. 15-19.

На закладке **Положение экипажей** задается положение первого экипажа и положение трехмерных моделей экипажей (модуль **UM Train 3D**), см. п. 15.5.5. "*Положение экипажей*", с. 15-23.

Закладка **Наливной состав** доступна, если в модели поезда присутствуют наливные цистерны. На этой закладке настраиваются модели продольных колебаний цистерны с жидкостью, подробнее см. п. 15.5.7. "*Настройка параметров вагонов-цистерн*", с. 15-34.

На закладке **Идентификация** для тяговых единиц указываются идентификаторы, задающие элементы управления кабины машиниста, подробнее см. п. 15.5.8.2. "*Идентификация параметров тяги*", с. 15-38.

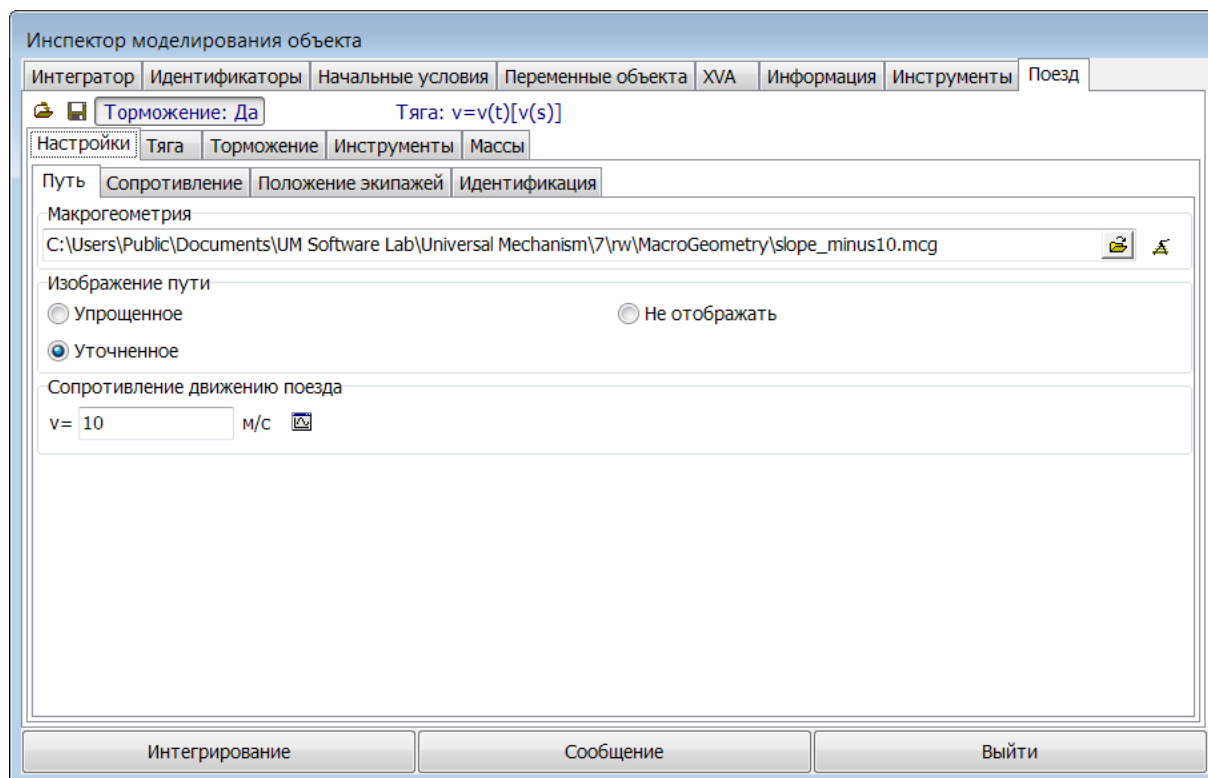


Рис. 15.14. Инспектор моделирования

### 15.5.2. Настройка параметров пути

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

- **Макрогеометрия** – позволяет 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.

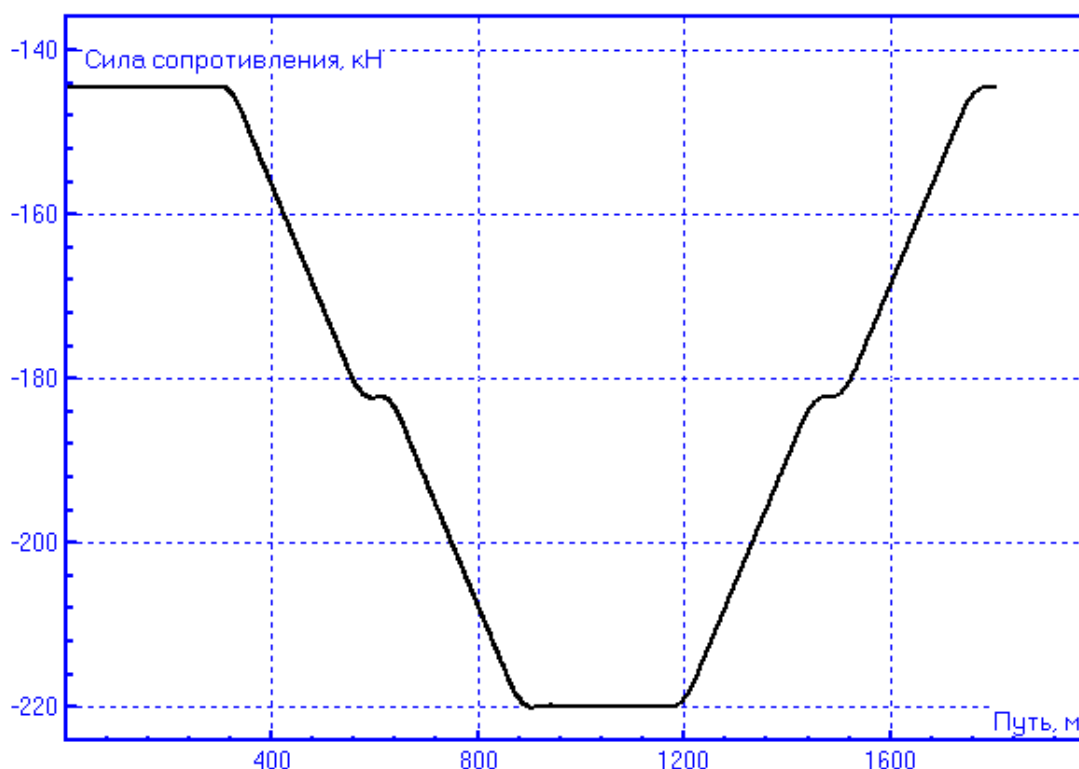


Рис. 15.15. График силы сопротивления движению поезда

### 15.5.3. Силы сопротивления движению

Силы сопротивления поезда это внешние неуправляемые силы, направленные против движения поезда. Как правило, силы сопротивления движению 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.

Сила дополнительного сопротивления от уклона рассчитывается автоматически с использованием значений массы экипажа и текущего уклона пути.

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

На этой закладке расположены два списка. Верхний список (список загруженных моделей сил) содержит загруженные для данной модели поезда модели сил основного сопротивления. С помощью кнопок на панели инструментов 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.

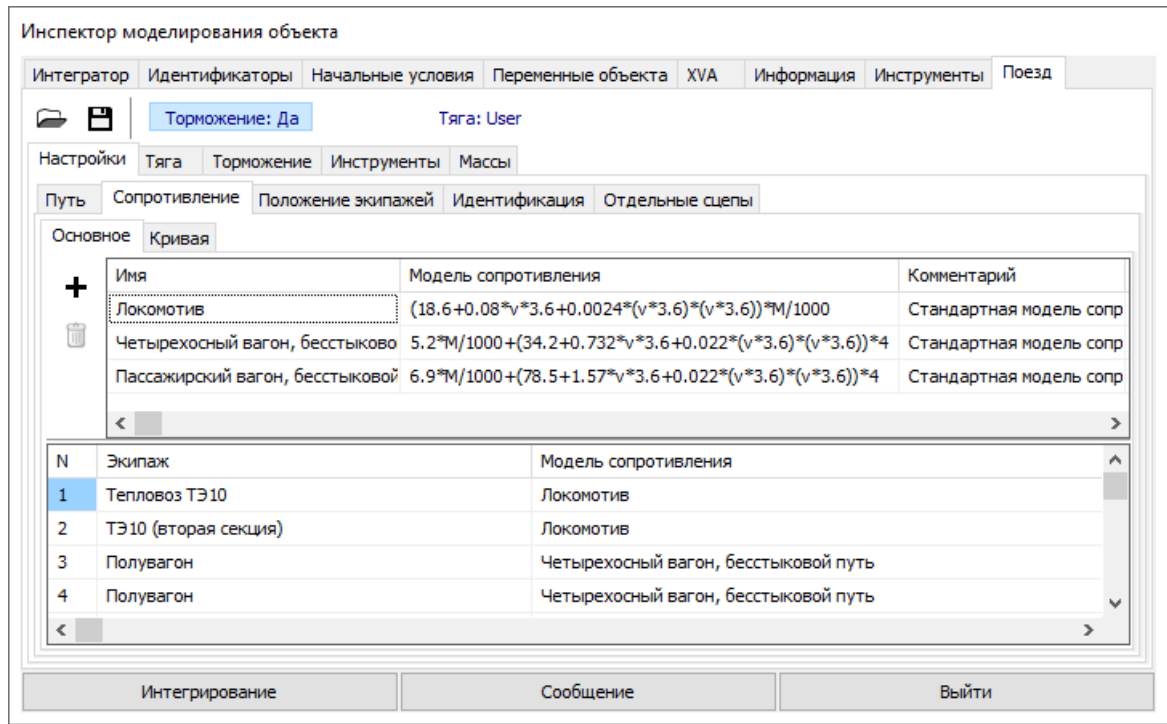


Рис. 15.16. Задание сил основного сопротивления движению

В модуле существуют три 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:

$$W_o = (18.6 + 0,08v \cdot 3.6 + 0,0024(v \cdot 3.6)^2)M/1000, \text{ Н}, \quad (15.2)$$

где  $v$  – скорость движения, м/с;  $M$  – масса экипажа, кг.

- **Груженный вагон** – сила основного сопротивления груженых четырехосных вагонов на роликовых подшипниках в составе поезда:

$$W_o = \frac{5.2M}{1000} + (34,2 + 0.732v \cdot 3.6 + 0,022(v \cdot 3.6)^2) \cdot 4, \text{ Н}. \quad (15.3)$$

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

$$W_o = \frac{6.9M}{1000} + (78,5 + 1,57v \cdot 3.6 + 0,022(v \cdot 3.6)^2) \cdot 4, \text{ Н}. \quad (15.4)$$

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

Рассмотрим особенности описания этих сил. Во-первых, отметим, что первоисточником зависимостей для описания сил основного сопротивления являются «Правила тяговых расчетов для поездной работы» [2]. В [2] эти силы даны в виде **удельного** сопротивления движению подвижного состава в ньютонах на тонну, см. рис. 15.17.

Для применения в "Универсальном механизме" формулы из [2] нужно преобразовать в основное сопротивление движению подвижного состава в Н, действующее на один экипаж. Таким образом, с учётом того, что масса  $M$  в УМ задаётся в килограммах, а скорость  $v$  – в м/с, формула (17) из [2] превращается в формулу (15.2), приведенную выше.

1.2.3. **Основное удельное сопротивление движению локомотивов.** Основное удельное сопротивление движению локомотивов определять по формулам:

– электровозы и тепловозы на звеньевом пути

$$w'_o = 18,6 + 0,1v + 0,0029v^2, \tag{15}$$

$$w_x = 23,5 + 0,11v + 0,0034v^2; \tag{16}$$

– электровозы и тепловозы на бесстыковом пути

$$w'_o = 18,6 + 0,08v + 0,0024v^2, \tag{17}$$

$$w_x = 23,5 + 0,09v + 0,0034v^2. \tag{18}$$

где  $W'_o$  – основное удельное сопротивление движению локомотивов, Н/т;  
 $v$  – скорость движения, км/ч.

Рис. 15.17. Формулы для расчёта основного удельного сопротивления движению локомотивов из [2]

Отметим также, что в редакции "Правил тяговых расчётов для поездной работы" от 1985 года основное удельное сопротивление движению локомотивов рассчитывалось в килограмм-силах и для перевода килограмм-сил в ньютонны требовалось ещё умножить выражение на коэффициент 9,81.

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

$$W_o = W_o(m, x, v, t), \text{ Н.} \tag{15.5}$$

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. 15.18, где в качестве примера введена сила основного сопротивления локомотива на бесстыковом пути.

Заранее разработанные модели сил основного сопротивления движению находятся в файлах \*.rf (**R**esistance **F**orce) в каталоге {Данные УМ}\RW\Train\Resistance.

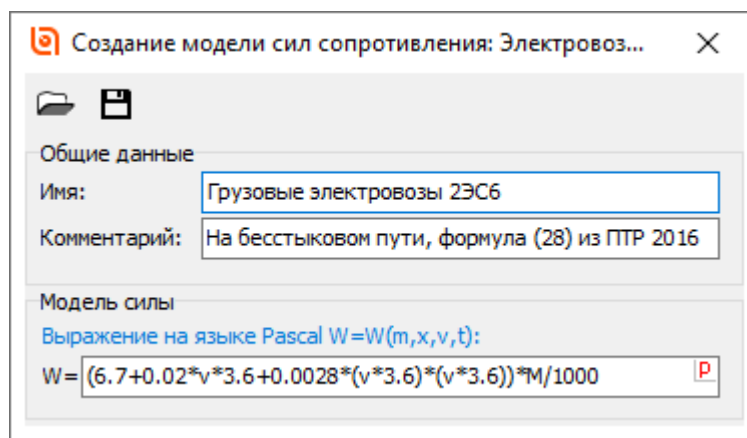


Рис. 15.18. Создание модели силы основного сопротивления движению

### 15.5.4. Силы сопротивления движению от кривой

Силы сопротивления движения от кривой задаются на закладке **Сопротивление | Кривая**, рис. 15.19.

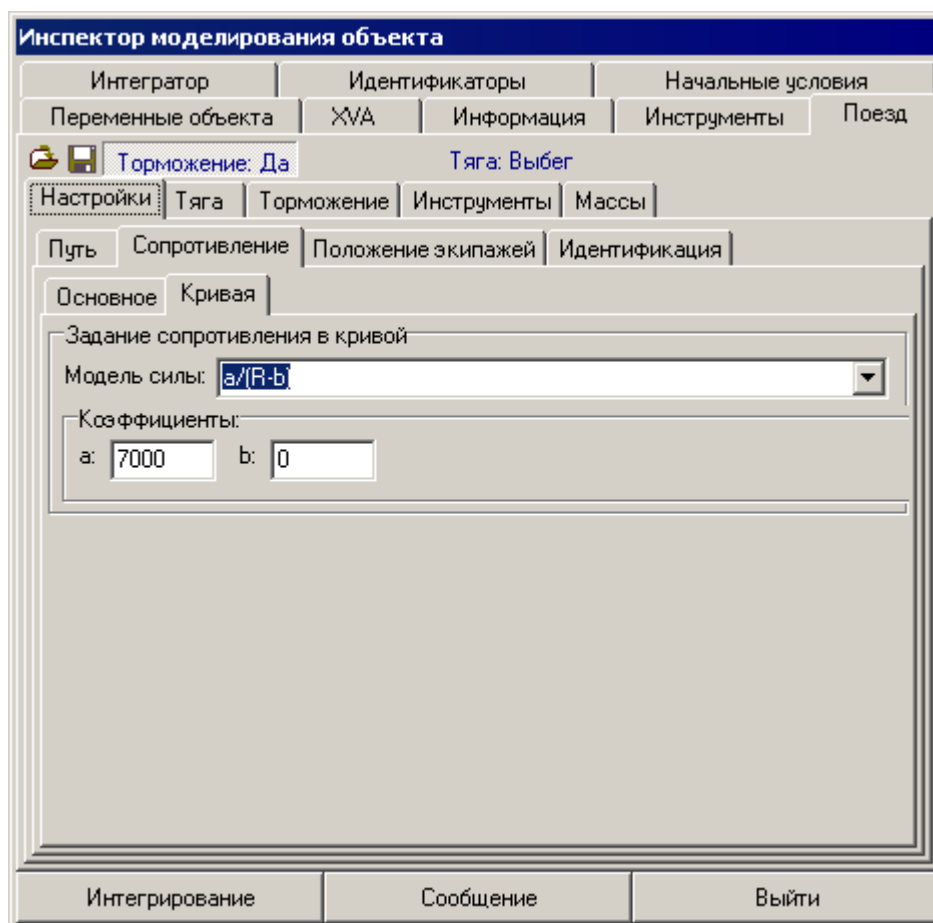


Рис. 15.19. Задание сил сопротивления движению от кривой

Доступны следующие модели сил:

- **$a/(R-b)$**  – удельная сила (Н/т) по формуле, 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.

### 15.5.5. Положение экипажей

На закладке **Положение экипажей**, **m** задается положение первого экипажа поезда (в метрах), рис. 15.20. 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**).

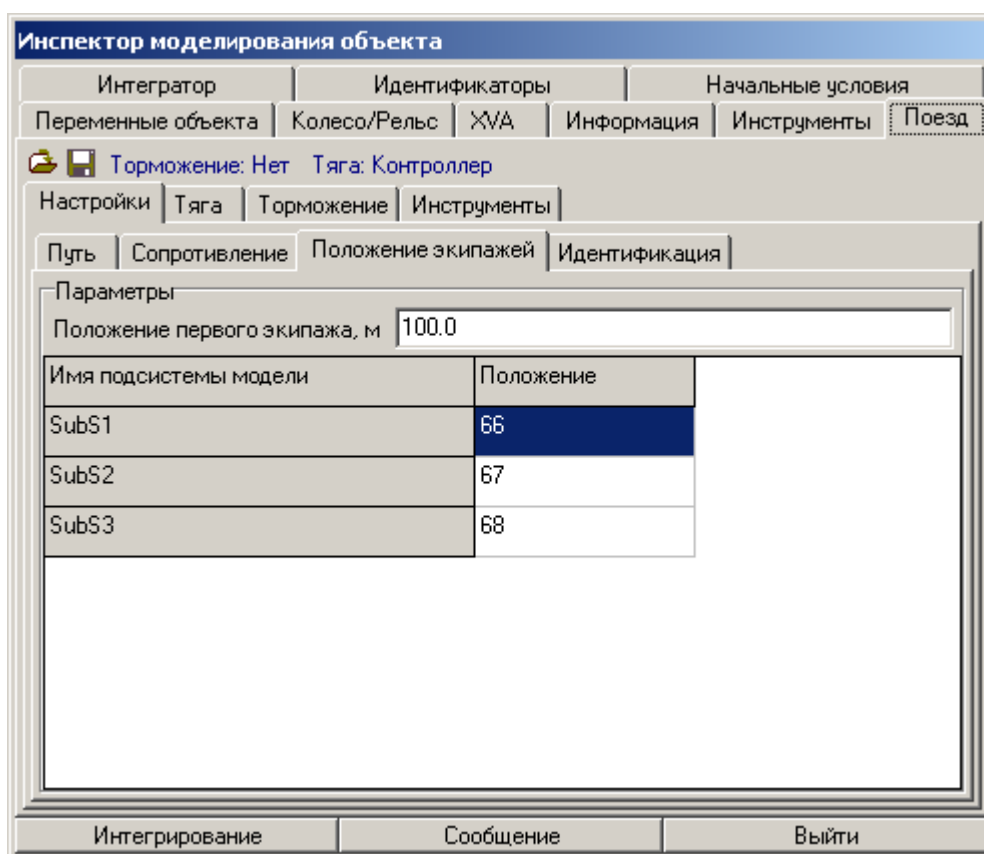


Рис. 15.20. Окно задания положения экипажей

### 15.5.6. 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:


$$F_m = f_{mp} \cdot F_n \quad (15.6)$$

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 модель коэффициента трения, а также модель рычажной передачи и индикаторная диаграмма изменения давления в тормозном цилиндре, задающие силу 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.

#### 15.5.6.1. 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. 15.21.

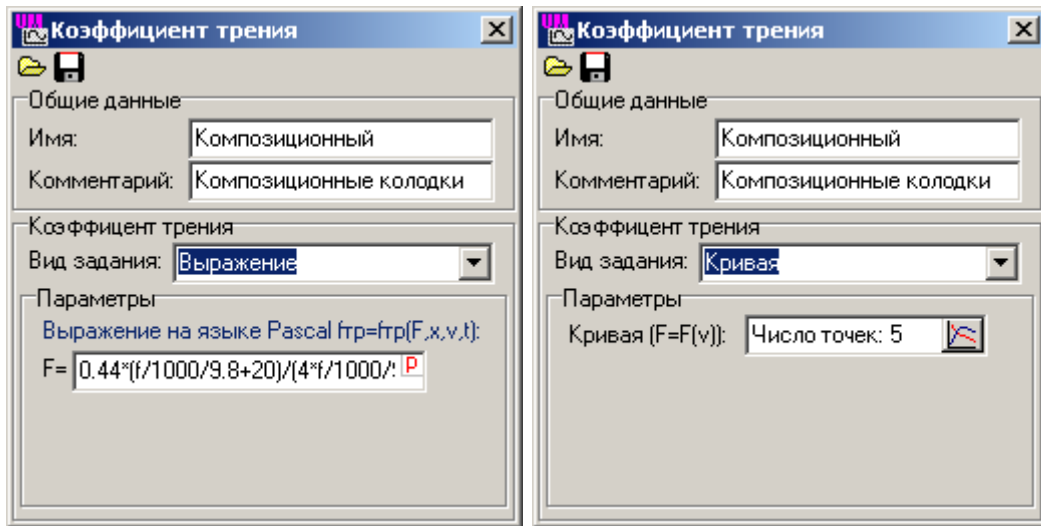


Рис. 15.21. Окно создания моделей коэффициентов трения

Модели коэффициентов трения хранятся в файлах с расширением *cf* в каталоге по умолчанию {Данные УМ}\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]:

$$f_{mp} = 0,44 \frac{F_H + 20}{4F_H + 20} \frac{v + 150}{2v + 150} \tag{15.7}$$


где  $F_H$  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:

$$f_{mp} = 0,44 * \left( \frac{f}{9.8} + 20 \right) / \left( 4 * \frac{f}{9.8} + 20 \right) * (3.6 * v + 150) / (2 * 3.6 * v + 150)$$

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. Отметим, 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  $F_H = 25,4$  кН. Для этого выберем вид задания **Кривая**. Далее нажмем кнопку , в открывшемся **Редакторе кривых** необходимо задать кривую, рис. 15.22.

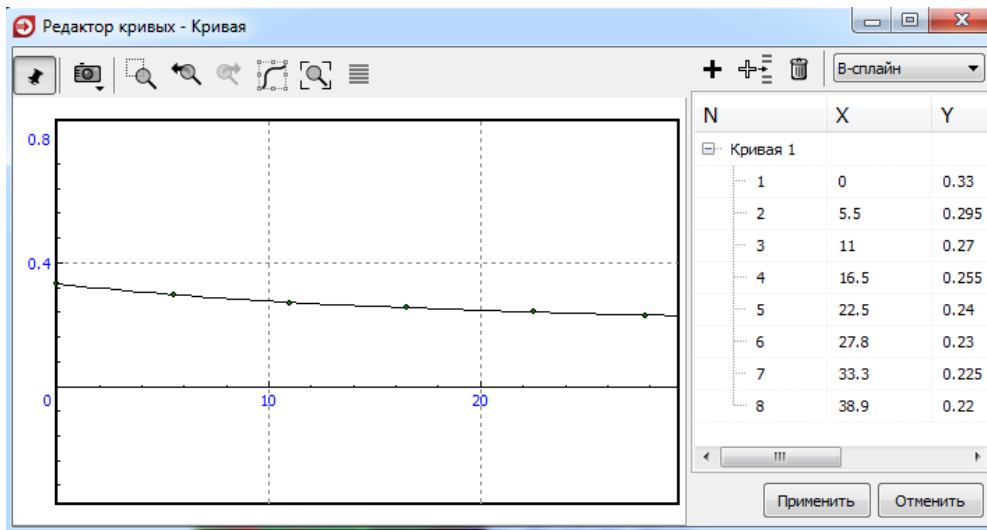


Рис. 15.22. Редактор кривых

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

### 15.5.6.2. Задание силы нажатия


Силы нажатия рассчитывается по следующей формуле:

$$F_H = n_{\text{цил}} i \eta (p S \eta_{\text{ц}} - F_{\text{пр}}) / m_{\text{к}}, \text{ Н}, \quad (15.8)$$

где  $n_{\text{цил}}$  – количество тормозных цилиндров, установленных на экипаже;  $i$  – передаточное число рычажной передачи;  $\eta$  – к.п.д. рычажной передачи;  $p$  – давление сжатого воздуха в тормозном цилиндре, Па;  $S$  – площадь поршня тормозного цилиндра,  $\text{м}^2$ ;  $\eta_{\text{ц}}$  – к.п.д. тормозного цилиндра;  $F_{\text{пр}}$  – усилие отпускной пружины, Н;  $m_{\text{к}}$  – количество тормозных колодок на экипаже (число пар трения колодка–колесо).

Для задания силы нажатия необходимо создать *модель рычажной передачи*, где задаются все вышеперечисленные параметры кроме давления в тормозном цилиндре, и график *изменения давления в тормозном цилиндре (индикаторную диаграмму)*. Графики изменения давления задается отдельно для режимов служебного торможения, экстренного торможения и отпуска.

#### Рычажная передача


Окно создания модели рычажной передачи открывается при помощи пункта меню **Инструменты | Поезд | Рычажная передача...** или кнопки  на панели инструментов, рис. 15.23.

Все указанные параметры задаются на форме задания модели рычажной передачи, рис. 15.23.

Рис. 15.23. Задание модели рычажной передачи

Модели рычажных передач, созданные с помощью описываемого окна, должны быть добавлены в список на закладке **Поезд | Торможение | Тормозное оборудование | Рычажная передача** инспектора моделирования для возможности их использования при формировании тормозной системы поезда.

### Индикаторная диаграмма

Индикаторная диаграмма изменения давления в тормозном цилиндре задается при помощи специального инструмента, вызываемого из пункта меню **Инструменты | Поезд | Индикаторная диаграмма...** или кнопки  на панели инструментов, рис. 15.24.

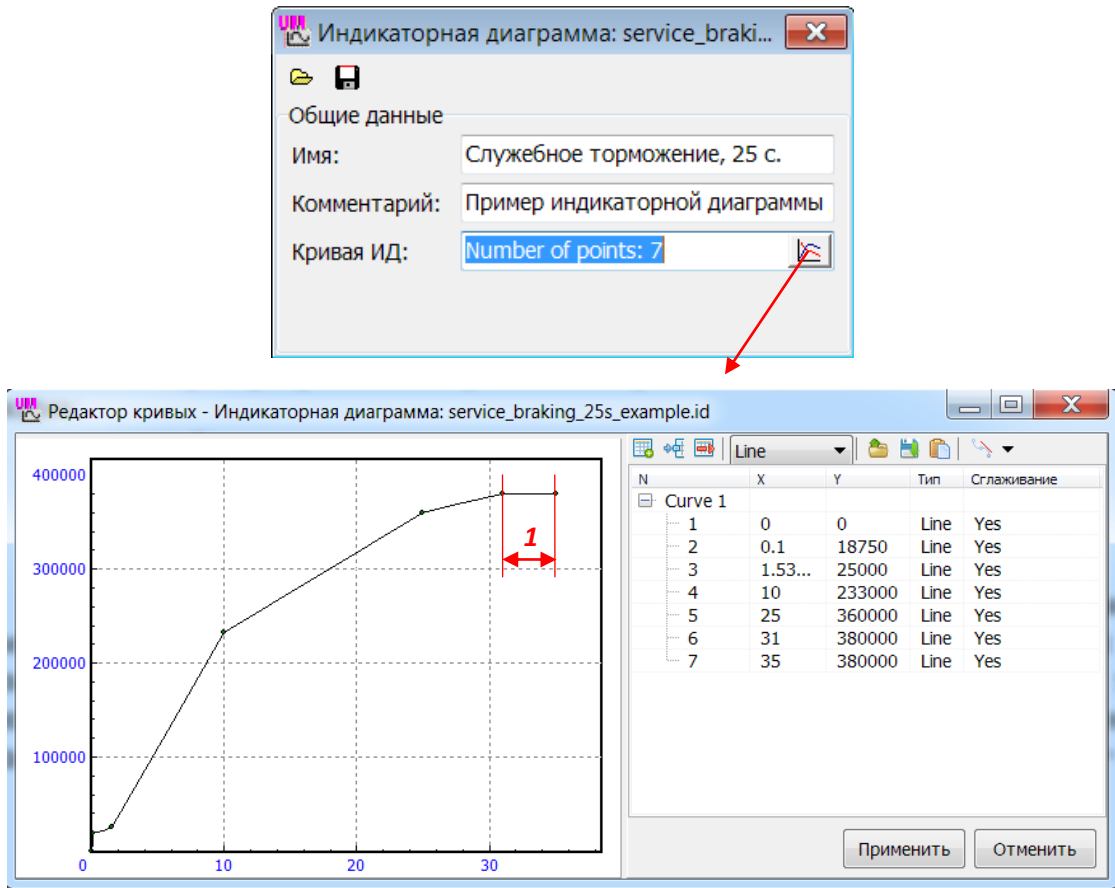


Рис. 15.24. Задание индикаторной диаграммы торможения

С помощью этого инструмента создается график изменения давления в тормозном цилиндре (паскалы, Па) от времени (секунды, с) при различных режимах торможения, а именно выделены три режима:

- служебное торможение,
- экстренное торможение,
- отпуск.

Индикаторные диаграммы служебного и экстренного торможения необходимо сохранять в каталоге {Данные УМ}\RW\Train\Brakes\BrakeID. Диаграммы отпуска в каталоге {Данные УМ}\RW\Train\Brakes\ReleaseID.

**Важно!** Индикаторные диаграммы торможения должны быть монотонно возрастающими функциями, то есть для  $t_1 < t_2, p(t_1) \leq p(t_2)$ , рис. 15.24. При этом последний участок диаграммы, задающий максимальное давление, должен быть параллелен абсциссе (для любого  $t, p(t) = p_{\max}$  – участок 1 на рис. 15.24).

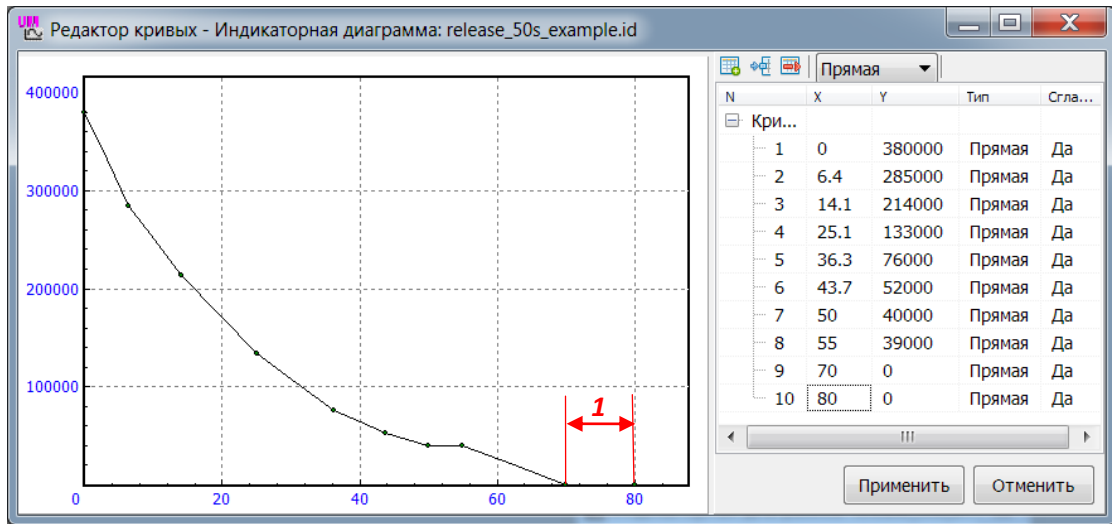


Рис. 15.25. Задание индикаторной диаграммы отпуска

**Важно!** Индикаторные диаграммы отпуска должны быть монотонно убывающими функциями, то есть при  $t_1 < t_2, p(t_1) \geq p(t_2)$ , рис. 15.25. При этом последний участок диаграммы должен задавать нулевое давление (для любого  $t, p(t) = 0$  – участок *I* на рис. 15.25).

Для того чтобы воспользоваться созданной индикаторной диаграммой ее надо добавить в список на закладке **Поезд | Торможение | Тормозное оборудование | ИД торможения** или **Поезд | Торможение | Тормозное оборудование | ИД отпуска** и назначить требуемым экипажам на закладке **Поезд | Торможение | Тормозное оборудование | Магистраль** в столбцах **Служебное торможение, Экстренное торможение** и **Отпуск**.

### 15.5.6.3. Формирование тормозной системы поезда

Тормозное оборудование поезда задается в инспекторе моделирования на закладке **Поезд | Торможение | Тормозное оборудование**, рис. 15.26. Группа элементов **Торможение** предназначена для задания параметров распространения волны служебного, экстренного 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**.

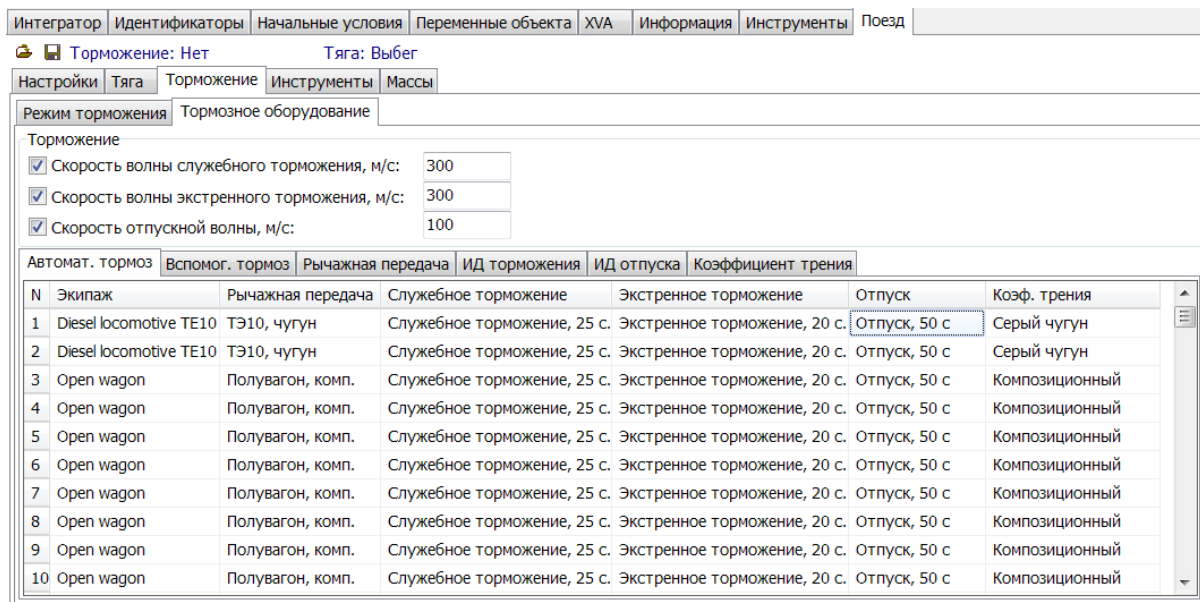


Рис. 15.26. Закладка задания тормозного оборудования

На этой закладке находятся несколько вложенных закладок:

**Автомат. тормоз** – эта закладка предназначена для настройки автоматического тормоза, рис. 15.26. Здесь созданные модели рычажной передачи, индикаторных диаграмм торможения и отпуска, а также 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 рычажной передачи – по одной для локомотивов и вагонов, а также создать индикаторные диаграммы торможения и отпуска, которые, как правило, зависят от типа применяемого воздухораспределителя и могут быть одинаковы и для вагонов и для локомотивов. В случае, если на всем поезде используются колодки одного типа, то необходимо создать только одну модель коэффициента трения и назначить ее всем экипажам. При этом модели для всех основных материалов, применяемых при изготовлении колодок (серый чугун, высокофосфористый чугун и композиционный материал), уже созданы. Для изменения модели необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши в соответствующем поле. Перечисленные модели выбираются из списков, сформированных на закладках **Рычажная передача**, **ИД торможения**, **ИД отпуска** и **Коэффициент трения**.

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

**Рычажная передача**, **ИД торможения**, **ИД отпуска** и **Коэффициент трения** – на этих закладках формируются списки, элементы которых используются при формировании тормозной системы на закладках **Автомат. тормоз** и **Вспомог. тормоз**.

Покажем порядок загрузки индикаторных диаграмм торможения, рис. 15.27. В списке диаграмм всегда находятся две встроенные модели: **(нет данных)** и **(интерполяция)**, которые нельзя удалить из списка. Модель **(нет данных)** выдает нулевое давление, 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 давление по линейной интерполяции, используя данные ближайших экипажей впереди и сзади, для которых назначены индикаторные диаграммы.

| Магистраль   | Вспомог. тормоз                | Рычажная передача   | ИД торможения | ИД отпуска | Коэффициент трения |     |             |      |              |                             |  |                |                                |  |                             |                               |   |                              |                               |   |
|--|--------------------------------|---|---------------|------------|--------------------|-----|-------------|------|--------------|-----------------------------|--|----------------|--------------------------------|--|-----------------------------|-------------------------------|---|------------------------------|-------------------------------|---|
| <table border="1"> <thead> <tr> <th>Имя</th> <th>Комментарий</th> <th>Путь</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>(нет данных)</td> <td>Нет тормозного оборудования</td> <td></td> </tr> <tr> <td>(интерполяция)</td> <td>Сила вычисляется интерполяцией</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Служебное торможение, 25 с.</td> <td>Пример индикаторной диаграммы</td> <td>c:\users\public\documents\um software lab\universal mechanism\7\rw\</td> </tr> <tr> <td>Экстренное торможение, 20 с.</td> <td>Пример индикаторной диаграммы</td> <td>c:\users\public\documents\um software lab\universal mechanism\7\rw\</td> </tr> </tbody> </table> |                                |   |               |            |                    | Имя | Комментарий | Путь | (нет данных) | Нет тормозного оборудования |  | (интерполяция) | Сила вычисляется интерполяцией |  | Служебное торможение, 25 с. | Пример индикаторной диаграммы | c:\users\public\documents\um software lab\universal mechanism\7\rw\ | Экстренное торможение, 20 с. | Пример индикаторной диаграммы | c:\users\public\documents\um software lab\universal mechanism\7\rw\ |
| Имя  | Комментарий                    | Путь  |               |            |                    |     |             |      |              |                             |  |                |                                |  |                             |                               |   |                              |                               |   |
| (нет данных)   | Нет тормозного оборудования    |   |               |            |                    |     |             |      |              |                             |  |                |                                |  |                             |                               |   |                              |                               |   |
| (интерполяция)   | Сила вычисляется интерполяцией |   |               |            |                    |     |             |      |              |                             |  |                |                                |  |                             |                               |   |                              |                               |   |
| Служебное торможение, 25 с.  | Пример индикаторной диаграммы  | c:\users\public\documents\um software lab\universal mechanism\7\rw\ |               |            |                    |     |             |      |              |                             |  |                |                                |  |                             |                               |   |                              |                               |   |
| Экстренное торможение, 20 с.   | Пример индикаторной диаграммы  | c:\users\public\documents\um software lab\universal mechanism\7\rw\ |               |            |                    |     |             |      |              |                             |  |                |                                |  |                             |                               |   |                              |                               |   |

Рис. 15.27. Закладка «ИД торможения»

С помощью контекстного меню можно задать выбранную ИД всем экипажам в качестве диаграммы для служебного или экстренного торможения или удалить ее из списка, рис. 15.28.

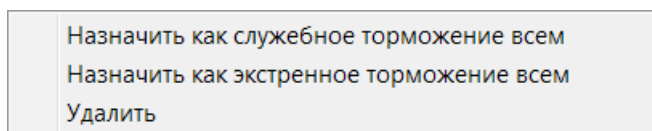



Рис. 15.28. Контекстное меню закладки «ИД торможения»

#### 15.5.6.4. Задание расписания режимов торможения

На закладке **Поезд | Торможение | Режим торможения** задается расписание режимов торможения поезда, рис. 15.29.

Флажок **Торможение** указывает, включен ли режим расписания работы тормозной системы. 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  добавляется, или удаляется закладка, на которой настраивается режим 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 тип тормоза, для которого задается данный режим: для **тормозной магистрали** поезда или **вспомогательного тормоза** локомотива.

Из списка **Режим** выбирается режим торможения. Этот список содержит четыре элемента, значения которых зависят от типа тормоза. Если тип тормоза – **тормозная магистраль**, то в списке содержатся следующие режимы торможения:

- **отпуск,**
- **перекрыша,**
- **служебное торможение,**
- **экстренное торможение.**

Для типа тормоза – **вспомогательный тормоз**:

- отпуск,
- поездной режим (повторитель),
- перекрыша,
- служебное торможение.

При движении в режим **торможения** и **отпуска** может учитываться скорость распространения волны, см. п. 15.5.6.3. "Формирование тормозной системы поезда", с. 15-29.

При задании режима **перекрыши** в тормозных цилиндрах экипажей давление будет расти или падает в зависимости от предыдущего режима до уровня давления, которое установилось на заданном экипаже в момент перевода в режим **перекрыши**.

Рассмотрим более подробно порядок задания и принцип работы режимов торможения. На рис. 15.29 показано окно с настройками режимов торможения.

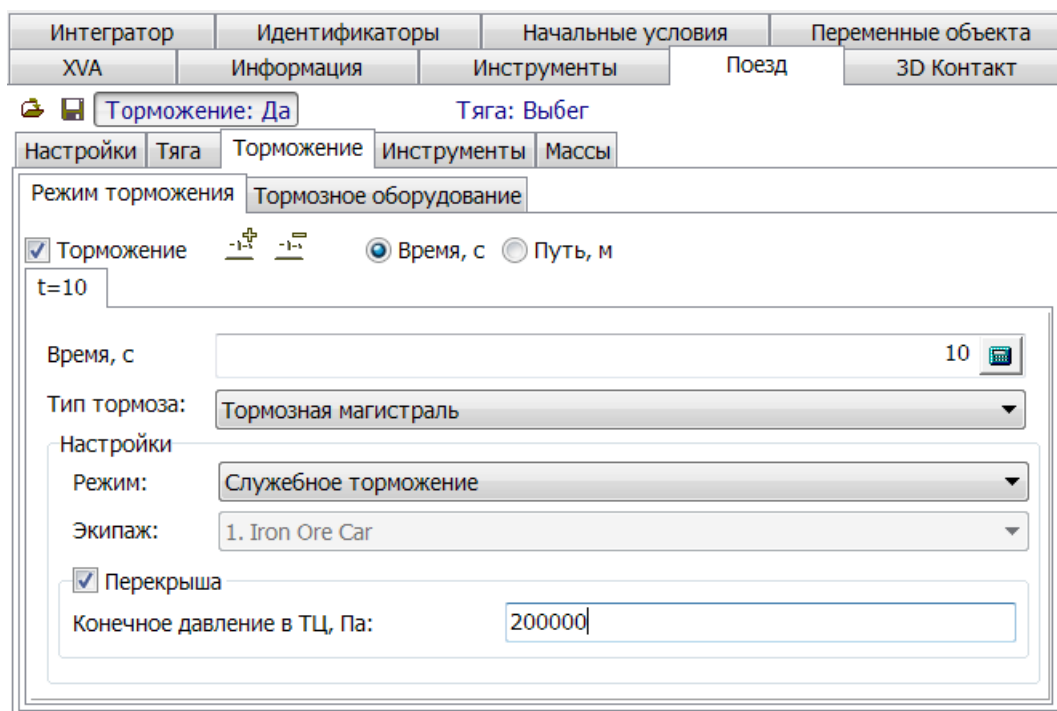


Рис. 15.29. Закладка «ИД торможения»

На этом рисунке показан пример задания режима служебного торможения. В данном случае задано время начала служебного торможения – **10 с**; тип тормоза – **тормозная магистраль**; режим – **служебное торможение**; экипаж, с которого начинается процесс торможения – **первый экипаж**, и кроме того для режимов служебного торможения и отпуска возможно задание конечного давления в тормозном цилиндре первого экипажа, т.е. перевод в режим перекрыши. В данном примере торможение продолжается до достижения 200000 Па (2 атм.) в тормозных цилиндрах первого экипажа с дальнейшим переводом в режим перекрыши. На остальных экипажах будет достигнуто такое же давление в тормозных цилиндрах, если индикаторные диаграммы имеют такой же максимум давления, как на первом экипаже. В случае если индикаторные диаграммы экипажей имеют разные максимальные давление, например, в поезде присутствуют груженные и порожние вагоны, давление в тормозных цилиндрах экипажей будет задано относительно их максимальной величине в такой же пропорции, как и на первом экипаже.

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).

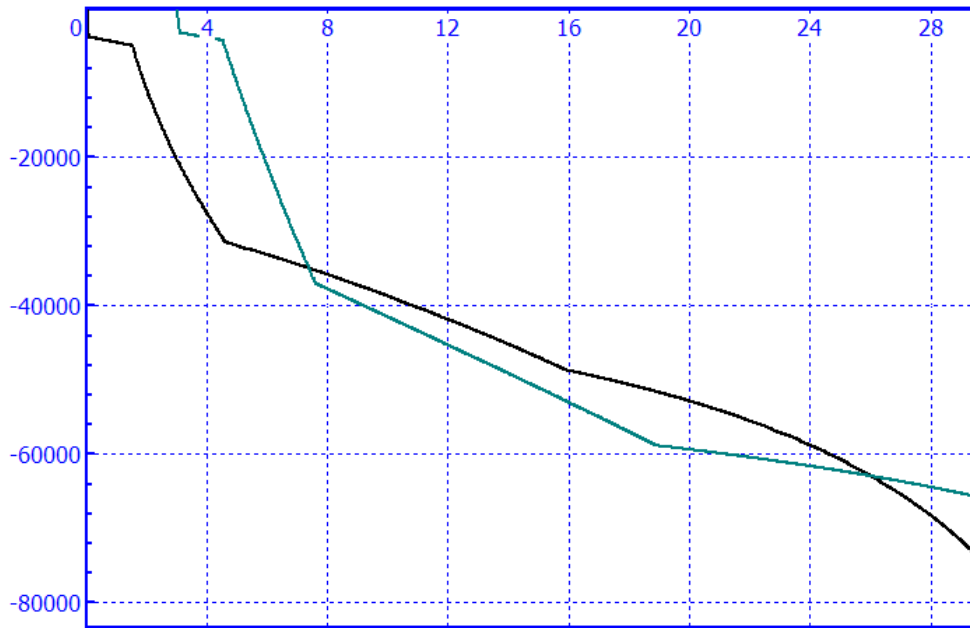



Рис. 15.30. Тормозные силы

### 15.5.7. 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.

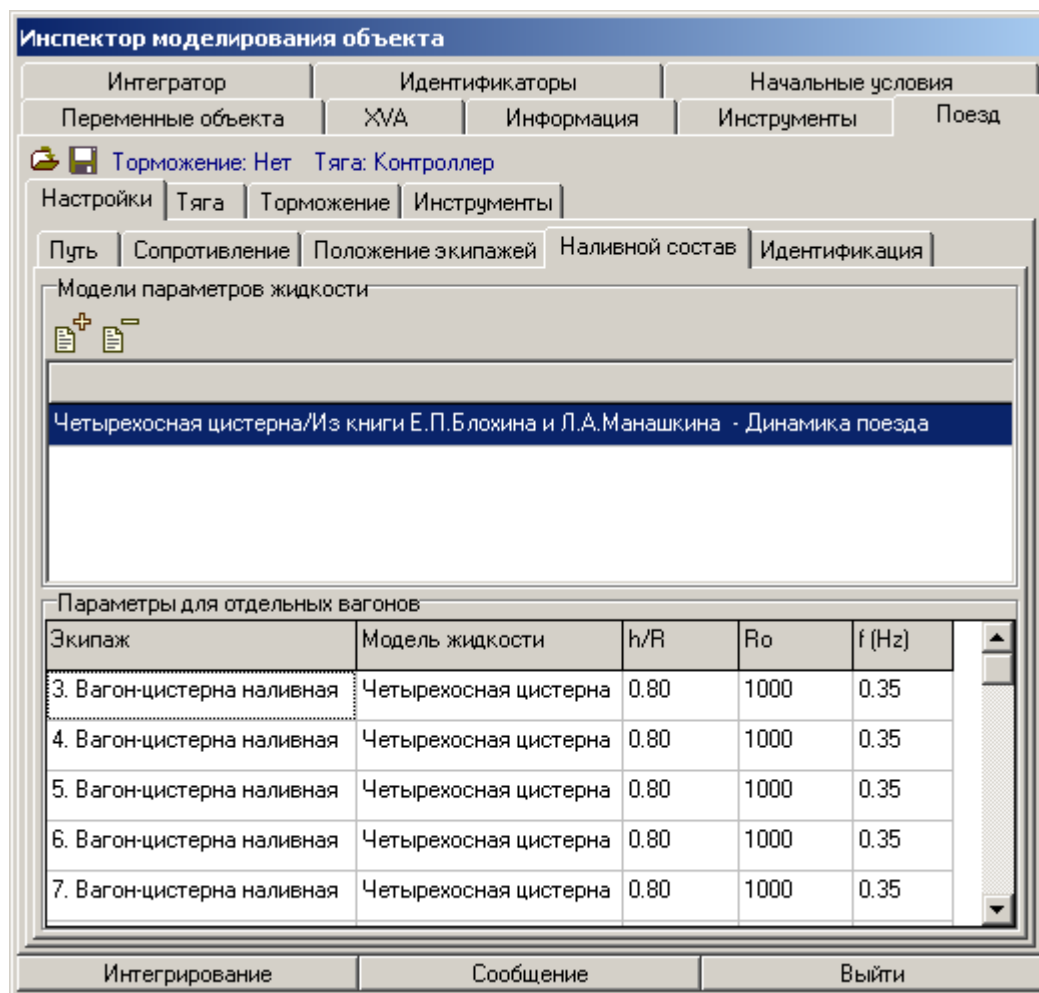


Рис. 15.31. Закладка задания параметров вагонов-цистерн

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 ( $\text{кг/м}^3$ ), значение по умолчанию –  $1000 \text{ кг/м}^3$ . В столбце **f (Hz)** рассчитывается частота собственных колебаний груза, моделирующего жидкость, по введенным параметрам.

### 15.5.8. 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 и режим  $x(t)=const$  для удержания на месте экипажа поезда, рис. 15.32. Рассмотрим эти режимы более подробно:

- **Пользовательский** – в этом режиме на тягу не заданы ограничения (кроме ограничения по сцеплению) – пользователь самостоятельно управляет силой тяги. Например, пользователь может менять значения идентификаторов *throttle\_position* и *dynamic\_brake\_position*, а тем самым управлять силой тяги или динамического тормоза в процессе моделирования с помощью пульта управления.
- **Контроллер** – задание режима тяги по графику позиции контроллера машиниста. График может быть загружен для любого из локомотивов поезда, см. п. 15.5.8.1. "Задание графиков режимов тяги", с. 15-36.
- $F=F(t)[F(s)]$  – задание режима тяги по графику силы тяги. График может быть загружен для любого из локомотивов поезда, см. п. 15.5.8.1. "Задание графиков режимов тяги", с. 15-36.
- $v=v(t)[v(s)]$  – задание режима тяги по графику скорости экипажа. График может быть задан для любого локомотива.
- **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.
- $x(t)=const$  – в этом режиме указанный экипаж удерживается силой в положении, заданном начальными условиями.

**Важно!** Сила тяги ограничивается силой сцепления, рассчитываемой как произведение веса локомотива, коэффициента трения между колесом и рельсом и коэффициента использования сцепного веса, см. п. 15.3. "Модель поезда", с. 15-6.

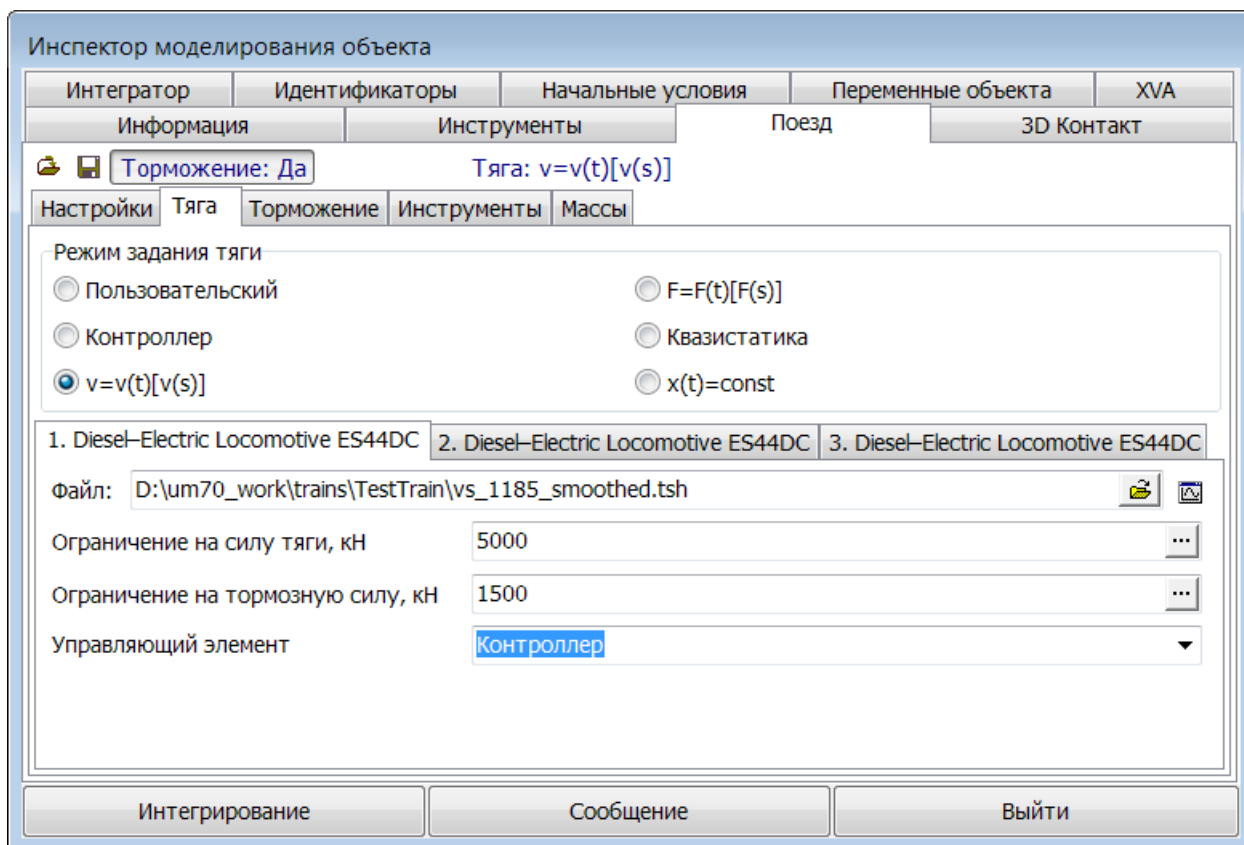



Рис. 15.32. Закладка задания режима тяги

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

### 15.5.8.1. Задание графиков режимов 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.

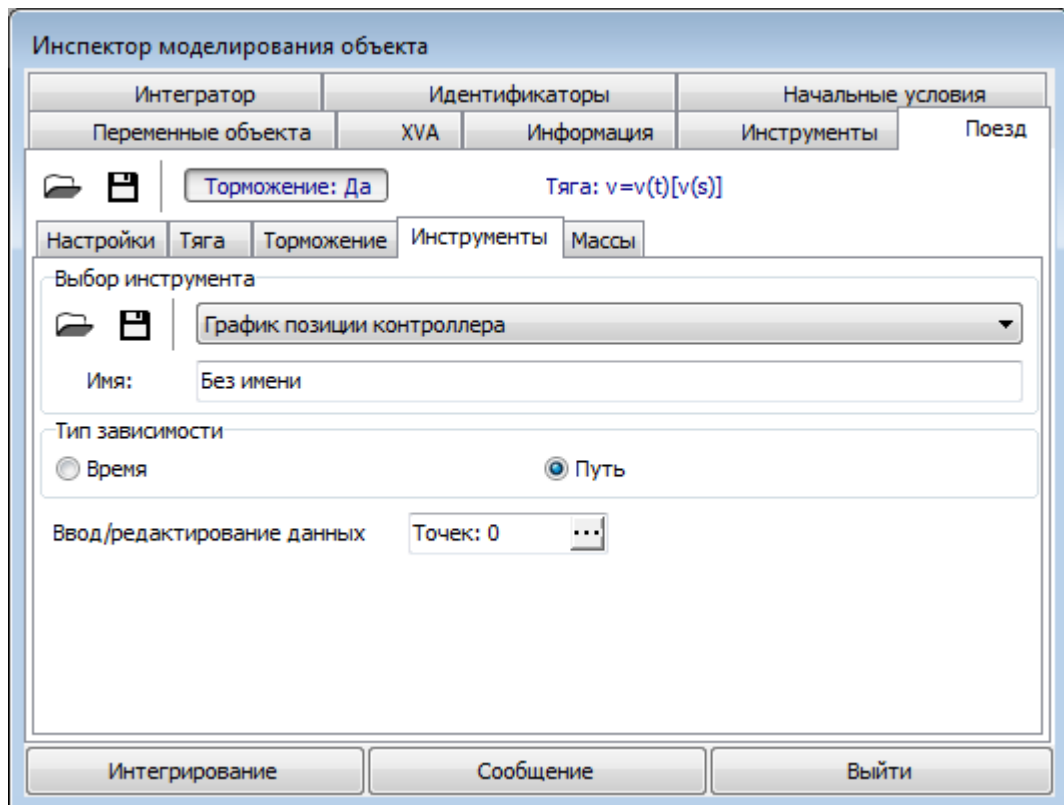


Рис. 15.33. Закладка Инструменты

### 15.5.8.2. Идентификация параметров тяги

Для задания тяговых режимов программа должна идентифицировать, какие из экипажей являются локомотивами. Для упрощенных моделей это делается добавлением в модель идентификатора *throttle\_position*, который задает номер позиции контроллера машиниста. Для трехмерной модели необходимо задать комментарий *locomotive* объекту.

На закладке **Поезд | Настройки | Идентификация** для каждого локомотива указываются идентификаторы, которые задают номер позиции контроллера тяги *throttle\_position* и номер позиции динамического тормоза *dynamic\_brake\_position*, рис. 15.34. Как правило, эти идентификаторы являются идентификаторами кривой в шарнирной силе типа *Список характеристик*, которые содержит тяговые и тормозные кривые. Выбранные на этой закладке идентификаторы используются при движении в режиме тяги по позиции контроллера, а также в режиме движения по графику скорости, см. п. 15.5.9. "Режим тяги по графику скорости", с. 15-39.

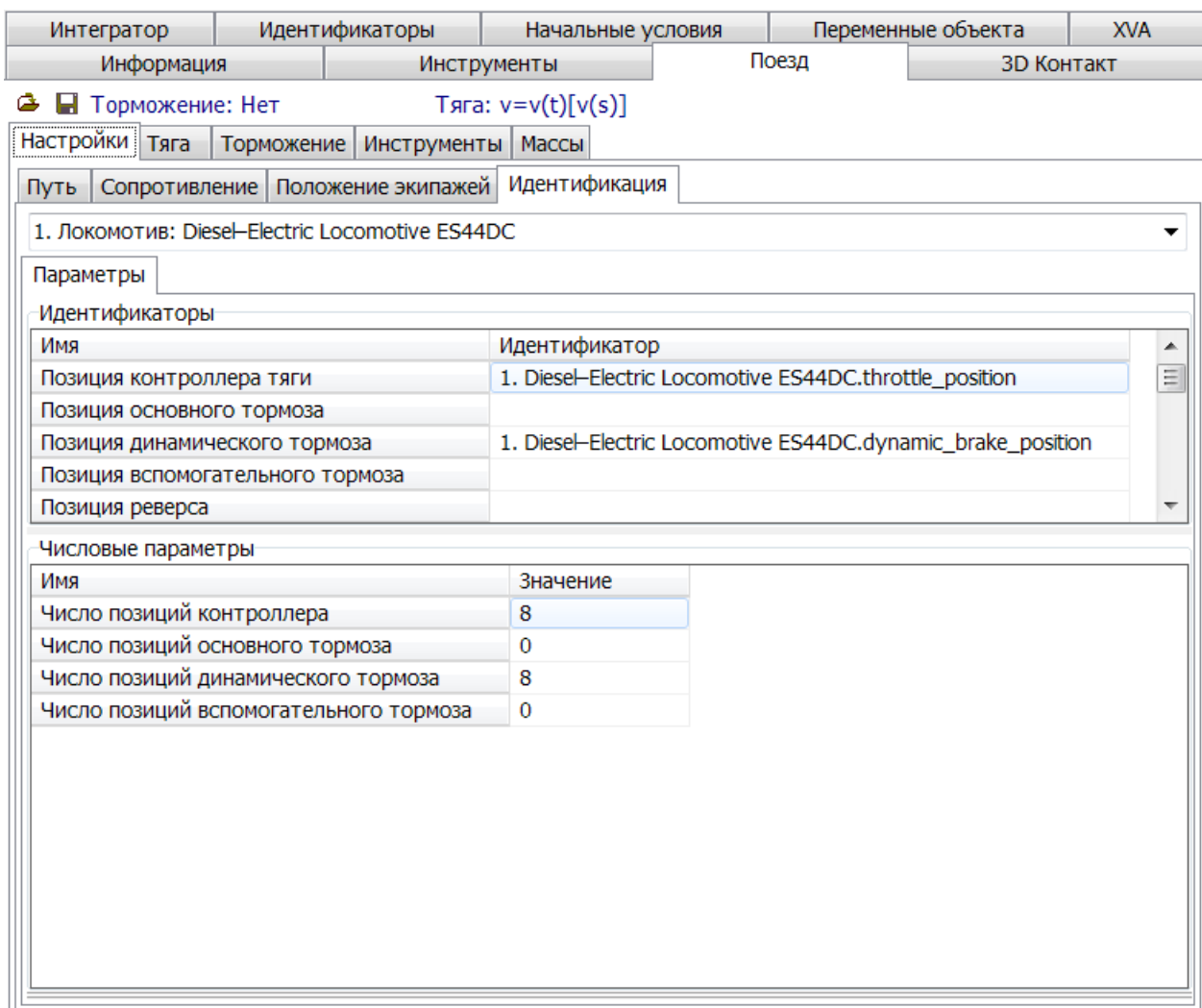


Рис. 15.34. Закладка идентификации параметров

### 15.5.9. Режим тяги по графику скорости

В режиме тяги по графику скорости к поезду прикладывается управляющая сила, обеспечивающая его движение с требуемой скоростью, см. п. 15.5.8.1. *"Задание графиков режимов тяги"*, с. 15-36. Управляющая сила рассчитывается на основе уравнения движения поезда, таким образом, чтобы уравновесить текущую силу сопротивления движению и силу инерции поезда. Полученная сила делится поровну между всеми локомотивами, входящими в модель поезда.

Экипаж поезда, которому будет назначен график скорости, выбирается из списка **Экипаж поезда**. Далее назначается файл профиля (графика) скорости. График скорости предварительно создается на закладке **Поезд | Инструменты**, см. п. 15.5.8.1. *"Задание графиков режимов тяги"*, с. 15-36.

В списке **Управляющий элемент** выбирается режим движения по профилю скорости. В программе реализованы два режима движения по графику скорости:

- по **управляющей силе** – в этом режиме к локомотиву прикладывается непосредственно рассчитанная управляющая сила с учетом ограничений на силу тяги и торможения, а также ограничения по сцеплению.
- по **контроллеру** – выбирается такая позиция контроллера, которая обеспечивает ближайшее значение силы к рассчитанной управляющей силе. При этом в зависимости от знака управляющей силы выбирается позиция либо тяги, либо динамического тормоза. Таким образом, для движения в этом режиме должны быть заданы идентификаторы и для позиции тяги, и для позиции динамического тормоза, см. п. 15.5.8.2. *"Идентификация параметров тяги"*, с. 15-38.

При управлении по контроллеру учитывается параметр **Ширина зоны нечувствительности**. Этот параметр может иметь значение от нуля до единицы, где единица соответствует ширине зоны равной разности сил между двумя соседними позициями контроллера. Ширина зоны нечувствительности показывает, на какую относительную величину должна измениться управляющая сила после перехода на соседнюю позицию контроллера, для того чтобы позиция контроллера вернулась обратно на предыдущую позицию. Увеличение ширины зоны нечувствительности помогает уменьшить "дрожание" позиции контроллера, но при этом смещает точки перехода позиций контроллера.

На величину рассчитанной управляющей силы можно накладывать ограничения с помощью значений, заданных в полях **Ограничение на силу тяги, кН** и **Ограничение на тормозную силу, кН**, рис. 15.35.

**Важно!** Управляющая сила, которая фактически является силой тяги или торможения локомотива, ограничивается силой сцепления, рассчитываемой как произведение веса локомотива, коэффициента трения между колесом и рельсом и коэффициента использования сцепного веса, см. п. 15.3. *"Модель поезда"*, с. 15-6.

График рассчитанной управляющей силы, приходящейся на один локомотив, без учета каких-либо ограничения можно построить с помощью рассчитываемой переменной **ControlForce**, см. п. 15.6. "Рассчитываемые переменные", с. 15-41. График управляющей силы с учетом ограничения на силу тяги или торможения строится с помощью переменной **RestrictedControlForce**.

Переменная **RealizedTractionForce** содержит реализованную силу тяги или торможения, то есть силу с учетом ограничения по сцеплению. Это общая переменная и работает при любом режиме тяги.

**Важно!** Если при моделировании в тормозных цилиндрах хотя бы одного экипажа давление больше нуля, см. п. 15.5.6. "Тормозное оборудование", с. 15-24, то управляющая сила, независимо от рассчитанного значения, приравнивается нулю.

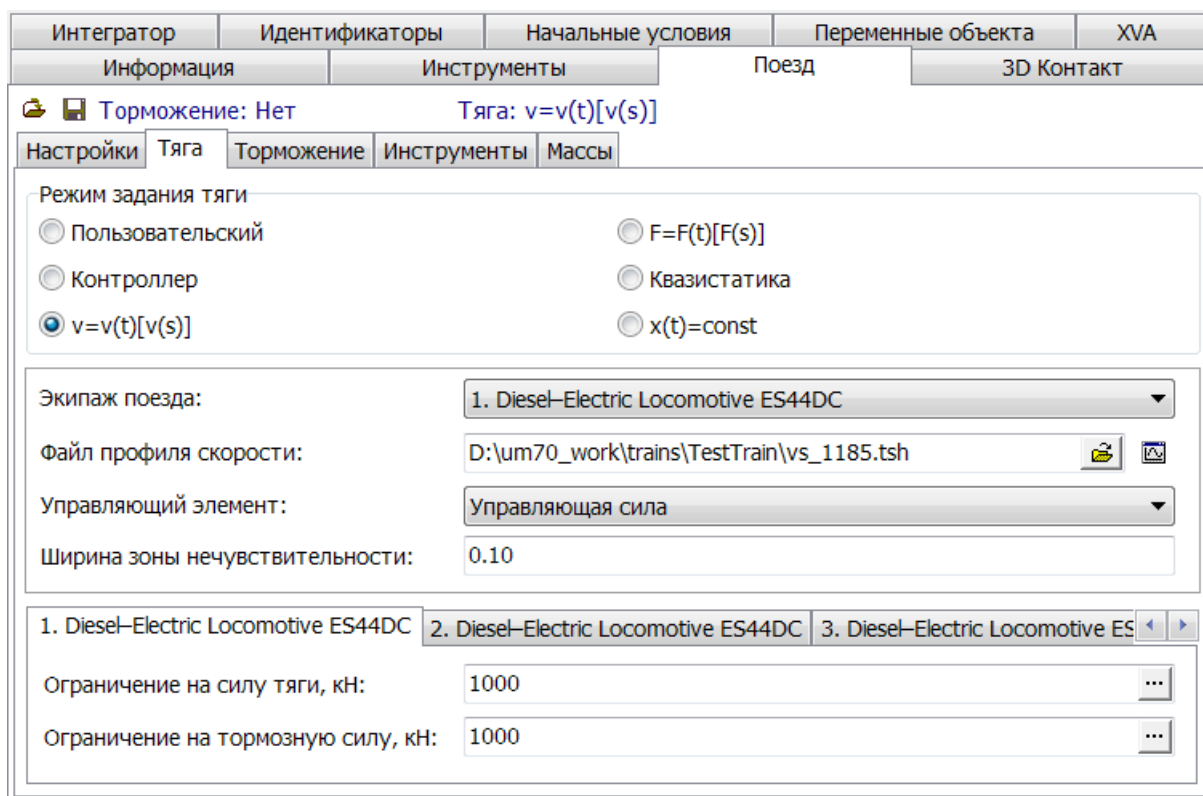


Рис. 15.35. Параметры режима движения по графику скорости

## 15.6. Рассчитываемые переменные

Здесь приведены только переменные, относящиеся к моделированию поезда. Эти переменные находятся на закладке **Поезд Мастера переменных**.

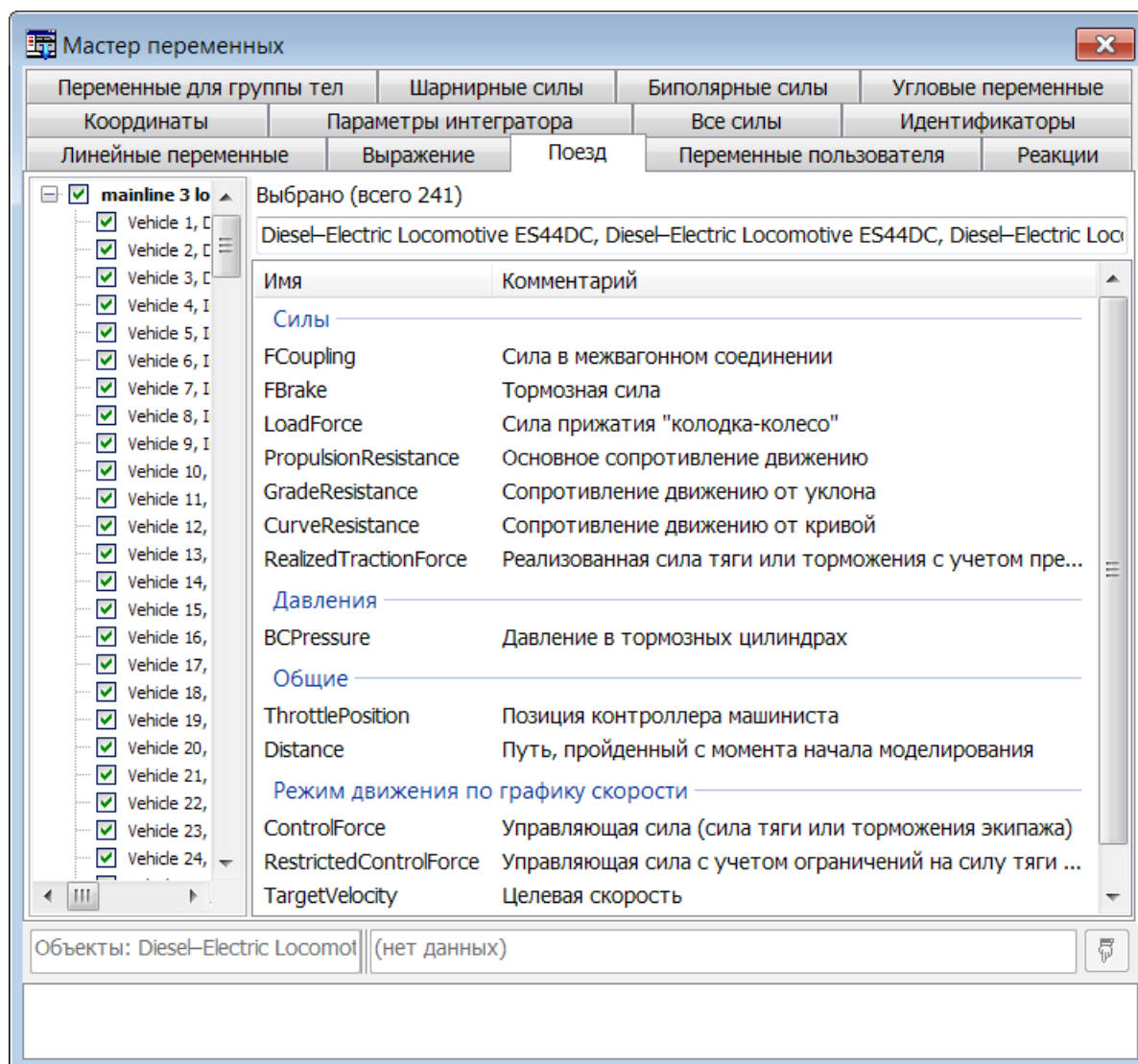


Рис. 15.36. Рассчитываемые переменные

На закладке **Поезд** находятся следующие рассчитываемые переменные:

- **FCoupling** – сила в межвагонном соединении со следующим экипажем, Н;
- **FBrake** – полная тормозная сила экипажа, Н;
- **LoadForce** – сила нажатия колодки на колесо, Н;
- **PropulsionResistance** – общая сила сопротивления движению, действующая на экипаж, Н;
- **GradeResistance** – сила сопротивления движению от уклона, действующая на экипаж, Н;
- **CurveResistance** – сила сопротивления от движения в кривой, действующая на экипаж, Н;

- **RealizedTractionForce** – реализованная сила тяги или торможения с учетом ограничения по сцеплению, Н;
- **BCPressure** – давление в тормозных цилиндрах экипажа, Па;
- **ThrottlePosition** – позиция контроллера машиниста для локомотива;
- **Distance** – путь, пройденный поездом с начала моделирования, м;
- **ControlForce** – управляющая сила, рассчитанная в режиме движения по графику скорости, без учета ограничения на силу тяги и торможения и ограничения по сцеплению, Н;
- **RestrictedControlForce** – управляющая сила, рассчитанная в режиме движения по графику скорости, с учетом ограничения на силу тяги и торможения и без учета ограничения по сцеплению, Н;
- **TargetVelocity** – целевая скорость в режиме движения по графику скорости (фактически значение скорости из загруженного файла), м/с.

## 15.7. Модель поезда Train60

В поставке программного комплекса имеется пример модели поезда, состоящего из тепловоза 2ТЭ10 и 58 грузовых вагонов, рис. 15.37.

Путь к модели: [{Данные УМ}\Samples\Trains\Train60.](#)

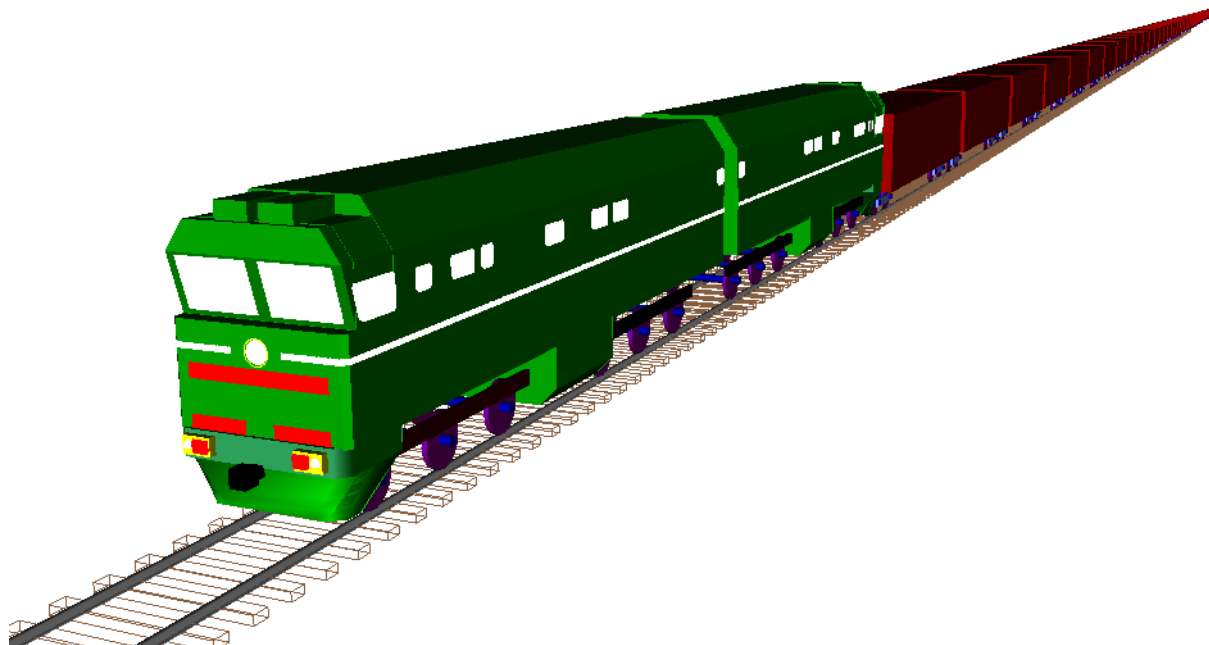


Рис. 15.37. Модель поезда Train60

## Список литературы

- [1] Блохин Е.П., Манашкин Л.А., Динамика поезда (нестационарные продольные экипажи). – М: Транспорт, 1982. – 222 с.
- [2] Правила тяговых расчетов для поездной работы. Утверждены распоряжением ОАО "РЖД" 12.05.2016 г. № 867р. 514 с.