

ИССЛЕДОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ МАНЕВРОВОГО СОУДАРЕНИЯ СЦЕПОВ ВАГОНОВ

В статье проводится исследование процесса роспуска вагонов с сортировочных горок при различных режимах. Разрабатываются математическая и компьютерная модели. Проводится эксперимент имитационного моделирования. Даются рекомендации по повышению безопасности технологических операций на сортировочных горках.

Ключевые слова: динамика вагона, маневровое соударение, аварийный режим, имитационное моделирование, автосцепное устройство

EDN: NJHMDS



Г.И. Петров



С.В. Беспалько

В семидесятых годах XX века сотрудниками Московского института инженеров транспорта (МИИТ) был проведен ряд испытаний, целью которых было определение безопасных режимов соударения и аварийного поведения конструкций вагонов. В результате были получены данные, ставшие основой для ряда научных статей [1]. Также результатом проведения этих испытаний стал разработанный в последствии комплекс устройств защиты котлов цистерн, ориентированный на недопущение чрезмерно опасных

повреждений котла в случае возникновения аварийных ситуаций.

В настоящее время проблема обеспечения безопасности при эксплуатационных режимах требует дополнительного, более глубокого анализа. В связи с возросшим потоком контейнерных перевозок требования к технологическим операциям роспуска необходимо дополнить положениями, взятыми из соответствующих технических условий [5]. К числу дополнительных ограничений должен быть отнесен лимит уровня про-

Петров Геннадий Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: динамика и прочность вагонов, математическое и компьютерное моделирование, обеспечение безопасности подвижного состава железных дорог, технологии производства и ремонта вагонов. Автор более 50 научных работ.

Беспалько Сергей Валерьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: экологическая безопасность, оценка рисков, парниковые газы, эксергетический анализ, обеспечение безопасности подвижного состава железных дорог, системы экологического менеджмента. Автор более 90 научных работ.

Сергеев Иван Константинович, ассистент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: динамика и прочность подвижного состава. Автор 28 научных работ.

Курзина Надежда Михайловна, заведующий кабинетом, инженер кафедры «Машиноведение, проектирование, стандартизация и сертификация» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: динамика и прочность подвижного состава, техническое регулирование. Автор 10 научных работ.

дольных ускорений вагона. Этот лимит должен быть введен ради недопущения повреждения хрупких ценных грузов, перевозимых в контейнерах.

Принимая во внимание зарубежный опыт проведения подобных технологических операций можно отметить, что на подвижном составе железных дорог США применяются специальные поглощающие аппараты высокой энергоемкости, достигаемой за счет увеличенного хода. Величина хода в таких случаях может достигать 600–700 мм. Альтернативным решением является применение плавающих хребтовых балок, которые впервые были внедрены на железных дорогах США во второй половине XX века. Особенностью конструкции являлось наличие гидравлического гасителя в центральной части хребтовой балки (рис. 1).

На отечественных железных дорогах некоторые типы подвижного состава специального назначения также оснащались плавающими хребтовыми балками и их применение позволило улучшить динамические характеристики вагонов, оснащенных данными устройствами. Перспективным решением проблемы обеспечения безопасности является применение на подвижном составе последовательно расположенных поглощающих аппаратов различной жесткости.

Составление математической модели вагона в сцепе

Указанные решения являются наиболее доступными способами повышения безопасности технологических операций роспуска вагонов на сортировочных горках. При этом достигаемый эффект от реализации таких технических решений может быть оценен с помощью создания и испытания имитационных моделей, описывающих данный процесс. В качестве расчетной модели такого процесса может быть сформирована трех-элементная модель вагона (рис. 2).

Для составления компьютерной модели и дальнейшего исследования сформированной расчетной схемы необходимо вывести систему дифференциальных уравнений, описывающих исследуемый физический процесс. Такой набор математических зависимостей может быть составлен с учетом колебаний подергивания, подпрыгивания и галопирования:

$$\begin{cases} M_k \ddot{X} + P_{x2} - P_{x1} + M_{t2} \ddot{X} + M_{t1} \ddot{X} = 0 \\ J_k \ddot{q} - P_{z2}(L_1 + L_k) + P_{z1}(L_2 + L_k) - P_{z1}[H_a - (L_1 + L_k)q] - \\ - P_{z2}[H_a + (L_1 + L_k)q] - R_2 L_1 + R_1 L_2 + M_{t2} \ddot{H}_p + M_{t1} \ddot{H}_p = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Колебания галопирования и подпрыгивания участвуют в формировании динамических прогибов и деформаций элементов рессорного подвешивания ходовых частей. Расчет вертикальных перемещений в модели должен производиться по следующим выражениям:

$$Z_{H1} = \begin{cases} Z + q \cdot L_2 \text{ при } (Z + q \cdot L_2) > (-F_{ст}); \\ -F_{ст} \text{ при } (Z + q \cdot L_2) \leq (-F_{ст}); \end{cases} \quad (2)$$

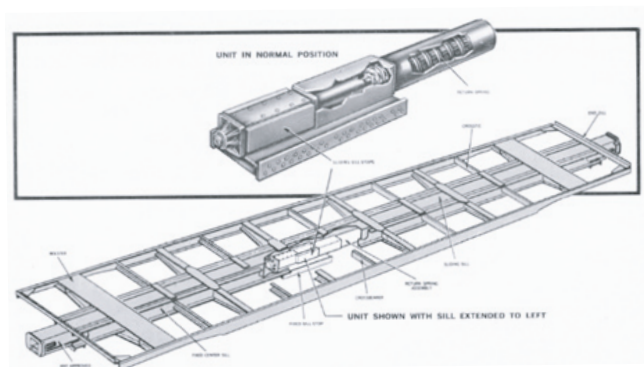


Рис. 1. Внедрение демпфера в середину хребтовой балки

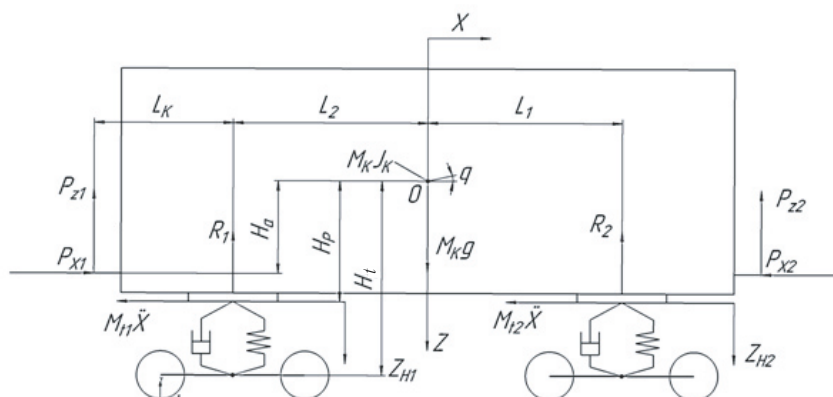


Рис. 2. Расчетная схема вагона, входящего в сцеп:

P_{x1}, P_{x2} – горизонтальные усилия в межвагонной связи; P_{z1}, P_{z2} – вертикальные усилия в межвагонной связи;
 R_1, R_2 – вертикальные реакции рессорных комплектов тележек; $M_{t1} \ddot{X}, M_{t2} \ddot{X}$ – силы инерции тележек вагона;
 L_1, L_2, L_k – базовые геометрические размеры вагона, учитывающие смещения центра тяжести; H_g – возвышение центра тяжести вагона над продольной осью хребтовой балки; H_p – возвышение центра тяжести вагона над опорной поверхностью пятников; H_t – возвышение центра тяжести вагона над осью колесной пары; x, z, q – координаты и их производные по времени в уравнениях; M_k – масса обрессоренных частей тележек вагона; M_{t1}, M_{t2} – масса необрессоренных частей тележек вагона; $M_k g$ – сила тяжести; J_k – момент инерции кузова вагона, относительно поперечной оси Y , совпадающей с положением центра тяжести в точке O

$$Z_{H2} = \begin{cases} Z - q \cdot L_1 \text{ при } (Z - q \cdot L_1) > (-F_{ст}); \\ -F_{ст} \text{ при } (Z + q \cdot L_1) \leq (-F_{ст}). \end{cases} \quad (3)$$

В модель необходимо будет включить функции вычисления реакций в узле автосцепки, реализация которых привязана к типам поглощающих аппаратов (4).

$$P_{z2} = \begin{cases} P_{x2} \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \text{ при } \alpha < \alpha_1; \\ P_{x2} \cdot (F_{тр} \operatorname{sign}(\alpha) - \operatorname{tg}(\alpha_1) \operatorname{sign}(\alpha) - \operatorname{tg}(\beta)) \text{ при } \alpha_1 < \alpha < \alpha_2; \\ 0, \text{ при } \alpha \geq \alpha_2, \end{cases} \quad (4)$$

где α_1 – угол между продольной осью вагона и осью автосцепки в случае возможного отклонения;

α_2 – угол, соответствующий саморасцепу из-за недопустимого перекоса автосцепки;

α – угол, вычисляемый на основании отношения разности высот автосцепок к расстоянию между их центрирующими балочками.

Одним из возможных вариантов программной реализации условия замены нежелательной кинематической связи на силовую будет приравнивание скорости перемещения взаимодействующих автосцепок к нулю на концах отрезка интегрирования:

$$\dot{D}H = \dot{Z}_i - \dot{Z}_{i+1} + (L_1 + L_k) \dot{q}_i + (L_2 + L_k) \dot{q}_{i+1}. \quad (5)$$

Указанных уравнений и условий достаточно для однозначного определения вертикальной составляющей в межвагонном соединении P'_{z2} . Условием случая выкатки тележки является подъем пятника над опорной поверхностью подпятника на высоту, достаточную для свободного выкатывания тележки или для повреждения шкворня. Высота, достаточная для повреждения шкворня, определяется как плечо, при котором неизбежен изгиб шкворня под действием текущей силы инерции $M_t \ddot{X}$. Полученная математическая модель была алгоритмизирована и компьютеризирована в среде программирования RAD Studio.

Имитационное моделирование маневрового соударения

Определим ряд опытов, которые необходимо провести с моделью. При определении учтем возможные нарушения в технологии роспуска сцепов с горки, к числу которых относятся ограждение порожней платформы груженными вагонами, нарушение скоростного режима и др. В результате можно выделить три группы опытов.

Соударение порожней платформы с группой полувагонов

В опытах данной группы порожняя платформа будет скатываться с сортировочной горки и ударяться в сцеп груженых полувагонов. Исходные данные для эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для опытов с порожней платформой

№	Тип сцепа	Тип вагона	Масса брутто, т	Количество	Тип поглощающего аппарата
1	Стоящий	полувагон	100	5	Ш-1-ТМ
	Набегающий	платформа	21	1	Ш-1-ТМ
2	Стоящий	полувагон	100	5	Ш-1-ТМ
	Набегающий	платформа	21	1	Р-5П
3	Стоящий	полувагон	100	5	Ш-1-ТМ
	Набегающий	платформа	21	1	73ZW
4	Стоящий	полувагон	100	5	Ш-1-ТМ
	Набегающий	платформа	21	1	Ш-1-ТМ
	Набегающий	полувагон	100	3	Ш-1-ТМ
5	Стоящий	полувагон	100	5	Ш-1-ТМ
	Набегающий	платформа	21	1	Р-5П
	Набегающий	полувагон	100	3	Ш-1-ТМ
6	Стоящий	полувагон	100	5	Ш-1-ТМ
	Набегающий	платформа	21	1	73ZW
	Набегающий	полувагон	100	3	Ш-1-ТМ

Выбор платформы не случаен, поскольку согласно опыту эксплуатации именно этот тип подвижного состава чаще других подвергается выжиманию и повреждению. Всего в этой группе опытов находится шесть вариантов проведения соударения, которые условно можно разделить на две половины. В первых трех вариантах скатывается одиночная платформа, в последних трех за платформой следуют груженные полувагоны. Скорость в штатном режиме во всех опытах будет равна 2 м/с. Также отметим, что в опытах фигурируют различные типы поглощающих аппаратов — шестигранный Ш-1-ТМ, резинометаллический Р-5П и эластомерный 73-ZW.

Из результатов следует, что во многих случаях аварией явился факт выкатки тележки из-под порожней платформы в результате недопустимо большого значения вертикальной составляющей продольной силы. Реакции, скорости и ускорения для двух режимов удобно представить в виде столбчатых диаграмм (рис. 3).

В качестве демонстрации интерфейса созданной программы и видов графиков, получаемых по завершению выполнения процесса, приведем вид окон программы для аварийного и штатного режимов роспуска платформы для опыта №4 из табл. 1 (рис. 4).

Для данной группы опытов можно сделать следующие выводы:

- минимальная скорость соударения сцепов заданной комплектации и конфигурации, при которой неизбежна авария, равна 1,8 м/с (опыт №3) — соответствует применению поглощающего аппарата 73-ZW на платформе;
- наибольший разброс в опытах имеют абсолютные значения ускорения набегающего вагона (варьируется от 2,64 до 7,46 долей g).

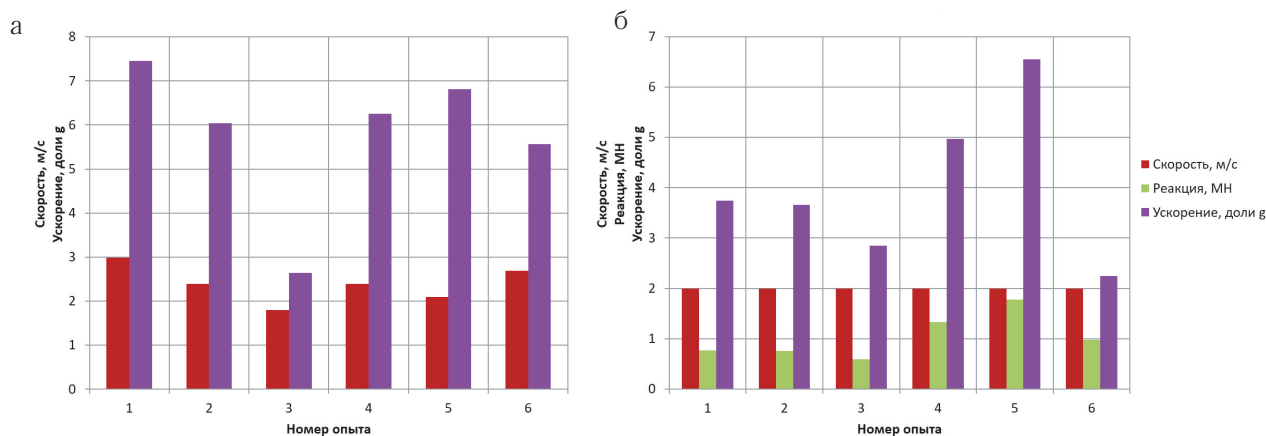


Рис. 3. Кинематические и силовые максимумы опытов с порожней платформой для аварийного (а) и штатного (б) режимов

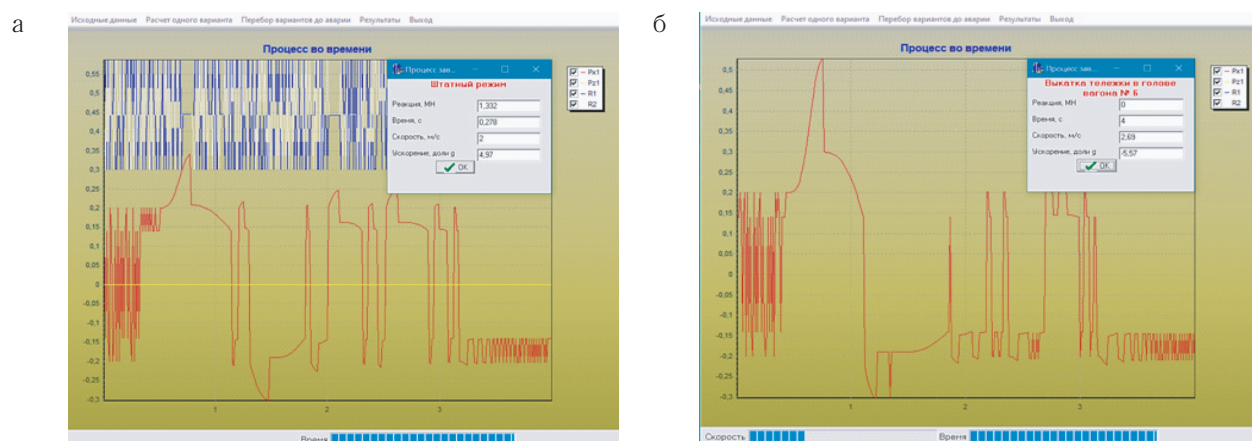


Рис. 4. Вид окна программы с результатами опыта №4 для штатного (а) и аварийного (б) режимов

Соударение полузагруженной платформы с группой полувагонов

Проведем аналогичный ряд экспериментов с порожней платформой. Исходные данные для эксперимента приведены в табл. 2. Конфигурация набегающих и стоящих сцепов аналогична совокупности опытов, приведенных ранее. Результаты приведены на рис. 5.

Для данной группы опытов можно сделать следующие выводы:

- реакция, при которой происходит повреждение автосцепки, близка к 4 МН;
- минимальная скорость соударения сцепов заданной комплектации и конфигурации, при которой неизбежна авария равна 2,99 м/с (опыт №5) — соответствует применению поглощающего аппарата Р-5П на платформе;
- наличие груза в платформе не позволяет возникать выжиманию вагона, и характер аварии изменился на «повреждение автосцепки» по сравнению с ранее приведенными опытами;
- наибольший разброс в опытах имеют абсолютные значения ускорения набегающего вагона (варьируется от 1,44 до 7,55 долей g);
- соударения со скоростями менее 2,99 м/с не вызывают мгновенной аварии, хотя значения, близкие к указанному максимуму, могут служить источником повреждений, которые скажутся при длительной эксплуатации вагона. К таким повреждениям можно отнести возникновение трещин. Для данной группы опытов указанное еще более актуально в связи с возросшими из-за увеличения массы платформы уровнями реакций.

Таблица 2

Исходные данные для опытов с полузагруженной платформой

№	Тип сцепа	Тип вагона	Масса брутто, т	Количество	Тип поглощающего аппарата
1	Стоящий	полувагон	100	5	Ш-1-ТМ
	Набегающий	платформа	56	1	Ш-1-ТМ
2	Стоящий	полувагон	100	5	Ш-1-ТМ
	Набегающий	платформа	56	1	Р-5П
3	Стоящий	полувагон	100	5	Ш-1-ТМ
	Набегающий	платформа	56	1	73ZW
4	Стоящий	полувагон	100	5	Ш-1-ТМ
	Набегающий	платформа	56	1	Ш-1-ТМ
	Набегающий	полувагон	100	3	Ш-1-ТМ
5	Стоящий	полувагон	100	5	Ш-1-ТМ
	Набегающий	платформа	56	1	Р-5П
	Набегающий	полувагон	100	3	Ш-1-ТМ
6	Стоящий	полувагон	100	5	Ш-1-ТМ
	Набегающий	платформа	56	1	73ZW
	Набегающий	полувагон	100	3	Ш-1-ТМ

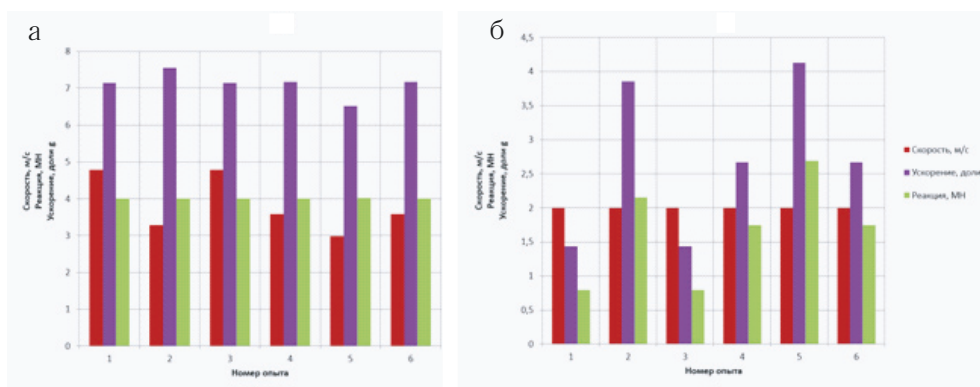


Рис. 5. Кинематические и силовые максимумы опытов с полузагруженной платформой для аварийного (а) и штатного (б) режимов

Выводы

Приведенная в статье методика и ее программная реализация позволяют проводить моделирование маневрового соударения сцепов вагонов и могут быть использованы для оценки процесса соударения сцепов выбранной конфигурации. Из результатов имитационных испытаний видно, что минимум продольных ускорений конструкции в штатном режиме обеспечивает применение эластомерного поглощающего аппарата на вагоне, а резинометаллический аппарат хорошо показывает себя в случае аварийного режима. Перспективным является концепция применения двух последовательно размещенных поглощающих аппаратов на вагоне. Однако необходимо также учитывать технологию производства поглощающих аппаратов и зависимость свойств рабочего тела эластомерного поглощающего аппарата от температуры. Опыт эксплуатации эластомерных поглощающих аппаратов свидетельствует об ухудшении свойств эластомера в диапазоне низких температур. Авторами исследуется вопрос усовершенствования методики для учета указанного фактора. 

Литература

1. Филиппов, В.Н. Исследование поведения вагонов при аварийном соударении / В.Н. Филиппов, Е.А. Радзиховский. — Текст: непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. — Москва. — 1994. — №3. — С. 9–12.
2. Асадулин, Е.А. Параметры плавающей хребтовой балки и актуальность ее применения для грузового подвижного состава / Е.А. Асадулин, А.И. Пайзилдаев, Г.Р. Мепаришвили. — Текст: непосредственный // Вестник науки. — 2020. — Т.4, №6 (27). — С. 197–201.
3. Американские железнодорожные энциклопедии / Гл. ред. Е.С. Изралимский-Марут, Вагоны / Под ред. П.И. Травина; Перевод с английского выполнен П.В. Бергом. — Москва, 1937. — 844 с. — Текст: непосредственный.
4. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) с изменениями и дополнениями на 2004 г. — Москва: ГосНИИВ — ВНИИЖТ, 1996. — 319 с. — Текст: непосредственный.
5. ЦМ — 943 Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах: Утверждены МПС России 27 мая 2003 г. — Текст: непосредственный.
6. Сергеев, И.К. Обзор исследований и программных комплексов для решения задач динамики подвижного состава / И.К. Сергеев, С.В. Беспалько. — Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. — 2021. — №1. — С. 45–50.
7. Беспалько, С.В. Исследование соударений вагонов, оборудованных эластомерными поглощающими аппаратами, с использованием компьютерного моделирования / С.В. Беспалько, С.С. Андриянов. — Текст: непосредственный // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. — 2004. — №5. — С. 7–8.