

УДК 629.4.015 DOI: https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-5-78-95

e.

НАУКА И ТЕХНИКА

Влияние жёсткости демпфирующего подрельсового элемента на параметры многомассовой колебательной системы «вагон–путь»









Сергей БЕСПАЛЬКО

Елена КУРЗИНА

Ангелина КУРЗИНА

Иса ЖАЙСАН

Беспалько Сергей Валерьевич — Российский университет транспорта, Москва, Россия. Курзина Елена Геннадьевна — Российский университет транспорта, Москва, Россия. Курзина Ангелина Михайловна — Российский университет транспорта, Москва, Россия. Жайсан Иса Жаксылыкулы — Казахская академия транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева (КазАТК), Алматы, Казахстан*.

Актуальная для большинства железных дорог задача увеличения веса и скоростей движения поездов неразрывно связана с решением задач улучшения динамических качеств вагонов и локомотивов во взаимодействии с верхним строением железнодорожного пути. Прочность и устойчивость подвижного состава против схода с рельсов в различных климатических зонах необходимо обеспечить при минимизации эксплуатационных расходов. Анализ надёжности и работоспособности системы «вагон-путь» возможен на основе проведения многовариантных динамических расчётов математических моделей, экспериментальных исследований динамических колебаний.

Пока недостаточно изученными остаются вопросы влияния изменения упруго-гистерезисных свойств различных материалов амортизаторов под действием температурных факторов на элементы многомассовой колебательной системы. Целью настоящей работы являлось проведение анализа динамических процессов, протекающих в многомассовой колебательной системе «вагон-путь», под воздействием изменения жёсткости и коэффициентов внутреннего трения демпфирующего подрельсового элемента в зависимости от типа конструкционного материала и температурного воздействия.

Разработана модель многомассовой колебательной системы «вагон–путь». Проведены многовариантные расчёты модели с различными параметрами жёсткости и внутреннего трения подрельсового демпфирующего элемента, выбранными из экспериментально построенных динамических гистерезисов. Представлены результаты расчёта реактивных сил и отклонений в элементах колебательной системы в зависимости от температуры, типа материала, толщины и конструктивного решения демпфирующего подрельсового элемента.

<u>Ключевые слова:</u> железная дорога, путь, вагон, многомассовая колебательная система, обобщённая модель «вагон–путь», демпфирующий материал, сэндвич, упруго-гистерезисные свойства, динамическая секущая жёсткость, динамический гистерезис, температурное воздействие, многовариантные расчёты, реактивная сила, отклонение.

*Информация об авторах:

Беспалько Сергей Валерьевич – доктор технических наук, профессор кафедры вагонов и вагонного хозяйства Российского университета транспорта, Москва Россия, Besp-alco@yandex.ru. Курзина Елена Геннадьевна – старший научный сотрудник Объединённого научно-

исследовательского центра «Перспективные технологии» Российского университета транспорта, Москва, Россия, Kurzina_elena@mail.ru.

Курзина Ангелина Михайловна – аспирант кафедры вагонов и вагонного хозяйства Российского университета транспорта, Москва, Россия, Aekfm@mail.ru.

Жайсан Иса Жаксылыкулы – научный сотрудник сектора «Подвижной состав» Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева (КазАТК), Алматы, Казахстан, Issa_161@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 21.06.2019, принята к публикации 17.09.2019.

For the English text of the article please see p. 87.

● МИР ТРАНСПОРТА, том 17, № 5, С. 78–95 (2019)

введение

Увеличение веса и скоростей движения поездов неразрывно связано с решением залач улучшения динамических качеств вагонов и локомотивов во взаимодействии с верхним строением железнодорожного пути. При этом обеспечить прочность и устойчивость подвижного состава против схода с рельсов в различных климатических зонах необходимо при минимизации эксплуатационных расходов. Анализ надёжности и работоспособности общей системы возможен на основе проведения многовариантных динамических расчётов математических моделей, составленных с использованием экспериментальных данных, по результатам которых определяют оптимальные значения параметров её элементов.

Моделированием сил взаимодействия экипажа и пути с выводом и анализом основных дифференциальных уравнений движения, составленных на основе общих вариационных принципов аналитической механики для конкретных практических задач, занимались многие отечественные учёные [1–4].

Ряд зарубежных работ также посвящён теоретическому моделированию и экспериментальным исследованиям динамических колебаний, например, воздействию частоты, жёсткости, коэффициентов демпфирования, скорости движущейся гармонической нагрузки на интенсивность механизма образования волнообразного износа рельсов и колёс [5–9].

Однако недостаточно изученными остаются вопросы влияния изменения упругогистерезисных свойств различных материалов амортизаторов под действием температурных факторов на элементы многомассовой колебательной системы.

Ввиду этого *целью* настоящей работы явился анализ динамических процессов, протекающих в многомассовой колебательной системе «вагон—путь» под воздействием изменения жёсткости и коэффициентов внутреннего трения демпфирующего подрельсового элемента в зависимости от типа конструкционного материала и температурного воздействия.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Железнодорожный путь и подвижной состав представляют сложную термодинамическую систему, в которой они взаимодействуют между собой и с окружающей средой. Движение вагона по железнодорожному пути можно представить в виде колебаний многомассовой системы, показанной на рис. 1.

Для описания движения тела в пространстве применяют принцип Даламбера, согласно которому отбрасывают связи между телами и заменяют их действие реакциями, прикладывают силы инерции и моменты сил инерции [10; 11]. Расчётная схема взаимодействия ходовых элементов



- М₁ масса подрессоренной массы вагона, приходящейся на 1 колесо;
 С₁ – жёсткость рессорного подвешивания;
 φ₁ – коэффициент трения фрикционного гасителя колебаний;
 M₂ – масса неподрессоренной части вагона (1/2 часть боковой рамы, букса, 1/2 часть оси колёсной пары);
 С₂ – жёсткость обода колеса;
 M₃ – масса обода колеса;
 С₃ – жёсткость рельса;
 С₄ – тиведённая масса рельса;
 M₅ – приведённая масса подрельсовой прокладки;
 φ₄ – коэффициент внутреннего трения подрельсовой прокладки;
 M₅ – приведённая масса подрельсового основания (1/2 часть иналы);
 С₅ – жёсткость пути;
 - β5 коэффициент сухого трения балласта;
 - φ5 коэффициент вязкости балласта.

Рис. 1. Обобщённая модель взаимодействия ходовых частей с верхним строением железнодорожного пути. 79

● МИР ТРАНСПОРТА, том 17, № 5, С. 78–95 (2019)





Рис. 2. Расчётная схема взаимодействия ходовых частей с верхним строением железнодорожного пути.

многомассовой колебательной системы представлена на рис. 2.

В каждый момент движения механической системы работа активных сил, сил реакций связей и сил инерции на любом возможном перемещении из занимаемого положения равна нулю. В связи с этим система дифференциальных уравнений, описывающих такую систему, принимает следующий вид:

$$\begin{cases}
M_{1} \ddot{z}_{1} + R_{1} = 0 \\
M_{2} \ddot{z}_{2} + R_{2} - R_{1} = 0 \\
M_{3} \ddot{z}_{3} + R_{3} - R_{2} = 0 \\
M_{4} \ddot{z}_{4} + R_{4} - R_{3} = 0 \\
M_{5} \ddot{z}_{5} + R_{5} - R_{4} = 0.
\end{cases}$$
(1)

Реакции связей на расчётной схеме направляются так, как если бы они действовали при положительной деформации упругих и упруго-вязких элементов. За положительную деформацию принимаем деформацию сжатия. Уравнения реакций связей являются функциями жёсткостей, координат, их производных:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{1} &= \mathbf{C}_{1} [1 + \phi_{1} \text{sign}(\dot{z}_{1} - \dot{z}_{2})](z_{1} - z_{2}) \\ \mathbf{R}_{2} &= \mathbf{C}_{2} (z_{2} - z_{3}) \\ \mathbf{R}_{3} &= \mathbf{C}_{3} (z_{3} - z_{4}) \\ \mathbf{R}_{4} &= \mathbf{C}_{4} (z_{4} - z_{5}) + \beta_{4} (\dot{z}_{4} - \dot{z}_{5}) \\ \mathbf{R}_{5} &= \mathbf{C}_{5} [1 + \phi_{5} \text{sign}(\dot{z}_{5})] z_{5}. \end{aligned}$$
(2)

Массы (M_i) и жёсткости (C_i) элементов системы определены из справочных данных для грузового полувагона с осевой нагрузкой 25 тс, рельса P65, железобетонной шпалы и щебёночного балласта. В каждом варианте расчёта изменяли параметры жёсткости и внутреннего трения подрельсовой прокладки, которые выбирали из экспериментально определённых динамических гистерезисов при температурах +23°С и -40°С (рис. 3, 4) [12] для двух типов тестовых композиционных материалов и сэндвича:

• резиновых композитов: неармированного (ТПРК) толщиной 10 мм и 14 мм, и армированного измельчённым полиамидным кордом (РВК) толщиной 14 мм;

• термопластичных эластомеров (смесь полиуретана и поливинилхлорида пластиката), отличающихся параметрами статической жёсткости — ТЭП1нж толщиной 14 мм и ТЭП2вж толщиной 14 мм;

• сэндвича Р9-П5, составленного расчётным методом из материала РВК толщиной 9 мм и ТЭП1нж толщиной 5 мм.

Значения динамических секущих жёсткостей образцов в зависимости от материала, толщины и температуры представлены в таблице 1.

При ударе колеса по рельсу начальные условия примут следующий вид:

$$t = 0; z_1 = z_2 = z_3 = z_4 = z_5 = 0; \dot{z}_1 = \dot{z}_2 = \dot{z}_3 = V_0 \dot{z}_4 = \dot{z}_5 = 0.$$
(3)

Интегрирование дифференциальных уравнений второго порядка осуществляли численными методами с помощью специально разработанной программы.

Проведены многовариантные расчёты разработанной математической модели с определением реактивных сил (реакций связей) и отклонений при изменении параметров жёсткости и внутреннего трения одного из элементов системы, расположенного между рельсом и подрельсовой опорой.

● МИР ТРАНСПОРТА, том 17, № 5, С. 78–95 (2019)



a)

б)

Рис. 3. Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения при динамическом нагружении с частотой 10 Гц образцов из материалов ТПРК, РВК, ТЭП1нж, ТЭП2вж при температуре +23°С (а) и температуре -40°С (б).



Рис. 4. Зависимость сжимающей нагрузки от перемещения при динамическом нагружении с частотой 10 Гц образцов из материала ТПРК толщиной 10 мм (пунктирная линия) и 14 мм (сплошная линия) при температуре +23°С (а) и температуре -40°С (б).

Таблица 1

Значения динамических секущих жёсткостей образцов в зависимости от материала и температуры

Наименование и характеристика образца	Динамическая секущая жёсткость, кН/мм, при температуре	
	+23°C	-40°C
Резиновый композит ТПРК толщиной 10 мм	204,4	426,4
Резиновый композит ТПРК толщиной 14 мм	150,1	296,1
Резиноволокнистый композит РВК толщиной 14 мм	179,2	297,9
Термоэластопласт ТЭП1нж толщиной 14 мм	126,5	903,6
Термоэластопласт ТЭП2вж толщиной 14 мм	169,0	1186,9
Сэндвич Р9-П5 из материала РВК толщиной 9 мм и ТЭП1нж толщиной 5 мм	170,6	389,2

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ распределения реакций связей, эквивалентных по модулю реактивным

силам, многомассовой системы «вагонпуть» при накатывании колеса на рельс показал, что изменение упруго-гистрезис-



● МИР ТРАНСПОРТА, том 17, № 5, С. 78–95 (2019)





Рис. 5. Распределение реакций связей в элементах многомассовой системы.









ных параметров демпфирующего подрельсового элемента в зависимости от типа применяемого материала оказывает незначительное влияние на подрессоренную часть вагона и подрельсовое основание (рис. 5).

Далее в рис. 5–13 приняты следующие сокращения: ПМВ – подрессоренная масса вагона, НМВ – неподрессоренная масса вагона, «+23» – температура +23°С; «-40» – температура -40°С.

Увеличение динамической жёсткости демпфирующего подрельсового элемента резиновых композитов при температуре -40°С (рис. 6) по сравнению с жёсткостью при температуре +23°С приводит к уменьшению реактивной силы на рельсе на 24 % ввиду его меньшего прогиба. При

● МИР ТРАНСПОРТА, том 17, № 5, С. 78–95 (2019)



Рис. 8. Распределение реакций связей при установке демпфирующих подрельсовых элементов различной толщины.



Рис. 9. Распределение реакций связей при установке однотипных демпфирующих подрельсовых элементов и сэндвича толщиной 14 мм.

этом реактивные силы в остальных элементах системы (колесо, неподрессоренная масса вагона, подрельсовое основание) изменяются незначительно. Применение резиноволокнистого композита при отрицательных температурах по сравнению с резиновым наиболее целесообразно, так как снижает нагрузку на неподрессоренную массу вагона на 8 %, а на подрельсовое основание в 1,37 раз.

В случае использования исследуемых термоэластопластов в качестве демпфирующих подрельсовых элементов при температуре -40°С по сравнению с нормальными температурами (рис. 7) реактивная сила на рельсе снижается на 30 %, а на колесе возрастает на 14—17 %. Следовательно, при эксплуатации в температурном диапазоне от -40°С и ниже нагрузка на колесо увеличится на 26 кН, что превысит на 8 % максимально допустимую осевую нагрузку 25 тс в расчёте на одно колесо.

Увеличение жёсткости подрельсовых амортизаторов для стабилизации параметров рельсовой колеи за счёт уменьшения их толщины приводит в случае применения резиновых композитов толщиной 14 мм и 10 мм к незначительным изменениям (±5 %) реактивных сил во всех элементах системы (рис. 8).

Анализ распределения реактивных сил при использовании подрельсовых демфпирующих элементов толщиной 14 мм (ТПРК, РВК, ТЭП2вж, ТЭП1нж и сэндвича Р9-П5, рис. 9) показал наиболее оптимальное распределение сил в сэндвиче Р9-П5: при практически равных и меньших, чем в других вариантах, реакциях на колесе и неподрессоренной части вагона реактивная сила на рельсе значительно меньше остальных.







Рис. 10. Распределение отклонений при установке, в качестве демпфирующих подрельсовых элементов, резиновых композитов.



Рис. 11. Распределение отклонений при установке, в качестве демпфирующих подрельсовых элементов, термоэластопластов.



Рис. 12. Распределение отклонений при установке демпфирующих подрельсовых элементов различной толщины.

Анализ распределения отклонений (перемещений от начального положения) элементов многомассовой системы «вагон-путь» показал, что изменение упругогистрезисных параметров демпфирующих подрельсовых элементов в зависимости от типа применяемого материала оказывает незначительное влияние на обрессоренную часть вагона.

С увеличением жёсткости резиновых композитов при температуре -40°С и, как следствие, снижением амортизирующих

● МИР ТРАНСПОРТА, том 17, № 5, С. 78–95 (2019)



Рис. 13. Распределение отклонений при установке однотипных демпфирующих подрельсовых элементов и сэндвича толщиной 14 мм.

свойств уменьшаются отклонения колеса (ТПРК – на 0,24 мм; РВК – на 0,15 мм) и неподрессоренной части вагона (ТПРК – на 0,27 мм; РВК – на 0,16 мм) при незначительных изменениях отклонений рельса (рис. 10). Однако, отклонения в подрельсовом основании возрастают (ТПРК – на 0,21 мм; РВК – на 0,25 мм).

В случае применения термоэластопластов с увеличением жёсткости при температуре -40°С по сравнению с нормальной температурой также наблюдается уменьшение отклонений колеса (ТЭП2вж – на 0,1 мм; ТЭП1нж – на 0,21 мм) и неподрессоренной части вагона (ТЭП2вж – на 0,12 мм; ТЭП1нж – на 0,21 мм) с одновременным ростом отклонений подрельсового основания (ТЭП2вж – на 0,39 мм; ТЭП1нж – на 0,34 мм) (рис. 11).

Следует заметить, что уровень отклонений колеса и неподрессоренной части вагона при использовании термоэластопластов в 1,6 раз выше, чем при наличии резиновых композитов, что связано со значительным увеличением жёсткости данных материалов вследствие работы в пределах температуры хрупкости.

Увеличение жёсткости резиновых подрельсовых элементов за счёт уменьшения их толщины приводит к незначительному уменьшению отклонений колеса и неподрессоренной части вагона при положительной температуре (0,1 мм) и некоторому увеличению их при отрицательной температуре (рис. 12). Отклонения рельса с повышением жёсткости уменьшаются, а подрельсового основания увеличиваются при положительной температуре, и практически не изменяются при отрицательной вследствие начала процесса кристаллизации композита, оказывающего преобладающее влияние.

В случае применения сэндвича Р9-П5 (9 мм РВК; 5 мм ТЭП1нж) наблюдается снижение отклонений колеса и неподрессоренной части вагона до уровня резиновых композитов с одновременным уменьшением отклонений рельса и подрельсового основания на 0,2 мм по сравнению с отклонениями доминирующего компонента РВК (рис. 13).

выводы

1. Разработанная программа расчёта многомассовой колебательной системы (вагон—путь) позволяет с высокой степенью точности и минимальными затратами определить реактивные силы и отклонения в элементах системы в зависимости от изменения упругогистерезисных свойств демпфирующих подрельсовых элементов из различных материалов и конструкций, применяемых при различных температурах эксплуатации.

2. Отмечено, что с увеличением жёсткости устанавливаемых демпфирующих подрельсовых элементов, связанной с конструктивными особенностями, типом материала и температурой эксплуатации, реактивная сила на рельсе убывает, а на колесе и неподрессоренной массе вагона — наоборот возрастает, что может быть важной причиной их преждевременного износа и разрушения.



3. Применение резиноволокнистого композита при отрицательных температурах по сравнению с резиновым наиболее целесообразно, так как снижает нагрузку на неподрессоренную массу вагона на 8%, а на подрельсовое основание в 1,37 раз.

4. Использование термоэластопластов в качестве демпфирующих подрельсовых элементов при температуре -40°С приводит к значительному увеличению реактивной силы, действующей на колесо, что превышает на 8 % максимально допустимую осевую нагрузку в расчёте на одно колесо.

5. Отклонения колеса и неподрессоренной части вагона при использовании демпфирующих подрельсовых элементов из термоэластопластов при температуре -40°С в 1,6 раз выше, чем при использовании резиновых композитов, что связано со значительным увеличением жёсткости данных материалов вследствие работы в пределах температуры хрупкости.

6. Увеличение жёсткости подрельсовых амортизаторов для стабилизации параметров рельсовой колеи за счёт уменьшения их толщины приводит в случае применения резиновых композитов толщиной 14 мм и 10 мм к незначительным изменениям реактивных сил и отклонений во всех элементах системы.

7. Оптимальное распределение реактивных сил и отклонений в общей системе достигается применением сэндвичей, спроектированных из разнотипных компонентов, которые в определённой пропорции сочетают положительный эффект друг друга. При этом многомассовая колебательная система становится более уравновешенной, что приводит к улучшению динамических процессов, плавности хода, снижению риска возникновения резонансных явлений, устойчивости подвижного состава против схода с рельсов.

Представляется, что данные выводы могут быть достаточно универсальными применительно к различным типам и видам подвижного состава и инфраструктуры, однако для подтверждения заявленных процессов требуются соответствующие экспериментальные исследования параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вериго М. Ф., Петров Г. И., Хусидов В. В. Имитационное моделирование сил взаимодействия экипажа и пути // Бюллетень ОСЖД. – Варшава. –1995. – № 6. – С. 3–8.

2. Захаров С. М., Погорелов Д. Ю., Симонов В. А. Анализ влияния параметров экипажей и пути на интенсивность износа в системе колесо–рельс (на основе полного факторного эксперимента)// Вестник Научноисследовательского института железнодорожного транспорта. – 2010. – № 2. – С. 31–35.

3. Хусидов В. Д., Заславский Л. В. Моделирование реакций в динамических системах с зазорами в соединениях // Тезисный доклад на IX Международной конференции «Проблемы механики железнодорожного транспорта: динамика, надёжность и безопасность подвижного состава», Днепропетровск. – 29–31 мая, 1996. – С. 138.

4. Есаулов В. П., Сладковский А. В., Токарев В. В. Математическая модель взаимодействия рельсовой колеи и колёсной пары и некоторые вопросы автоматизированного проектирования оборудования для их производства и ремонта // Тезисный доклад на всесоюзной научной конференции. – Воронеж. – 1991. – С. 103.

5. Sun, Y. Q., Simson, S. Wagon-track modelling and parametric study on rail corrugation initiation due to wheel stick-slip process on curved track. Wear, 2008, Vol. 265, pp. 1193–1201. DOI: 10.1016/j.wear.2008.02.043.

6. Croft, B. E., Jones, C. J. C., Thompson, D. J. Modelling the effect of rail dampers on wheel–rail interaction forces and rail roughness growth rates. Journal of Sound and Vibration, 2009, Vol. 323, Iss. 1–2, pp. 17–32. DOI: https://doi.org/ 10.1016/j.jsv.2008.12.013.

7. Chen, G. X., Zhou, Z. R., Ouyang, H. [*et al*]. A finite element study on rail corrugation based on saturated creep force-induced self-excited vibration of a wheelset-track system. Journal of Sound and Vibration, 2010, Vol. 329, Iss. 22, pp. 4643–4655. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2017.01.016.

8. Caiyou Zhao, Ping Wang, Xi Sheng, Duo Meng. Theoretical simulation and experimental investigation of a rail damper to minimize short-pitch rail corrugation. Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2017, pp. 1–14. Article ID 2359404. DOI: https://doi.org/10.1155/2017/2359404.

9. Yan-qi Liu, Yan Zhang, Chun-fang Song, Huangsen Gu, Longlong Xu. Excitation frequency, fastener stiffness and damping, and speed of the moving harmonic load on the dynamic response of the track structure. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, Vol. 33, Iss. 1, pp. 11–19. DOI: 10.1007/s12206-018-1202-9.

10. Вершинский С. В., Данилов В. Н., Хусидов В. Д. Динамика вагона. – М.: Транспорт, 1991. – 360 с.

11. Данилов В. Н., Хусидов В. Д., Филиппов В. Н. Постановка и метод решения задачи пространственных колебаний двухосной тележки // Труды МИИТ. – Вып. 368. – 1971. – С. 30–44.

12. Kurzina, E. G., Kolmakov, A. G., Aksenov, Yu. N., Kurzina, A. M., Bogachev, A. Yu., Semak, A. V. Comparison of the composite materials intended for damping elements for the infrastructure of rail transport and rolling stock. Russian Metallurgy (Metally), 2019, Iss. 4, pp. 448–452. DOI: https://doi.org/10.1134/S0036029519040232.

Авторы выражают благодарность за научное сопровождение представленной работы профессору кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Российского университета транспорта, доктору технических наук Филиппову Виктору Николаевичу.

● МИР ТРАНСПОРТА, том 17, № 5, С. 78–95 (2019)