

Е. П. БЛОХИН, д.т.н., профессор, ДИИТ (Украина);

К. И. ЖЕЛЕЗНОВ, ст.н.с., ДИИТ (Украина);

Л. В. УРСУЛЯК, к.т.н., доцент, ДИИТ (Украина)

ОТ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ ДО НЕЛИНЕЙНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МНОГОМАССОВОЙ МОДЕЛИ ПОЕЗДА

Розвиток науки про динаміку поїзда за останні 200 років.

Развитие науки о динамике поезда за последние 200 лет.

Development of the science about dynamics of a train for last 200 years.

Создание паровой тяги и путей сообщения достаточно большой протяженности привело к необходимости производства тяговых расчетов с целью определения времени хода, тормозных путей, выработки требований к режимам ведения поезда. Первой расчетной схемой поезда при этом стала материальная точка, впитавшая в себя массу поезда и остальные присущие ему характеристики (тяговые, тормозные и прочие). С увеличением длины состава в качестве расчетной схемы стали использовать гибкую нерастяжимую нить (состав) с грузом (локомотив) на конце. Эта расчетная схема и сейчас с успехом используется в тяговых расчетах и расчетах, которые связаны с выбором оптимальных по затратам энергии траекторий движения, используемых в режимных картах и тренажерах машинистов магистральных локомотивов.

С увеличением масс и длин поездов, особенно грузовых, повышением мощностей локомотивов потребовалось определять возникающие при стационарных и переходных режимах движения поезда продольные силы в нем, необходимые при расчете конструкций локомотивов, вагонов, элементов их соединяющих, тормозных устройств. Для решения этих задач отцом русской авиации Николаем Егоровичем Жуковским в 1919 году были предложены две расчетные схемы поезда: одна в виде упругого стержня с грузом на конце и другая в виде одномерной цепочки твердых тел, соединенных упругими связями. В первом случае задача сводилась к решению при определенных начальных и граничных условиях дифференциального уравнения второго порядка в частных производных, а во втором – к решению системы линейных однородных дифференциальных уравнений второго порядка. Естественно, что рассеивания энергии при продоль-

ных колебаниях поезда при этом не учитывалось и найденные с помощью расчетов осциллограммы продольных сил в нем отличались от реализуемых в реальных условиях.

Всеволод Арутюнович Лазарян в своей докторской диссертации, которую он, работая в ДИИТе, защитил в 30 лет в Ленинградском институте путей сообщения, предложил учитывать при колебаниях рассеивание энергии и рассматривать поезд как упруго-вязкий стержень с грузом (локомотив) на конце, либо как одномерную систему твердых тел, соединенных упруго-вязкими связями. Эти расчетные схемы использовались в работах В. А. Лазаряна, Е. П. Блохина, И. Г. Барбаса, Т. А. Городецкой, А. И. Стукалова, А. А. Уланова, Ф. В. Флоринского. Поставленные В. А. Лазаряном в реальных условиях многочисленные специальные опыты с поездами, подтвердили правомочность применения, в ряде случаев, упомянутых расчетных схем и позволили найти необходимые для расчетов многие характеристики грузовых и пассажирских поездов (скорость бега волны возмущений при пуске в ход и торможениях, продольную жесткость состава, жесткость межвагонных соединений при нагрузке и разгрузке, среднестатистические значения зазоров в межвагонных соединениях).

Естественно, что при этом задавались переходные режимы движения, на которые зазоры в упряжи поезда не влияют (пуск в ход предварительно растянутых и торможение с головы предварительно сжатых поездов, движение растянутого поезда по перелому пути типа «горб» и сжатого по перелому типа «яма»). Во всех этих случаях практически совпадали не только графики распределения вдоль состава максимальных значений продольных усилий, полученные расчетом и по итогам экспериментов, но и осциллограммы продольных усилий в се-

чениях поездов при различных переходных режимах.

В качестве примера ниже показаны распределения максимальных продольных сил по длине поезда при пуске в ход однородного и неоднородного поездов (рис. 1) и движении со скоростью 70 км/ч по перелому продольного профиля пути с разностью уклонов 8,6‰ (рис. 2). В неоднородном опытном поезде головная часть состава была сформирована из порожних четырехосных вагонов, а хвостовая – из таких же, но полностью загруженных. Сплошные линии получены аналитическим расчетом, квадратики и треугольники соответствуют результатам опытных поездок. На приведенных графиках S/F_t – отношение продольного усилия в данном сечении к продольному усилию в автосцепке между локомотивом и первым вагоном.

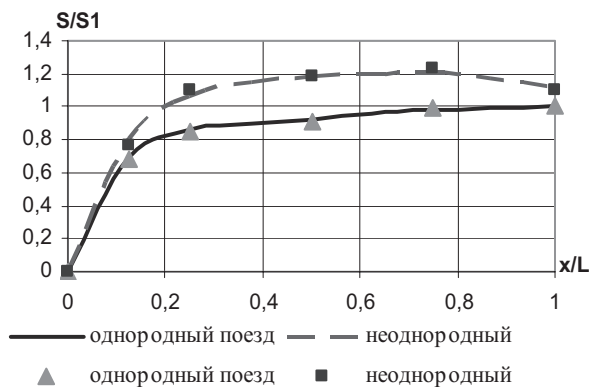


Рис. 1. Распределение максимальных продольных сил по длине поезда при пуске в ход

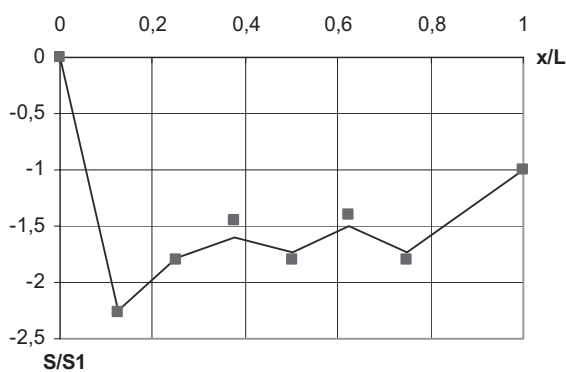


Рис. 2. Распределение максимальных продольных сил по длине поезда при движении со скоростью 70 км/ч по перелому продольного профиля пути с разностью уклонов 8,6 ‰

На рис.3 и 4 приведены осциллограммы сил в нескольких сечениях при трогании предварительно растянутого однородного и неоднородного (головная часть состава состоит из однородных порожних 4-хосных полувагонов, хвостовая – из полностью загруженных) поездов

соответственно. Точками на опытные осциллограммы нанесены результаты аналитического расчета.

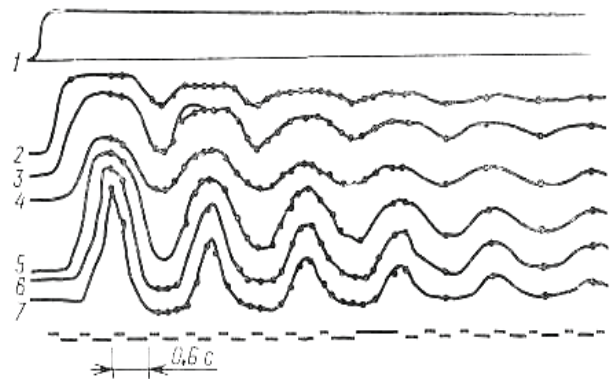


Рис. 3. Осциллограммы сил при трогании однородного предварительно растянутого поезда

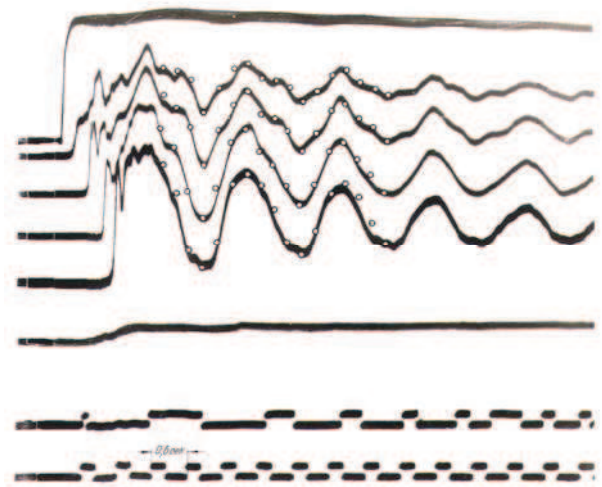


Рис. 4. Осциллограммы сил при трогании неоднородного предварительно растянутого поезда

Линейная постановка задач позволяла использовать при решении аналитические методы и созданную в лаборатории динамики и прочности подвижного состава электрическую модель на пассивных элементах (R, L, C).

Однако такая постановка задачи не позволяла теоретическим путем найти верхние границы продольных сил, которые в общем случае могут возникать в поезде при тех или иных переходных режимах его движения, вызывая аварийные ситуации.

Эксперименты и выполненные в последующем расчеты показали, что на уровень наибольших значений растягивающих и сжимающих сил влияет не столько форма силовой характеристики межвагонного соединения, сколько величина зазора в этом соединении, значение которого достигает в эксплуатации 100 мм. В общем случае зазоры в упряжи особенно грузовых поездов всегда себя проявляют.

Наибольшее влияние они оказывают на значения продольных сил при пуске предварительно сжатого (частично или полностью) с головы поезда, торможении с локомотива предварительно растянутого поезда, при движении по пути ломаного профиля. Следует заметить, что имеющие ударный характер растягивающие силы способны разорвать не только упряжь, но и конструкцию самого вагона (рис.5), а сжимающие силы, имеющие квазистатическую составляющую определенного уровня, выдавить из состава поезда не только порожний, но и груженный четырехосный вагон.



Рис. 5. Разрушение конструкции вагона под влиянием продольных сил в поезде

Наличие в упряжи зазоров и в общем случае нелинейности силовых характеристик поглощающих аппаратов автосцепки заставляет рассматривать поезд как цепочку твердых тел, соединенных связями с нелинейными характеристиками. Такая расчетная схема приводит к системе существенно нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, решение которой аналитическим путем получить нельзя. Исследования переходных режимов движения поездов в рассматриваемой постановке впервые были начаты в ДИИТе на кафедре строительной механике под руководством В. А. Лазаряна. Для этой цели была использована специальная электронная модель поезда, выполненная на базе трех аналоговых вычислительных машин типа МПТ-9. Известно, что одним из достоинств АВМ является получение решений в реальном масштабе времени, что

очень важно в случае применения систем автоматического управления. Эти модели были использованы во многих работах В. А. Лазаряна, Л. А. Манашкина, А. В. Рыжова, Е. П. Блохина, И. Г. Барбаса, А. И. Стукалова, В. А. Каблукова, В. А. Музыкаина, Е. Ю. Трубицкой.

Появление цифровых вычислительных машин и использование современных вычислительных методов позволили существенно расширить круг важных для отрасли задач. При этом, получаемые в результате решения системы нелинейных дифференциальных уравнений осциллограммы продольных усилий можно сравнивать с полученными экспериментально лишь качественно, но распределение вдоль состава максимальных значений продольных сил, найденных расчетом и экспериментально, согласуются достаточно неплохо (рис. 6-8). Сплошной линией показаны результаты, полученные с помощью ЦВМ, крестиками нанесены результаты электронного моделирования, а кружочками – усредненные по четырем опытам данные.

Естественно, что такое согласование может быть получено лишь при условии использования в расчете достоверных механических характеристик поезда, профиля и плана пути, а также данных о распределении зазоров в упряжи к началу переходных процессов. С использованием ЦВМ были изучены переходные режимы движения грузовых и пассажирских поездов при пуске их вход, при торможении, при движении по пути ломаного профиля. При этом рассматривались поезда однородные и неоднородные, в том числе поезда, содержащие вагоны с подвижными грузами, оборудованные поглощающими аппаратами автосцепки и воздухораспределителя разных типов. С использованием ЦВМ решено наибольшее количество, связанных с продольной динамикой поезда задач, решенных в разное время В. А. Лазаряном, Е. П. Блохиным, Г. И. Богомазом, Л. В. Белик, Н. И. Грановской, К. И. Железновым, Л. А. Манашкиным, Л. Г. Маслеевой, А. В. Рыжовым, Е. Л. Стамблером, Л. В. Урсуляк. Результаты этих исследований были использованы при проектировании новых типов поглощающих аппаратов и воздухораспределителей, при разработке способов управления движением обычных и соединенных поездов и создании соответствующих режимных карт, при пересмотре Строительных норм и правил (СНиП П-39.76), при выборе параметров, созданной в ДИИТе автономной системе автоматического управления вспомогательным локомотивом,

находящимся в составе соединенного поезда, при разработке энергосберегающих способов ведения поездов и создании на базе компьютерных технологий тренажеров для обучения машинистов, при создании систем защиты котлов цистерн в случае аварийных ситуаций.

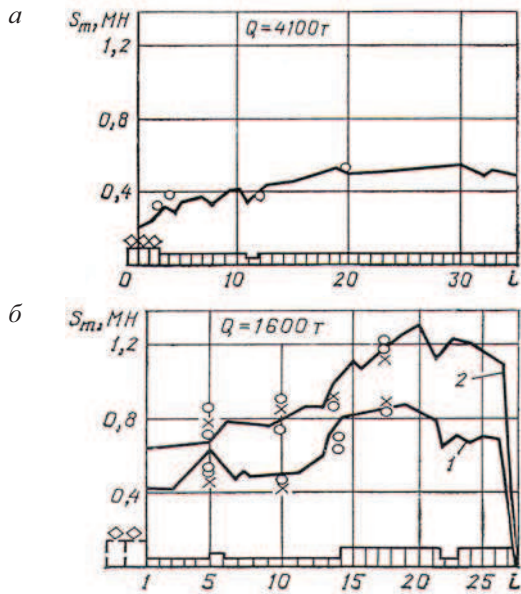


Рис. 6. Распределение максимальных сил при трогании сжатых однородного поезда массой 4100 т (а) и неоднородного поезда массой 1600 т (б) (*i* – номер вагона)

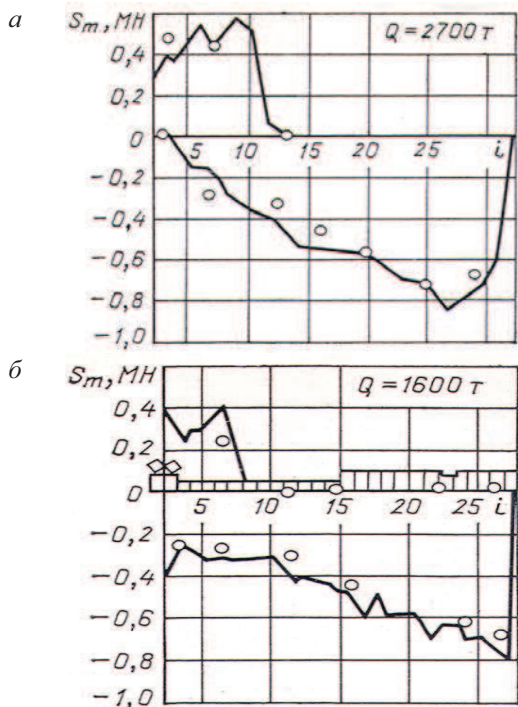


Рис. 7. Распределение максимальных сил вдоль однородного (а) и неоднородного (б) поездов при экстренном торможении со скорости 10 км/ч

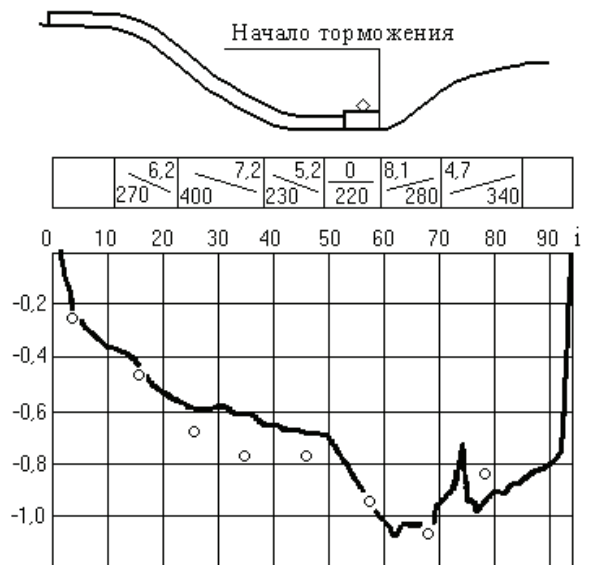


Рис. 8. Регулировочное торможение при движении поезда по пути ломаного профиля

Необходимость поиска причин крушений и аварий с поездами, являлась одной из причин, заставивших рассматривать пространственные колебания вагонов, находящихся в составе поезда. В этом случае бывает достаточно рассматривать колебания сошедшего с рельса вагона (или группы вагонов) под влиянием продольных сил, передающихся со стороны остальной части поезда. С использованием именно такого подхода были исследованы путем математического моделирования причины ряда крушений поездов на железных дорогах России и Украины.

Задача о продольных колебаниях поезда решается следующим образом. В качестве расчетной схемы используется одномерная цепочка тел (экипажей), соединенных между собой существенно нелинейными деформируемыми элементами, учитывающими наличие зазоров в упряжи. Движение экипажа описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} V_j = \frac{S_j + F_{bj} + W_{oj} + W_{pj} + F_t}{m_j} \\ \dot{x}_j = V_j \end{cases}, \quad (1)$$

где S_j – продольная сила, действующая в j -ой связи, F_{bj} – тормозная сила, действующая на j -й экипаж, W_{oj} – сила основного сопротивления поступательному движению поезда для j -го экипажа, W_{pj} – сила сопротивления от профиля пути для j -го экипажа, F_t – сила тяги

или сила, вызванная электрическим торможением, x_j, V_j, \dot{V}_j – соответственно пройденный путь, скорость и ускорение j -го экипажа.

Указанная система дифференциальных уравнений решается с использованием численных методов интегрирования, которые выбраны с учетом особенностей дифференциальных уравнений и получаемых решений [1, 2]. В предлагаемом вычислительном комплексе в зависимости от решаемых задач возможно использование как метода Адамса-Башфорта-Мультона так и метода Хемминга.

Указанные методы относятся к группе сильно устойчивых [3]. Применение именно таких методов вызвано спецификой тех задач, решение которых требуется рассматривать на довольно длинных отрезках интегрирования.

При исследовании динамической нагруженности поездов предусмотрена возможность моделирования движения соединенных поездов с расположением локомотивов вдоль состава. Полагается, что все локомотивы должны быть одного типа. Управлять локомотивами можно как синхронно, так и по режимной карте (перечень режимов управления в зависимости от времени или скорости движения или пути), которая задается для каждого локомотива как начальная информация для расчета.

Как известно, величины продольных усилий S_j – зависят от величины относительных продольных перемещений (x_j) соседних экипажей q_j и скорости \dot{q}_j , которые определяются следующим образом:

$$\begin{cases} q_j = x_j - x_{j+1} \\ \dot{q}_j = V_j - V_{j+1} \end{cases} \quad (2)$$

В случае оборудования междвагонного соединения одинаковыми поглощающими аппаратами автосцепки для определения продольных сил используется метод, описанный в [1, 4]. Если в междвагонном соединении оказываются аппараты с отличающимися между собой характеристиками, то продольное усилие определяется из следующего условия:

$$\begin{cases} S_j^n = S_j^3 = S_j \\ q_j^n + q_j^3 = q_j \end{cases} \quad (3)$$

где S_j^n и S_j^3 – значения продольных усилий в переднем и заднем поглощающих аппаратах

соответственно; q_j^n и q_j^3 – деформации соответствующих поглощающих аппаратов.

При моделировании тормозных процессов, происходящих в поездах, учитывается, что в зависимости от типа экипажа возможны различные типы торможений: пневматическое (грузовые и пассажирские вагоны), электропневматическое (пассажирские вагоны), электрическое (локомотивы), а также торможение, вызванное аварийным режимом – разрыв тормозной магистрали. При этом предполагается, что тормозная магистраль может быть как сквозной, так и автономной, а рассредоточенные локомотивы могут управляться синхронно или по каким-то другим правилам.

Сила нажатия на тормозную колодку определяется состоянием воздухораспределителя, который может создавать в тормозном цилиндре давление сжатого воздуха, соответствующее величине разрядки тормозной магистрали или полному или частичному (при ступенчатом отпуске) выпуску сжатого воздуха из цилиндров при повышении давления в магистрали.

При регулировочном торможении снижение скорости движения поездов может быть произведено I-ой, II-ой или III-ей ступенями торможений. В зависимости от выбранной ступени предполагается, что тормозной цилиндр наполняется сжатым воздухом соответственно на 40%, 60% и 88% от максимального значения давления. Максимальные значения давления воздуха в тормозном цилиндре зависят от режимов работы воздухораспределителя; их значения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Максимальное давление в тормозном цилиндре

Режим в/р	Давление, атм
груженный	3,8
средний	2,5
порожний	1,5

При исследовании различных видов торможений задается вид торможения (ступень регулировочного торможения, ПСТ, ЭТ или падение давления, вызванное разрывом тормозной магистрали в заданном сечении поезда). В соответствии с этим моделируется работа воздухораспределителя и определяются значения сил нажатия в каждый момент времени. Воздухораспределитель на каждом экипаже срабатывает в момент прихода тормозной волны от источника разрядки тормозной магистрали. Изменение силы нажатия на тормозную колодку

$k_j(t)$ в процессе наполнения тормозного цилиндра происходит по экспоненциальному закону, а при выпуске сжатого воздуха – по линейному закону. При определении силы нажатия учитывается этап подвода тормозных колодок и время наполнения тормозных цилиндров, которое зависит от вида торможения (ПСТ или ЭТ), режима работы воздухораспределителей на пассажирских вагонах (длинносоставный или короткосоставный), а также места нахождения данного экипажа по отношению к источнику разрядки тормозной магистрали.

Сила, действующая на локомотив в тяговом режиме или при электрическом торможении F_t , определяется согласно заданным тяговым или тормозным характеристикам, соответствующим выбранному локомотиву.

Сила основного сопротивления поступательному движению поезда для j -го экипажа W_{oj} зависит от типа экипажа (грузовой, пассажирский вагоны или локомотив), и вида пути (стыковой или бесстыковой). Для грузовых вагонов при определении W_{oj} учитывается также тип подшипников (качения или скольжения), нагрузка на ось и количество осей. При вычислении указанной силы для локомотивов учитывается режим движения (тяговый).[5]

Сила сопротивления от профиля пути для j -го экипажа определяется по формуле

$$W_{pi} = \left(-i - \frac{200}{R} - 1,495 \frac{V_j^2}{R} + 9,197 H_r \right) \cdot 0,001 g m_j \quad (4)$$

где i – величина уклона в промилле (знак уклона задается согласно правилам тяговых расчетов: на спуске со знаком «-», на подъеме со знаком «+»), V_j – скорость экипажа, R – радиус круговой кривой в плане, H_r – возвышение наружного рельса [5]. В приведенной формуле величины радиуса круговой кривой и возвышения наружного рельса изменяются на входной и выходной кривых от нуля до заданного значения.

Кроме модели, имитирующей продольные колебания поезда и позволяющей оценить продольные силы, ускорения, тормозные пути и т.п., нами разработано программное обеспечение для изучения пространственных колебаний вагона (или группы вагонов), движущегося в составе поезда. Пространственная модель позволяет оценить так же динамические показатели, среди которых наиболее важным является

показатель, характеризующий безопасность движения экипажа – коэффициент запаса устойчивости от схода колеса с рельса.

Для построения пространственных моделей использован объектно-ориентированный подход. При этом модель экипажа разбивается на отдельные объекты и связи между ними. Объектами здесь называются недеформируемые элементы конструкции экипажа, имеющие определенные инерционные свойства (параметры). Связи – это деформируемые элементы конструкции, предназначенные для соединения объектов между собой. Связи могут быть различными по типу: упруго-вязкие или упруго-фрикционные (линейные или билинейные), типа «сухое трение», связи, учитывающие явления крипа (между колесом и рельсом) и т.д.

В качестве объектов могут быть выбраны, например, все инерционные конструктивные элементы, или часть из них, которая может быть объединена в один объект; при этом остальные могут выступать в качестве отдельных объектов. Все объекты имеют как минимум один инерционный параметр – массу. Кроме этого объекты могут иметь и другие инерционные параметры – моменты инерции относительно главных центральных осей (если есть необходимость рассмотреть угловые колебания объектов). Кроме этого для каждого объекта задаются координаты его центра масс. Вертикальная координата задается относительно уровня головки рельса (ясно, что при этом вертикальные координаты центров масс рельсов равны нулю). Поперечные координаты – относительно оси пути, а продольные – относительно первой колесной пары рассматриваемого экипажа.

Как известно, положение любого объекта в любой момент времени определяется шестью координатами. Уравнения движения рассматриваемого объекта в декартовых координатах имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} m \cdot x &= \sum_{i=1}^n F_{xi} + \sum_{k=1}^m R_{xk} \\ m \cdot y &= \sum_{i=1}^n F_{yi} + \sum_{k=1}^m R_{yk} \\ m \cdot z &= \sum_{i=1}^n F_{zi} + \sum_{k=1}^m R_{zk} + W, \\ J_x \cdot \theta &= \sum_{i=1}^n M_{xi} + \sum_{k=1}^m MR_{xk}, \\ m \cdot \phi &= \sum_{i=1}^n M_{yi} + \sum_{k=1}^m MR_{yk}, \\ m \cdot \psi &= \sum_{i=1}^n M_{zi} + \sum_{k=1}^m MR_{zk}, \end{aligned} \quad (5)$$

где F_{xi}, F_{yi}, F_{zi} – проекции внешних сил на оси x, y, z соответственно; R_{xk}, R_{yk}, R_{zk} – проекции реакций связей на оси x, y, z соответственно; M_{xi}, M_{yi}, M_{zi} – моменты внешних сил F_i относительно осей x, y, z соответственно; $MR_{xk}, MR_{yk}, MR_{zk}$ – моменты реакций R_j относительно осей x, y, z соответственно; X, Y, Z – ускорения объектов вдоль осей x, y, z ; $\ddot{\theta}, \ddot{\phi}, \ddot{\psi}$ – угловые ускорения объектов при вращении их вокруг осей x, y, z соответственно; J_x, J_y, J_z – моменты инерции относительно главных центральных осей x, y, z соответственно, m – масса объекта, W – вес объекта.

В уравнениях (5) для каждого объекта суммирование по i и k производится алгебраически с учетом знака силы и момента. Внешняя сила F имеет положительный знак, если ее направление совпадает с положительным направлением оси, реакция в связи для «верхнего» объекта (центр тяжести масс, которого расположен выше относительно уровня головки рельса) определяется знаком относительной деформации. Деформация будет положительна при растяжении. Для «нижнего» объекта эта реакция будет иметь противоположный знак.

Момент будет положительным, если его направление совпадает с положительным направлением углового ускорения ($\ddot{\theta}, \ddot{\phi}, \ddot{\psi}$).

Как видно из уравнений движения тела (5), в правые части входят реакции связей R_{xk}, R_{yk}, R_{zk} , которые зависят от типа связи и величины относительных перемещений объектов.

Как было сказано выше, связи – это деформируемые элементы конструкции экипажа. Характерной и очевидной связью являются рессорные комплекты, имеющие реальные деформируемые пружины. Однако, для унификации построения модели в качестве связей рассматривают так же элементы, не имеющие в реальной конструкции деформируемых элементов, но служащие той же цели – объединение инерционных элементов конструкции в единое целое. Поэтому, в пространственной модели связями так же являются места соединения инерционных элементов между собой. Такие связи имеют большие значения жесткостей, а поглощение энергии в таких связях, при необходимости, учитывается с помощью коэффициентов вязкости конструкции или с помощью коэффициентов трения, когда соединяемые элементы

конструкции могут перемещаться друг относительно друга, например, в пределах зазора, как это имеет место в пятниковом узле грузового вагона.

Такой подход позволяет при интегрировании рассматривать не шесть (по числу степеней свободы), а всего одно дифференциальное уравнение колебаний для каждого объекта. В этом уравнении обобщенной координатой может быть одна из трех линейных или одна из трех угловых координат перемещения объекта. Ускорение движения объекта определяется как сумма внешних воздействий (т.е. сумма сил или моментов сил, в зависимости от того является координата линейной или угловой) отнесенная к инерционному параметру – масса или момент инерции (опять же в зависимости от типа координаты). Каждый элемент суммы внешних воздействий (усилие в связи или момент силы, передающийся на нее) вычисляется как некая функция от взаимного перемещения и, при необходимости, скорости взаимного перемещения объектов. Вид этой функции определяется типом связи, например, линейная упруго-вязкая или упруго-фрикционная, или связь, обладающая только сухим трением, или любая комбинация этих типов связей. В программном комплексе предусмотрен весь необходимый набор типов связей, однако при необходимости предусмотрена довольно простая процедура введения нового типа связей. При задании параметров связей (кроме собственно параметров связи) задаются координаты (со знаком) точек приложения связей к объектам. Это позволяет автоматически определять знаки моментов сил, передающихся на эти связи. Все три координаты точек приложения связи задаются относительно центра масс объекта.

Заданные в модели величины параметров объектов и связей могут быть легко изменены (без изменения типа объекта или связи) используя аномалии объектов и связей. Заданные аномальные величины параметров действительны при выполнении текущего расчета и не изменяют соответствующие величины в самой модели.

Интегрирование системы дифференциальных уравнений выполняется теми же методами, что и дифференциальных уравнений продольной динамики поезда.

Результатами моделирования являются перемещения по всем шести координатам всех объектов, деформации и силы в связях по всем шести координатам (естественно, шесть координат будут только для тех объектов для кото-

рых, кроме массы заданы все три момента инерции). Кроме этого, по силам в специально выбранных пользователем связях определяются коэффициенты динамики, в том числе, коэффициенты запаса устойчивости колеса от схода с рельса. Эти величины в ходе моделирования регистрируются и как процессы и как вероятностные величины с заданным пользователем уровнем доверительной вероятности. Вероятностные показатели необходимы для оценки динамических свойств и устойчивости движения экипажа, а графики процессов этих показателей полезны при анализе результатов (например, для определения точки пути, где какой-либо показатель превысил свое допустимое значение).

Для решения поставленной задачи необходимо сформировать задание для расчета. В нем указывается название участка пути, для которого в базе данных имеются все характеристики (параметры профиля и плана участка пути), состояние пути (отличное, среднее или плохое), тип пути (стыковой или бесстыковой). Состояние пути определяется уровнем неровностей пути и величиной сопротивления движению поезда [5].

В задании указывается также:

- название поезда, для которого в базе данных указаны необходимые исходные данные (см. табл. 1);
- начальное состояние поезда (растянут, сжат или зазоры в межвагонных соединениях распределены вдоль состава произвольным образом);
- величина скорости поезда в момент начала моделирования;
- номера экипажей, для которых в процессе моделирования движения поезда будут определены динамические показатели и показатели устойчивости движения. При этом появляется окно для задания параметров пространственной модели и условий движения исследуемого экипажа;
- режимная карта (режимы управления поездом), в которой задается номер тяговой или тормозной позиции, положение рукоятки прямодействующего тормоза локомотива, режим пневматического или электропневматического торможения (три ступени регулировочного торможения, полное служебное или экстренное торможение, обрыв тормозной магистрали поезда, с указанием номера вагона). Указанные режимы управления могут переключаться по заданным значениям скорости движения, или времени или по координатам пути.

Процесс расчета может быть остановлен по показаниям скорости движения (когда скорость в данный момент времени окажется меньше заданной), по времени (когда время движения поезда будет больше заданного), или по координате пути (когда пройденный путь окажется больше заданного).

В результате расчета могут быть получены:

- осциллограммы продольных сил и ускорений;
- распределение вдоль поезда наибольших значений продольных сил и ускорений;
- значения максимальных продольных усилий в поезде в данный момент времени с указанием номера сечения, в котором они возникали;
- траектория движения.

При изучении пространственных колебаний экипажа могут быть также получены:

- осциллограммы деформаций всех связей модели исследуемого экипажа;
- осциллограммы линейных (вертикальные, поперечные и продольные) и угловых (галопирование, боковая качка и виляние) перемещений объектов;
- усилий в связях пространственной модели;
- динамические показатели - процессы изменения во времени коэффициентов динамики (вертикальной и горизонтальной), в том числе коэффициентов запаса устойчивости от схода колеса с рельсов.

Апробация разработанной математической модели производилась путем сопоставления результатов, полученных путем численного интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих движение поезда, с результатами многочисленных специальных опытов, проведенных в реальных условиях железных дорог и опытного полигона ВНИИЖТа (Россия). Расхождения при оценке наибольших сил, ускорений и тормозных путей не превышали 15 %.

Рассмотренные модели неоднократно применялись нами при проведении экспертизы инцидентов, связанных со сходами вагонов в грузовых поездах на сети железных дорог Украины и России.

Рассмотрим случай о сходе вагонов в составе поезда на одном из участков Восточно-Сибирской железной дороги. Поезд состоял из электровоза типа ВЛ80 и 83-х четырехосных грузовых вагонов. Формирование поезда в условиях Казахской железной дороги было произведено с нарушением п. 15.32 ПТЭ: в головной его части находились 70 порожних ваго-

нов, а в хвостовой – 13 полностью загруженных. Согласно материалам расследования инцидента поезд двигался на спуске с уклоном 17‰. При скорости 62 км/ч машинист применил регулировочное торможение ступенью с последующим отпуском при скорости 50 км/ч. Спуск заканчивался S-образной кривой радиусами 350 м. Упомянутое регулировочное торможение было начато за 1000 м до начала этой кривой. К моменту входа в S-образную кривую поезд двигался уже «на выбеге», и скорость его возросла на столько, что машинист был вынужден применить электрическое торможение локомотивом, которое закончилось на площадке (рис.9). При входе на площадку произошел сход с колеи головной группы вагонов.

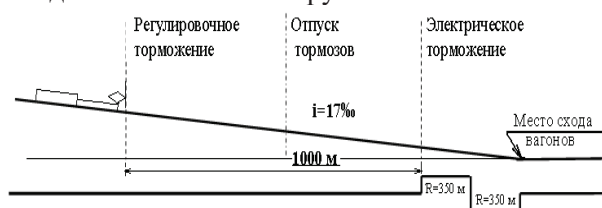


Рис. 9. Режимы движения поезда

С целью выяснения причин, был использован разработанный комплекс и предоставленные материалы расследования. Учитывались зазоры в упряжи. Предполагалось, что все вагоны поезда были оборудованы воздухораспределителями № 483, включенными на средний режим.

В результате проведенных расчетов были получены осциллограммы продольных усилий перед шестым, седьмым, восьмым, девятым, десятым и одиннадцатым вагонами (рис.10). Приведенный рисунок иллюстрирует численные значения усилий и их длительность t (в секундах) при электрическом торможении.

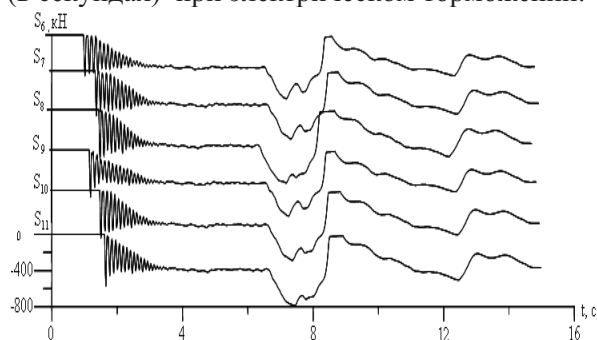


Рис. 10. Осциллограммы сил в межвагонных соединениях при электрическом торможении

Из рис.10 видно, что опасным оказалось электрическое торможение локомотивом, так как при этом в составе продольных сил оказались составляющие величиною более 500 кН,

которые действовали на группу головных вагонов в течение 1,5...2 с. Они то и выдавили из состава группу порожних четырехосных вагонов.

Возникновение в данном случае квазистатических сил такого опасного для порожнего четырехосного полувагона уровня явилось результатом совместного действия локомотивного тормоза и влиянием перелома продольного профиля пути, которые вызвали накатывание тяжелой хвостовой части состава на его легкую часть.

Сходу вагонов способствовала также усилившаяся под влиянием S-образной кривой их боковая качка.

В процессе моделирования вычислялся коэффициент запаса устойчивости против схода колеса с рельса K_y . Чтобы не было потери устойчивости движения, величина этого коэффициента всегда должна быть больше единицы. В данном случае значение K_y снизилось до нуля.

Таким образом, причиной рассматриваемого схода вагонов стало несоблюдение п. 15.32 ПТЭ. Хотя при формировании данного поезда достаточно было только подвинуть группу груженых вагонов не на головную, а на хвостовую часть состава из 70-ти порожних вагонов. От работников, связанных с движением поездов, необходимо требовать выполнения ПТЭ, а при обучении машинистов следует использовать тренажеры машинистов и заранее составленные режимные карты вождения разных поездов на определенном участке пути.

Заметим, что вагон может быть выжат из состава поезда и при подталкивании в том случае, когда он находится в хвостовой или средней части неоднородного поезда. Так, например, на сложном участке пути Восточно-Сибирской железной дороги (рис.11) произошел сход с рельсов 41-го с головы поезда порожнего вагона. В состав поезда входили головной локомотив, локомотив-толкач и находившаяся между полностью загруженными вагонами группа порожних 4-хосных вагонов, среди которых был и 41-й вагон. При движении по уклону, имеющему кривые в плане, было применено экстренное торможение головным локомотивом до полной остановки поезда. При попытке трогания обнаружилось, что один из порожних вагонов сошел рельсов. Так как достоверная информация о режиме ведения поезда отсутствовала, а имелись только данные скоростемера, то моделировалось несколько вариантов действий машиниста с целью получения кривой скорости, максимально близкой к пока-

заниям скоростемера. Оказалось, что кривые зависимости скорости движения от пройденного пути, полученные в реальных условиях и при моделировании, совпали в том случае, когда подталкивание хвостовым локомотивом еще продолжалось, а машинист головного локомотива применил экстренное торможение.

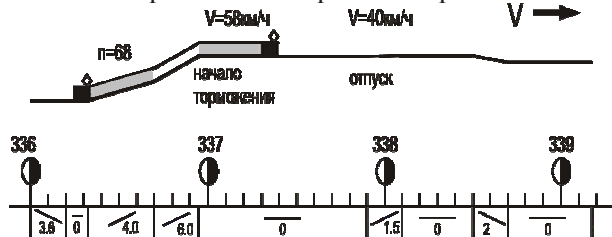


Рис. 11. Режимы ведения поезда

На рис.12 приведены осциллограммы продольных сжимающих усилий в передней автосцепке 41 и 21 вагонов. S41(0) – осциллограмма для случая экстренного торможения с головы поезда без подталкивания локомотивом, находящимся в хвосте поезда. S41(1) и S21(1) – осциллограммы сил в автосцепках 41-го и 21-го вагонов для случая экстренного торможения с головы поезда с одновременным подталкиванием локомотивом (до момента прихода к нему тормозной волны).

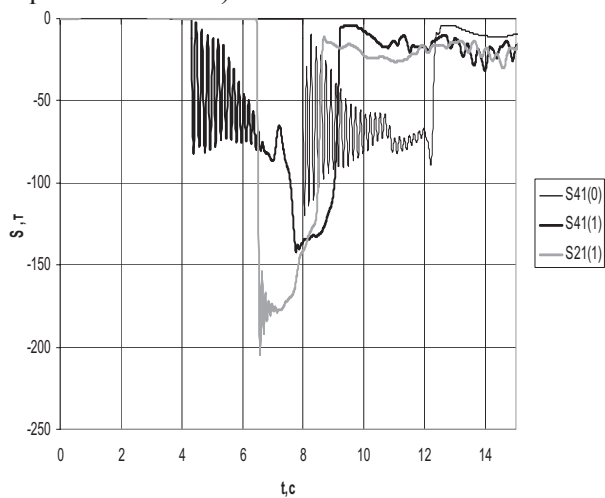


Рис. 12. Осциллограммы продольных усилий в передних автосцепках 41 и 21 вагонов для случая экстренного торможения с головы поезда без подталкивания локомотивом, находящимся в хвосте поезда S₄₁(0) и экстренного торможения с головы поезда с одновременным подталкиванием локомотивом S₄₁(1) и S₂₁(1)

Из рис. 12 (осциллограмма S₄₁(1)) видно, что при экстренном торможении головным локомотивом, сопровождавшимся подталкиванием, на 41-й порожний вагон действовала в течение более 2-х секунд продольная квазистатического характера сила величиною более 600 кН. В этот

момент упомянутый вагон двигался по кривой радиусом 295 метров.

Эти два обстоятельства и стали причиной схода с колеи этого вагона.

Моделирование пространственных колебаний сцепа порожних вагонов при действии на них упомянутых продольных сил показало, что к моменту схода динамические характеристики 41-го вагона имели значения, существенно отличающиеся от допустимых (табл. 2).

Таблица 2

Динамические характеристики 41-го вагона к моменту схода с рельсов

Наименование параметра	Значение	Допускаемое значение
Максимальное значение коэффициента горизонтальной динамики	0,9	0,38
Максимальное значение коэффициента вертикальной динамики рамы кузова	1	0,6
Минимальное значение коэффициента устойчивости против схода колеса с рельса	0,5	1,4

Как следует из табл. 2, продольные сжимающие силы квазистатического характера величиной более 1000 кН, вызванные различными поездными ситуациями, могут быть опасны и для загруженного до полной грузоподъемности четырехосного вагона.

Так, 1 февраля 2007 года на перегоне Проница–Бумкомбинат Курского отделения Горьковской железной дороги произошел сход 16-ти находящихся перед вспомогательным локомотивом вагонов (с 59-го по 74-й) в соединенном поезде № 1904/1923 массой 11917 тонн, состоящего из 131 полностью груженого четырехосного вагона (рис. 13).

При математическом моделировании рассматриваемого инцидента принимались во внимание исходные данные, составленные на базе предоставленных российской стороной материалов:

– расшифровки файлов поездки с картриджа № 59035 (поезд № 1903, электровоз ВЛ-80С № 653) и с картриджа №54854 (поезд № 1923, электровоз ВЛ-80С № 701);

- справки по расшифровке скоростемерных лент поезда № 1903-2031, эл. ВЛ-80С № 653 и поезда № 2033-1923, эл. ВЛ-80С № 701;
- справки о тормозах поезда № 2033(локомотив ВЛ-80С № 701) и поезда № 2031 (локомотив ВЛ-80С № 653);
- схема места схода вагонов в соединенном грузовом поезде № 1903/1923 (на рис. 13 место схода отмечено крестом).

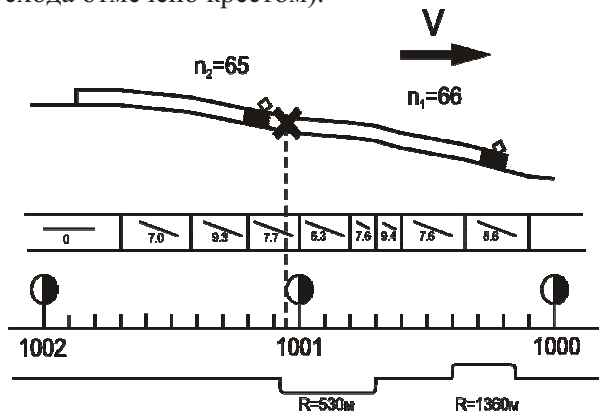


Рис. 13. Схема движения поезда

Рассматривался переходный процесс с момента начала торможения на 1001 км 4пк до остановки поезда на 1000 км 9 пк, который был вызван одновременной разрядкой тормозной магистрали на 0,8 атм головным и вспомогательным локомотивами и последующим падением давления до 1,9 атм в тормозной магистрали у головного локомотива.

Ниже приведены некоторые результаты моделирования:

- распределение вдоль поезда максимальных значений растягивающих (+) и сжимающих (-) продольных усилий, которые имели место за весь рассматриваемый период (рис. 14);
- осциллограммы продольных усилий в автосцепках перед первым и 59-м вагоном, который сошел первым (рис. 15);
- кривая изменения скорости движения поезда с момента начала торможения до остановки поезда (рис. 16).

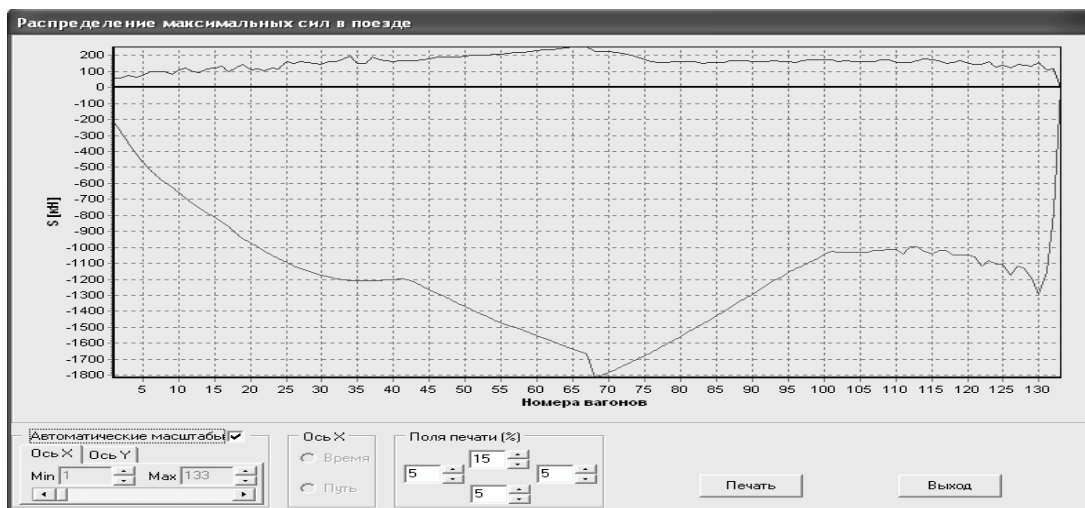


Рис. 14. Распределение вдоль поезда максимальных значений продольных усилий за весь рассматриваемый период движения поезда № 1903/1023

Как видно из анализа осциллограмм, с 16-ой по 19-тую секунды после начала торможения, на 59-й вагон в течение 2-х секунд действовала сжимающая сила квазистатического характера, превышающая 100 тс (1000 кН).

Как уже упоминалось, этого достаточно для выдавливания 4-хосного груженого полувагона на тележках 18-100. Способствовало сходу еще и то, что в это время 59-й вагон двигался по круговой кривой радиусом 530 метров.

Заметим, что по данным материалов расследования первым сошел 59-й вагон на 15-й секунде с момента начала торможения, а по результатам расчетов – на 17 с. Такое незначи-

тельное расхождение возможно связано с тем, что промежуток времени подвода колодок к колесу после появления давления в тормозном цилиндре при моделировании был принят равным 1,84 с, в то время как в реальных поездах это время может колебаться в пределах от 1,4 до 1,9 с. Кроме этого следует учитывать и нестабильность характеристик воздухораспределителей в реальных поездах.

Этим объясняется и незначительное (5 %) расхождение в тормозном пути: по результатам расчетов он составил – 460 м (см. рис. 4), а по материалам расследования он равен 488 м.

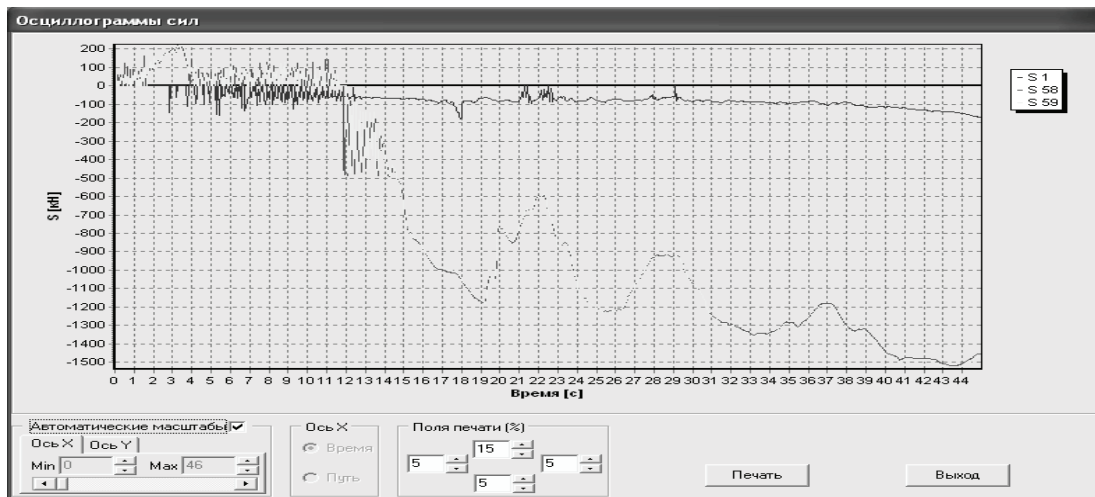


Рис. 15. Осциллограммы продольных усилий в автосцепках перед первым (S_1) 58-м (S_{58}) и 59-ым (S_{59}) вагонами с момента начала торможения и до остановки соединенного поезда весом 11917 т (Горьковская ж.д. 01.02.2007 г.)

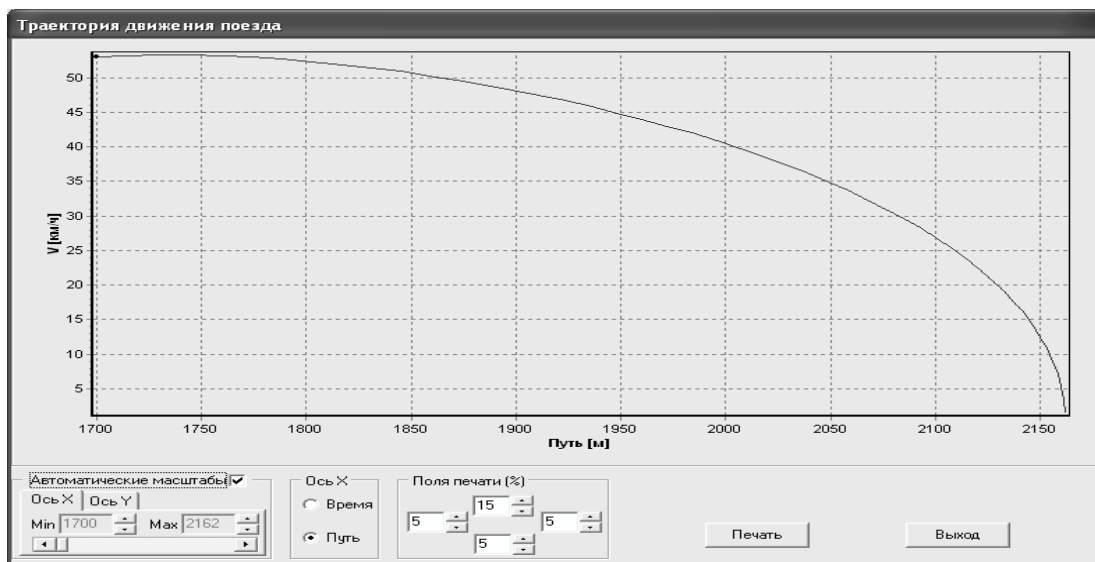


Рис. 16. График изменения скорости движения от начала торможения до остановки соединенного поезда массой 11917 т (Горьковская ж.д. 01.02.2007 г.)

Такое согласование результатов – еще одно доказательство достоверности моделирования.

Из приведенных примеров следует, что имеющееся математическое и программное обеспечение и достоверные данные об объекте исследования или инциденте позволяют получить достаточно достоверные результаты при решении задач в области нелинейной динамики поезда.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блохин, Е. П. Динамика поезда (нестационарные продольные колебания) [Текст] / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин. – М.: Транспорт, 1982. – 222 с.

2. Урсуляк, Л. В. Новый подход к решению задачи о моделировании продольной динамики и поступательного движения поезда) [Текст] / Л. В. Урсуляк, К. И. Железнов // Вісник ДНУЖТ. – 2005. – Вип. 8. – С. 107-112.
3. Метьюз, Д. Г. Численные методы. Использование MATLAB [Текст] / Д. Г. Метьюз, К. Д. Финк. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2001. – 714 с.
4. Блохин, Е. П. Расчеты и испытание тяжеловесных поездов [Текст] / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин. – М.: Транспорт, 1986. – 263 с.
5. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст]. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.

Поступила в редколлегию 21.07.2009