

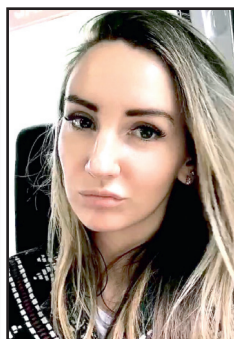


Выбор параметров упругих элементов математической модели «вагон–путь»



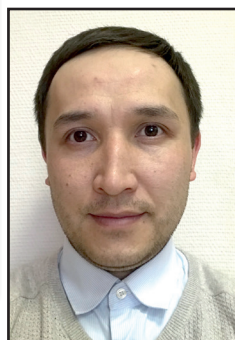
Виктор ФИЛИППОВ
Victor N. FILIPPOV

Елена КУРЗИНА
Elena G. KURZINA



Ангелина КУРЗИНА
Angelina M. KURZINA

Иса ЖАЙСАН
Issa Zh. ZHAYSAN



Choice of Parameters of Elastic Elements of «Car–Track» Mathematical Model
(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 68)

Обоснована целесообразность расчёта пространственной многомассовой системы для оптимизации динамических процессов взаимодействия подвижного состава и пути. Представлены результаты экспериментального определения статических и динамических параметров демпфирующего материала упругих элементов многомассовой системы. Определено влияние геометрических размеров и температурных факторов на упругогистерезисные свойства амортизирующих элементов. Проведён энергетический анализ. Предложено использование полученных экспериментальных данных в качестве входных параметров проектируемого демпфирующего элемента надбуксового узла грузового вагона.

Ключевые слова: железная дорога, модель «вагон–путь», многомассовая динамическая система, вибронагруженное состояние, демпфирующий материал, коэффициент жёсткости, затухание вынужденных колебаний, статический гистерезис, динамический гистерезис, температурное воздействие.

Филиппов Виктор Николаевич – доктор технических наук, профессор Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия.

Курзина Елена Геннадьевна – старший научный сотрудник Объединённого научно-исследовательского центра «Перспективные технологии» РУТ, Москва, Россия.

Курзина Ангелина Михайловна – аспирант кафедры вагонов и вагонного хозяйства РУТ, Москва, Россия.

Жайсан Иса Жаксылыкулы – научный сотрудник Казахской академии транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева, Алматы, Казахстан.

С целью увеличения осевых нагрузок в 60-х годах прошлого века началась масштабная модернизация элементов верхнего строения пути, которая предусматривала применение рельсов тяжёлого типа – Р65, Р75, железобетонных шпал вместо деревянных и увеличение толщины балластного слоя. В то же время некоторыми специалистами, к числу которых относился Г. М. Шахунянц [1], были высказаны предположения о целесообразности увеличения диаметра колеса несамостоятельного подвижного состава (вагона) с номинального диаметра 950 мм до 1050 мм, что приведёт к уменьшению частоты колебаний колёсных пар, тележек и кузова. Следует

отметить, что такой диаметр колеса реализовывали ранее в вариантах бандажных и чугунных колёс грузовых вагонов. Таким образом, повышение осевых нагрузок достигали увеличением массы и жёсткости элементов верхнего строения пути и подвижного состава.

1.

Известно, что динамические силы, возникающие при взаимодействии колеса и рельса, являются составной частью динамических процессов взаимодействия элементов многомассовой системы (ходовые части—путь). Поэтому изменения инерционных параметров рельсовой колеи способствовали началу работ по созданию тележек грузовых вагонов с надбуксовым и двухступенчатым рессорным подвешиванием (надбуксовым и центральным) [2]. В этой связи Уралвагонзавод (УВЗ) в 70-х годах разработал и испытал около десятка вариантов грузовых тележек с двухступенчатой системой подвешивания. Один из вариантов показан на рис. 1 [3]. За счёт применения двух ступеней подвешивания значительно снизилась масса неподрессоренных частей, что положительно повлияло на динамические качества тележки. Подобная схема в упрощённом варианте применяется на железных дорогах Европы [4]. Аналогичные схемы есть и в пассажирских вагонах.

Наиболее распространённым вариантом такой тележки стала серийная тележка модели У-25. Увеличение скоростей пассажирских вагонов также требовало умень-

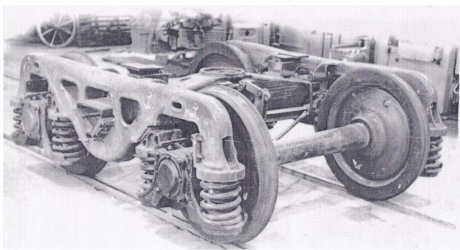
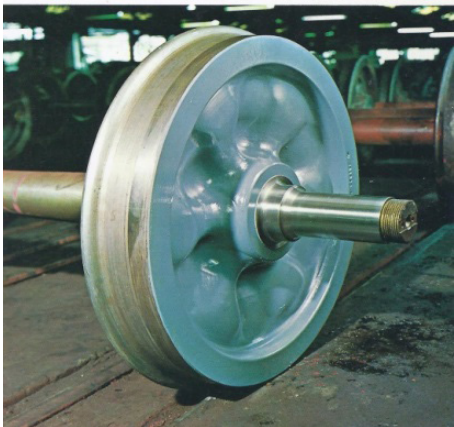


Рис. 1. Грузовая тележка модели УВЗ-6КМ.

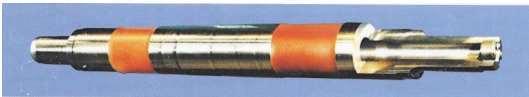
шения массы необрессоренных ходовых частей, участвовавших в колебаниях системы «колесо—путь». В частности, на скоростных поездах японских железнодорожных линий «Синкасэн» начали применять полые оси и гофрированные диски колёс [5]. Один из вариантов японской разработки колёс показан на рис. 2.

Работы по созданию полых осей проводились в СССР специалистами УВЗ, ВНИИЖТ, ВНИТИ, ВНИИВ и другими [6, 7].

В этот же период научные исследования в области транспортного материаловедения были направлены на повышение твёрдости и износостойкости рабочих поверхностей колеса и рельса, предложены новые методы их термоупрочнения. Однако реализация данных идей не привела к достижению желаемого результата, так как применение классической схемы тормозов с односторонним нажатием на отечественных грузовых вагонах способствовало снижению прочностных свойств поверхности катания колеса за счёт высоких температур, возникающих в зоне взаимодействия колеса



а)



б)

Рис. 2. Варианты уменьшения массы необрессоренных ходовых частей.
а) Гофрированное колесо. б) Полая ось колёсной пары.



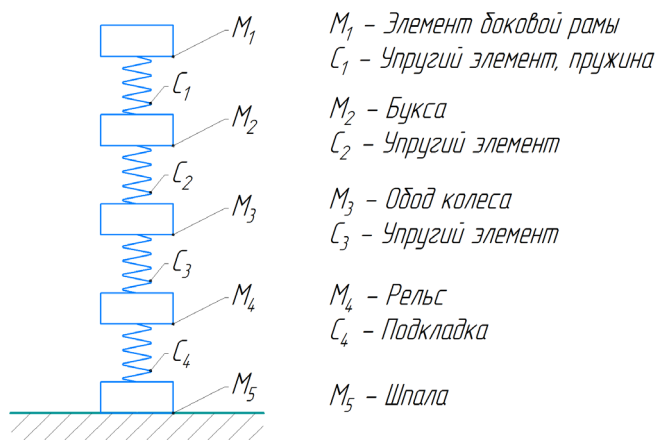


Рис. 3. Обобщённая модель взаимодействия ходовых частей с верхним строением пути.

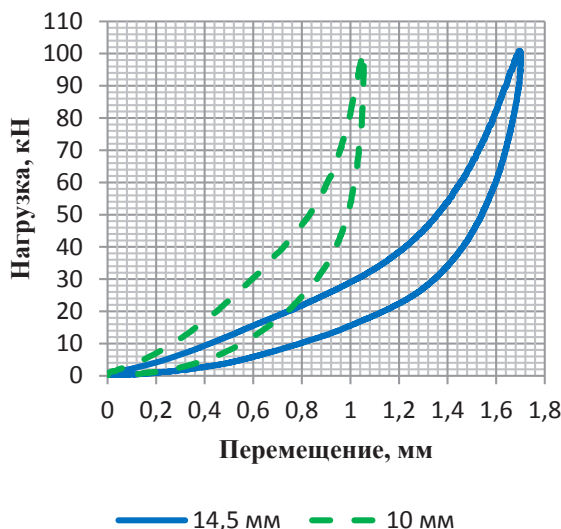
и тормозной колодки. Температура под поверхностью их контакта может достигать 600–700°C [8]. В повседневной практике появились «синие колёса», что свидетельствует о высоких температурах, и возникла потребность в комплексных исследованиях динамических характеристик объектов системы.

Для изучения динамических характеристик взаимодействия железнодорожного подвижного транспортного средства и рельсового пути в РУТ (МИИТ) разработаны специальные математические модели многомассовой динамической системы. Некоторые результаты таких исследований по выбору параметров надбуксовой ступени подвешивания приведены в работе [3]. При этом для изучения динамических качеств тележки использовали упрощённые расчётные модели, в которых

железнодорожный путь представлен в виде системы жёстких опор с конечной жёсткостью. Однако в последнее время произошли значительные конструктивные и технологические изменения элементов верхнего строения пути (шпал, рельсовых скреплений, балластной призмы), в связи с чем возникла необходимость в дополнительных исследованиях по поводу влияния этих конструктивных решений на динамические свойства тележек с учётом климатического воздействия.

Стратегия развития железнодорожного транспорта до 2030 года предусматривает рост осевых нагрузок до 27–30 тонно-сил, увеличение скоростей движения, уменьшение взаимодействия в системе «колесо–рельс», снижение тары грузового вагона на 25 %. Поскольку участки и направления железных дорог, включённых в перспек-

Рис. 4. Статический гистерезис образцов из полимерной композиции ТПК-5 толщиной 10 мм и 14,5 мм.



тивный полигон обращения поездов повышенного веса и длины, предусмотрены в разных климатических зонах РФ (Северо-Запад, Юг, Восток, Транссиб), исследования требуется проводить с учётом климатических особенностей разных регионов эксплуатации.

2.

Железнодорожный путь и движущиеся по нему экипажи представляют собой сложную термодинамическую систему со многими степенями свободы, линейными (упругими) и нелинейными (вязко-пластичными) связями. В общем случае расчётную схему их взаимодействия можно представить в виде системы упругосвязанных между собой жёстких тел, совершающих вынужденные колебания под действием возмущающей динамической нагрузки. Упругие характеристики строятся расчётным путём или экспериментально. За жёсткость вязкоупругой связи принимают касательную или секущую к нагрузочной ветви диаграммы сжатия амортизатора. При этом показателем упругих и вязко-упругих связей принимают коэффициент жёсткости, представляющий собой отношение статической жёсткости к динамической при разных температурных воздействиях.

В связи с названными обстоятельствами научные исследования необходимо направить на изучение существующих и разработку дополнительных конструкций амортизирующих элементов в общей системе «колесо—рельс», выбор демпфирующего материала, способного поглощать вибрации в широком диапазоне температур окружающего воздуха, причём как в статическом, так и динамическом режимах [9]. Появление новых материалов в системе амортизации элементов верхнего строения пути, по существу, открывает возможности для применения аналогов в системах надбуксовой ступени подвешивания грузовых вагонов. По мнению авторов, целесообразно разработать и исследовать вариант обобщённой модели «колесо—путь» по схеме, показанной на рис. 3.

Известно, что мерой пластичности упругого материала является величина коэффициента механических потерь, определяемого по диаграмме сжатия образца. Чем боль-

ше площадь петли гистерезиса, тем больше энергии рассеивается, тратится на нагрев и активацию химических процессов, а значит, и на затухание вынужденных колебаний. При этом целесообразно оценивать как статический, так и динамический гистерезис при различных температурных воздействиях.

Целью для нас являлось исследование изменения упругогистерезисных свойств полимерной композиции ТПК-5 в зависимости от толщины образца и температуры испытания. При этом сравнение проводили по следующим показателям:

- статическая жёсткость на сжатие в интервале нагрузок от 20 до 90 кН;
- динамическая жёсткость, определяемая при амплитуде нагрузок 20–90 кН и частоте 10 ± 1 Гц;
- коэффициент жёсткости, определяемый как отношение динамической жёсткости при амплитуде нагрузок 20–90 кН и частоте 10 ± 1 Гц к статической.

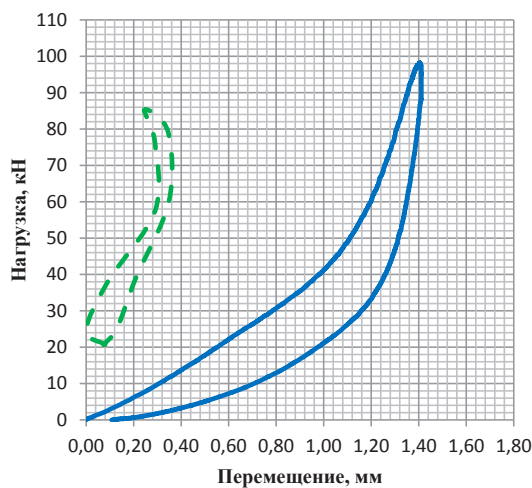
Результаты экспериментальных исследований показали, что статическая жёсткость образцов толщиной 14,5 мм при температуре плюс $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ составила 78 кН/мм, а толщиной 10 мм — 123 кН/мм (рис. 4), что в $\approx 1,5$ раза (на $\approx 50\%$) больше статической жёсткости образцов толщиной 14,5 мм. Следовательно, статическая жёсткость при уменьшении толщины амортизатора увеличивается пропорционально его толщине при равных прочих условиях испытаний.

Динамическая жёсткость образцов толщиной 14,5 мм при частоте нагружения 10 ± 1 Гц и температурах испытаний плюс $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, минус $(40_{-2})^\circ\text{C}$, плюс $(50 \pm 2)^\circ\text{C}$ составила: 136, 304 и 133 кН/мм, а коэффициент жёсткости при тех же температурах — 1,74; 3,91; 1,71 соответственно. Незначительное различие в показателях динамической жёсткости образцов при температурах плюс $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ и плюс $(50 \pm 2)^\circ\text{C}$ (в пределах допускаемой погрешности эксперимента) говорит о стабильности физических свойств полимерной композиции при повышенных температурах.

Однако при температуре минус $(40_{-2})^\circ\text{C}$ значение динамической жёсткости образцов толщиной 14,5 мм увеличивается в 3,91 раза (рис. 5) по сравнению со статической и в 2,23 раза — по сравнению с динамиче-

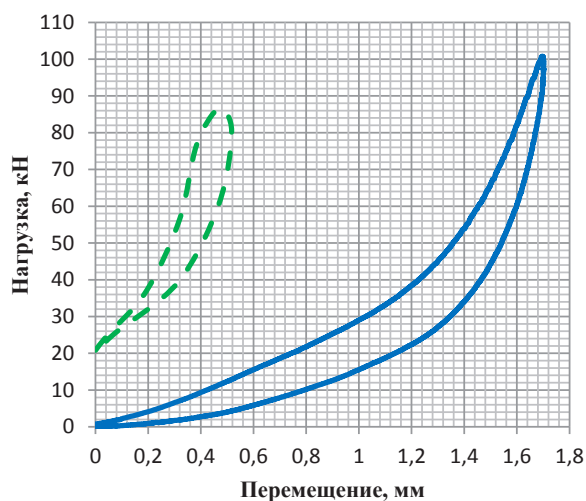


Рис. 5. Статический и динамический гистерезис образцов толщиной 14,5 мм при -40°C .



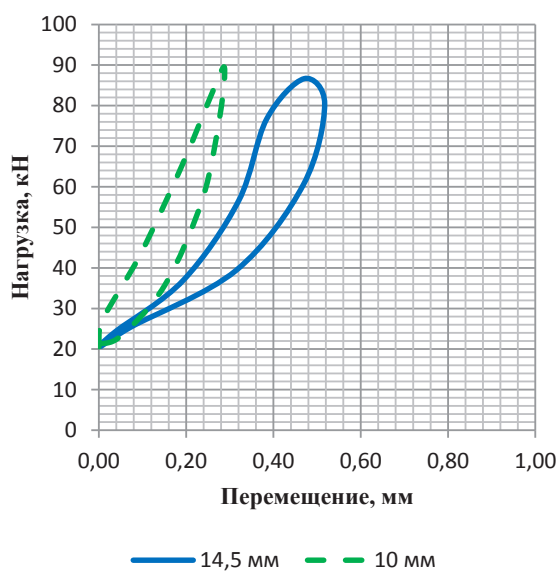
— Статич.гистерезис - - Динам.гистерезис

Рис. 6. Статический и динамический гистерезис образцов толщиной 14,5 мм при $+23^{\circ}\text{C}$.



— Статич.гистерезис - - Динам.гистерезис

Рис. 7. Динамический гистерезис при испытаниях на динамическую жёсткость при $+23^{\circ}\text{C}$ прокладок толщиной 14,5 мм и 10 мм.



— 14,5 мм - - 10 мм

ской жёсткостью, определённой при температуре плюс $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ (рис. 6).

Динамическая жёсткость образцов уменьшенной толщины (10 мм) при частоте нагружения 10 ± 1 Гц и температурах испытаний плюс $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, минус $(40_{-2})^\circ\text{C}$ составила 240 и 358 кН/мм, а коэффициент жёсткости при тех же температурах — 1,96 и 2,96. Следовательно, динамическая жёсткость образцов толщиной 10 мм при температуре минус $(40_{-2})^\circ\text{C}$ увеличилась в 2,96 раза по сравнению со статической и в 1,49 раза — по сравнению с динамической при температуре плюс $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Сравнительный анализ динамической жёсткости образцов из полимерной композиции ТПК-5 толщиной 14,5 мм и 10 мм показал, что значение динамической жёсткости при уменьшении толщины увеличивается при температуре плюс $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ в 1,77 раза (77 %) (рис. 7), а при температуре минус $(40_{-2})^\circ\text{C}$ в 1,18 раза (18 %). Снижение интенсивности увеличения коэффициента жёсткости для данного материала при температуре минус $(40_{-2})^\circ\text{C}$ связано с началом перехода из высокоэластичного состояния в стеклообразное. Поэтому на снижение демпфирующих свойств при данной температуре преобладающее влияние начинает оказывать физическое состояние материала, а не геометрические характеристики амортизатора.

Доля рассеивания энергии упругой деформации при динамическом нагружении образцов толщиной 14,5 мм по сравнению со статическим нагружением составила 27,7 %, а образцов 10 мм — 31 %. Следовательно, при динамическом нагружении с частотой 10 Гц демпфирование вертикальных колебаний снижается на ≈ 30 % для каждой толщины образца и является качественным показателем для данного материала.

ВЫВОДЫ

Результаты экспериментальных исследований изменения упругогистерезисных

свойств полимерной композиции в различных условиях эксплуатации, а также обобщённая модель взаимодействия ходовых частей с верхним строением пути дают возможность эффективно использовать полученные данные в уточнённой расчётной модели, описывающей взаимодействие железнодорожного пути и подвижного состава.

Отмечено влияние температурных факторов на упругогистерезисные свойства амортизирующих материалов.

Полученные экспериментальные характеристики целесообразно заложить в математическую модель в качестве входных параметров проектируемого демпфирующего элемента надбуксового узла для снижения вибрационных воздействий в широком диапазоне температур окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь. — М.: Транспорт, 1969. — 536 с.
2. Шадур Л. А. Развитие отечественного вагонного парка. — М.: Транспорт, 1988. — 279 с.
3. Хусидов В. Д., Евстафьев Б. С., Двухглазов В. А., Сергеев К. А., Филиппов В. Н. Исследование динамических качеств вагонов с различными схемами подвешивания // Вопросы совершенствования большегрузных вагонов: Труды МИИТ. — Вып. 399. — М., 1972. — С. 42–51.
4. McClanachan M., Handoko Y., Dhanasekar M., Skerman D., Davey J. Modelling Freight Wagon Dynamics. Vehicle System Dynamics Supplement 41, 2004, pp. 438–447.
5. Okagata Y. Design Technologies for Railway Wheels and Future Prospects. Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report, No. 105, 2013, pp. 26–33.
6. Френкель В. Я., Новиков В. В. Полые оси железнодорожных вагонов // Транспортное машиностроение. — 1966. — № 11. — С. 55.
7. Школьник Л. М., Мартынов Н. И., Новиков В. В. и др. Длительные эксплуатационные испытания колёсных пар с полыми осями // Вестник ВНИИЖТ. — 1980. — № 4. — С. 36–41.
8. Иноземцев В. Г. Тепловые расчёты при проектировании и эксплуатации тормозов. — М.: Транспорт, 1966. — 261 с.
9. Курзина А. М., Аксенов Ю. Н., Курзина Е. Г., Семак А. В., Богачев А. Ю. Влияние температуры испытания и толщины демпфирующего слоя на показатели статической и динамической жёсткости амортизаторов из полимерной композиции // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: Сб. материалов VII международной конференции. Москва, 7–10 ноября 2017 г. — М.: ИМЕТ РАН, 2017. — 951 с. ●

Координаты авторов: **Филиппов В. Н.** — filipovvn@gmail.com, **Курзина Е. Г.** — kurzina_elena@mail.ru, **Курзина А. М.** — AEKFM@mail.ru, **Жайсан И. Ж.** — issa_161@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 06.04.2018, принята к публикации 15.06.2018.

Авторы выражают благодарность за научное сопровождение представленной работы профессору, доктору технических наук, заведующему кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство» РУТ (МИИТ) Петрову Геннадию Ивановичу.

