

# Анализ контроля устойчивости вагона при допуске на инфраструктуру

Т. А. АНТРОПОВА<sup>1</sup>, М. И. ГЛУШКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС), Екатеринбург, 620034, Россия

<sup>2</sup> «Уральское отделение» — филиал акционерного общества «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (Уральское отделение АО «ВНИИЖТ»), Екатеринбург, 620027, Россия

**Аннотация.** Подвижной состав и железнодорожный путь представляют собой единую механическую систему. Ходовые части подвижного состава и рельсовая колея взаимодействуют в сложных динамических условиях. Постоянная тенденция развития железнодорожного транспорта по отношению к взаимодействию силовой фрикционной пары «колесо — рельс» состоит в увеличении нагрузки от оси на рельсы для грузового подвижного состава и дальнейшем повышении скорости движения пассажирских поездов. Для выполнения поставленных целей необходимы квалифицированный подход к вопросам безопасности движения и особенное внимание к устойчивости подвижного состава.

На основании нормативных документов, устанавливающих основные положения и порядок работы железных дорог и работников железнодорожного транспорта, проведен анализ контроля устойчивости вагона при допуске на инфраструктуру. Предложено устранение существующих недостатков и обеспечение устойчивости движения экипажа за счет оптимизации параметров размещения груза в вагоне. Проведены расчеты условий опрокидывания (потери устойчивости) кузова и показателя критической скорости, при которой происходит сход экипажа по причине потери контакта колес с внутренней рельсовой нитью кривой.

**Ключевые слова:** вагон; груз; колесная пара; рельс; силовое взаимодействие; устойчивость

**Цель исследования.** Одним из главных направлений совершенствования работы железнодорожного транспорта является повышение скоростей движения грузовых поездов, что, в свою очередь, позволяет уменьшить время доставки грузов для всех видов отправок [1]. Особенно актуальной в рамках обеспечения безопасности движения становится задача по анализу устойчивости вагона и определению его фактического центра тяжести. Таким образом, целью настоящего исследования являются выявление возможного смещения центра тяжести грузового вагона, угрожающего потерей устойчивости и тем самым безопасности движения, и разработка способа контроля устойчивости вагона, позволяющего определять соответствие его центра тяжести установленным нормативам устойчивости для допуска на инфраструктуру, контролировать в процессе движения все необходимые параметры и корректировать ско-

рость движения при наличии вагона с отклонениями от допустимых норм.

Основные положения и порядок работы железных дорог изложены в Правилах технической эксплуатации (ПТЭ) [2]. Очередное изменение ПТЭ, которое вступило в силу 19 ноября 2016 г., касается порядка допуска в эксплуатацию вновь изготовленного, модернизированного, а также прошедшего ремонт железнодорожного подвижного состава посредством его осмотра владельцем инфраструктуры. Интересно, что допуск того же подвижного состава на железнодорожные пути необщего пользования устанавливает владелец этих путей. Еще более важен факт отсутствия в ПТЭ порядка допуска в эксплуатацию вагона после выполнения работ с размещением и закреплением груза для предстоящего перевозочного процесса. При размещении груза изменяется расположение общего центра тяжести вагона с грузом, перераспределяются нагрузки между тележками и между колесами, что влияет на устойчивость вагона и безопасность движения. Поэтому ПТЭ обязывают работников, ответственных за погрузку, размещение, крепление грузов в вагонах, контейнерах и выгрузку грузов, проходить аттестацию, предусматривающую проверку знаний технических условий размещения и крепления грузов в железнодорожном подвижном составе (далее — ТУ) [3]. Кроме того, ПТЭ допускает: «...на станционных железнодорожных путях общего и необщего пользования могут устанавливаться вагонные весы, предназначенные для выполнения операций по взвешиванию вагонов и перевозимых в вагонах грузов. Электронные вагонные весы должны иметь устройства, обеспечивающие сохранение и выдачу на печать информации о результатах взвешивания». Однако мероприятия по обслуживанию грузовых операций и взвешиванию вагонов имеют чисто коммерческий характер.

Анализ данных о вагонах с коммерческими неисправностями показал, что около 64% из их общего количества приходится на коммерческие неисправности, связанные с размещением и креплением груза в вагонах (22% вагонов были погружены с нарушени-

■ E-mail: [t-an-antropova@mail.ru](mailto:t-an-antropova@mail.ru) (Т. А. Антропова)

ем требований ТУ, а 42% вагонов — с расстройством погрузки в пути следования) [4]. Такие результаты требуют формирования нового подхода к проблеме устойчивости вагона с грузом.

Подвижной состав удобно представить в виде трехъярусной этажерки, а категории устойчивости рассматривать последовательно для каждого набора составной этажерки. Например, для закрепленного на кузове груза — первая категория устойчивости; кузов (или кузов с грузом), опирающийся на тележку с помощью узла «пятник — подпятник» — вторая категория; вагон, располагаемый на рельсах, — третья категория. Из этих категорий целесообразно исходить при разработке концепции высокоскоростного грузового поезда. Конструкция всех вагонов является симметричной и при отсутствии форс-мажорной ситуации обеспечивает устойчивость. Поэтому основное внимание следует обратить на вес и параметры размещения груза: расположение центра тяжести (ЦТ) груза вдоль и поперек вагона, а также высоту общего ЦТ вагона с грузом, которые предусмотрены ТУ [3]. Следует отметить, что данные ТУ распространяются на универсальные полувагоны и платформы на тележках типа ЦНИИ-ХЗ с зазорными скользунками. В соответствии с целью проводимого исследования в рамках данной статьи рассматривается влияние месторасположения груза и, как следствие, ЦТ на устойчивость вагона независимо от его типа и модели. На железнодорожном транспорте широкий размах получило движение в сфере развития производственных систем с применением технологий бережливого производства. Очевидно, бережливое производство должно начинаться с предотвращения крушений, аварий и отказов технических средств, т. е. с безопасности движения. Именно этого требует установленный ориентир на высокие скорости и повышенные нагрузки, а для реализации этого требования необходимы квалифицированный подход к вопросам безопасности движения и особенное внимание к устойчивости грузового вагона с грузом. Устойчивость подвижного состава относится к глобальной проблеме «колесо — рельс» и определяется взаимодействием ходовых частей с рельсовой колеёй, а случаи потери устойчивости следует классифицировать как нарушение силового равновесия движущейся системы. Несмотря на усеченное представление устойчивости грузового вагона в названии проблемы «колесо — рельс», оно имеет логическое подтверждение: при потере устойчивости происходит обезгруживание одного колеса колесной пары, при этом второе из колес полностью воспринимает осевую нагрузку.

В соответствии с ТУ при размещении грузов общий ЦТ грузов должен располагаться на линии пересечения продольной и поперечной плоскостей сим-

метрии вагона [3, п. 6.3]. В исключительных случаях возможно смещение общего ЦТ груза в поперечном направлении на допускаемую величину  $b_c$  [3, табл. 11, с. 27]. Нормативная таблица заполнена несколькими конкретными значениями массы груза, высоты общего ЦТ вагона с грузом и допускаемым поперечным смещением  $b_c$  общего ЦТ грузов. В примечании мастерам погрузки рекомендуется для промежуточных значений массы груза выполнять расчеты методом линейной интерполяции. Приведенные в соответствующих таблицах параметры не создают представления об их влиянии на устойчивость вагона и требуют специальных расчетов.

Устранение перечисленных недостатков и обеспечение устойчивости движения грузового вагона возможно за счет оптимизации параметров размещения груза в вагоне. При смещении ЦТ груза в продольном направлении происходит перераспределение веса груза  $Q_r$  на пятники тележек; при поперечном смещении ЦТ груза происходит перераспределение веса груза между колесами каждой оси. В связи с этим анализ влияния смещения груза целесообразно проводить по изменению нагрузки между колесами. Продольное смещение ЦТ груза  $l_c$  вызывает изменение нагрузки на тележки и соответствующее изменение нагрузки на все колеса каждой отдельной тележки. На рис. 1 представлено распределение нагрузки от груза на каждое колесо П тележек  $T_1$  и  $T_2$  при значениях  $l_c$ , допускаемых ТУ.

Из рис. 1 следует: по нормам данного документа вполне возможен допуск на инфраструктуру вагона при существенной разнице осевой нагрузки между тележками, что при торможении может привести к дополнительной разгрузке колес тележки  $T_2$  и заклиниванию колесных пар.

Опора кузова на тележку не является жесткой, поэтому при поперечном смещении груза и под действием поперечных сил плоский контакт узла «пятник — подпятник» переходит в кромочный контакт пятника с опорой кузова на скользунки. Нормативный суммарный зазор между скользунками кузова и тележки составляет 4–20 мм; допускается отсутствие зазоров между скользунками одной стороны тележки, отсутствие зазоров между скользунками по диагонали вагона не допускается. При отсутствии зазора у одной пары скользунков тележки есть вероятность устранения плоского контакта узла «пятник — подпятник» и создания условий нарушения устойчивости, относящейся к кузову.

По данным ПАО «ТрансКонтейнер»: «В 2015 году по сравнению с 2014 годом допущен рост отцепок вагонов по таким неисправностям тележек, как износ колпака скользуна (на 187%); трещина колпака скользуна (на 98%); несоответствие зазоров скользу-

нов (на 22%)» [5]. Переход к опоре кузова на скользуны с одной стороны тележки определяется весом и поперечным смещением ЦТ груза, допускаемые величины которых задаются ТУ. На рис. 2 представлены зависимости между весом груза  $Q_r$  и его поперечным смещением  $b_c$ , определяющая условия опоры кузова на скользуны, а также сравнение с рекомендациями ТУ.

Очевидно, наблюдается несоответствие между расчетными данными и параметрами, заложенными в ТУ, в представлениях о влиянии смещения груза на устойчивость вагона и состояние скользунов. Даже при соблюдении рекомендаций ТУ [3, табл. 11, с. 27] может возникнуть ситуация, когда после погрузки у вагона с одной стороны будут отсутствовать зазоры скользунов. При этом происходит смещение ЦТ кузова и возникает кромоочное взаимодействие узла «пятник — подпятник», что может привести к потере устойчивости кузова с грузом.

Поперечное смещение  $b_c$  общего ЦТ грузов оказывает существенное влияние также на распределение осевой нагрузки между колесами колесной пары. На рис. 3 приводится такая зависимость, где  $P$  обозначает нагрузку на одно колесо. Графики распределения нагрузки на колеса одной оси составлены на основе рекомендаций ТУ с учетом влияния высоты общего ЦТ для значения  $H = 1,2$  м.

В ТУ приводятся отдельные таблицы для продольного  $l_c$  и поперечного  $b_c$  смещения ЦТ груза. Однако при размещении грузов в вагоне не исключаются события одновременного смещения общего ЦТ грузов в продольном и поперечном направлении. Для представления о результатах такого события авторами были проведены соответствующие расчеты и по нормативам ТУ составлены графики распределения нагрузки на колеса в зависимости от веса груза (рис. 4).

Как следует из рис. 4, а и 4, б, при неблагоприятных условиях размещения груза максимально допустимого веса разность сил в колесах одной тележки в два раза меньше, чем в вагоне, т. е. около 4 тс, что необходимо учитывать как важный фактор для вписывания вагонов в кривых при торможении (поэтому на платформах для перевозки контейнеров иногда на каждую тележку устанавливают авторежим). Тормозная сила от колодок распределяется равномерно по колесам и передается на рельсы в виде силы сцепления. Сила сцепления каждого колеса определяется величиной нагрузки от колеса на рельс, умноженной на коэффициент сцепления.

На рис. 5 приведена схема реализации сил в тормозном режиме тележки. Коэффициент сцепления зависит в основном от осевой нагрузки, состояния поверхностей колеса и рельса, скорости движения, площади контакта и может изменяться в широких пределах (0,04–0,30). Если принять расчетную вели-

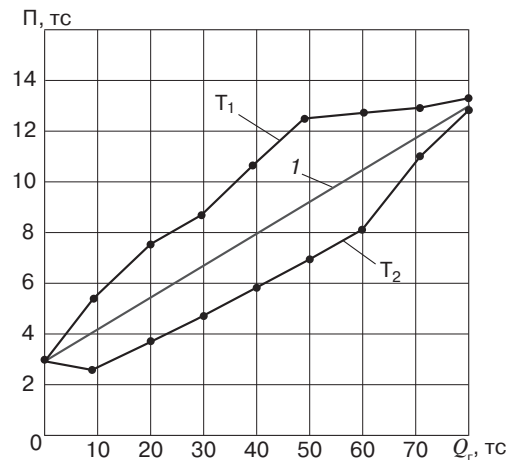


Рис. 1. Распределение нагрузки от перевозимого груза на колесо по нормам ТУ при максимально допустимых продольных смещениях  $l_c$  ЦТ груза (в зависимости от веса груза  $Q_r$ );  $T_1, T_2$  — тележки;  $I$  — распределение нагрузки от перевозимого груза на колесо при условии равномерной загрузки вагона и отсутствии смещения ЦТ груза

Fig. 1. Load distribution from the transported load to the wheel according to the technical specifications (TS) at the maximum permissible longitudinal displacements  $l_c$  of the load CG (depending on  $Q_r$ );  $T_1, T_2$  — bogies;  $I$  — distribution of the load from the transported freight to the wheel, provided that the load is evenly loaded and there is no displacement of the load CG

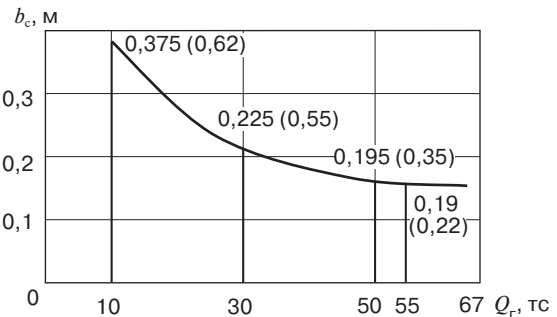


Рис. 2. Условие перехода кузова на скользуны ( $b_c$ ) в зависимости от веса груза  $Q_r$ . В скобках — нормативные значения  $b_c$  согласно ТУ  
Fig. 2. Condition of the body transition to the slip ( $b_c$ ), depending on the weight of the load  $Q_r$ . In parentheses — the normative values of  $b_c$  according to TS

чину коэффициента сцепления  $\psi = 0,12$ , то разность сил сцепления каждого колеса колесной пары составит 0,96 тс, а возникающий от разности сил сцепления момент относительно узла «пятник — подпятник» приведет к перекосу колесных пар тележки в рельсовой колее.

Локомотивная бригада, как оператор человеко-машинной системы, не всегда обращает внимание на состояние пути в плане. В качестве иллюстраций можно привести последствия превышения допустимой скорости в кривых на входной стрелке станции Белая Калитва Северо-Кавказской дороги (9 мая 2013 г.) и сход пассажирского поезда Alvia близ г. Сантьяго-де-Компостела (Испания, 24 июля 2013 г.). Все приведенные факты относятся к случаям потери устой-

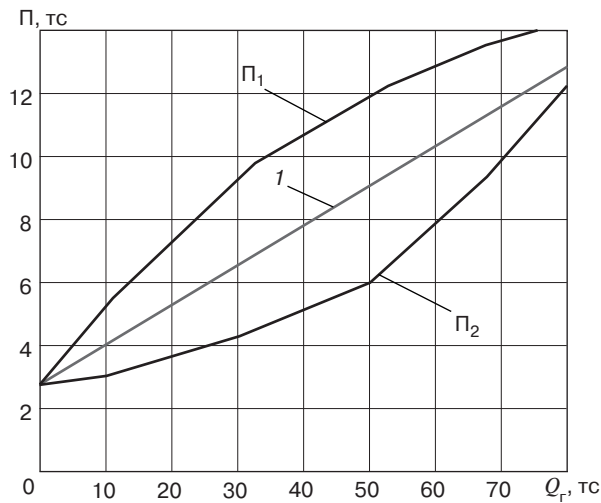


Рис. 3. Распределение нагрузки на колеса колесной пары  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  при нормативном смещении  $b_c$  и высоте ЦТ вагона с грузом  $H = 1,2$  м;  $I$  — распределение нагрузки от перевозимого груза на колеса при условии равномерной загрузки вагона и отсутствии смещения ЦТ груза

Fig. 3. Load distribution on the wheels of wheelsets  $\Pi_1$  and  $\Pi_2$  at the standard displacement  $b_c$  and height of the car's CG with freight  $H = 1.2$  m;  $I$  — distribution of the load from the transported freight onto the wheels provided that the car is loaded evenly and there is no displacement of the load CG

чивости от действия центробежной силы [6]. Такую потерю устойчивости не следует полностью относить к отказам техники. При потере устойчивости возникает крэш-ситуация, которая может быть обусловлена только нарушением режима ведения поезда на конкретном участке пути. Аналитики обычно рассматривают поперечную устойчивость вагона при движении в кривой. На самом деле, силы вкатывания гребня колеса на головку рельса всегда недостаточно, чтобы преодолеть возникающую вертикальную нагрузку на рельс от действия центробежной силы; следует учитывать силы взаимодействия колеса и рельса и величины геометрии колеса (гребня).

При исправном техническом состоянии грузового вагона и рельсового пути поперечная устойчивость подвижного состава определяется центробежной силой, которая возникает при движении по криволинейным участкам пути, приложена в ЦТ и направлена радиально наружу кривой. Величина центробежной силы  $Y$  определяется по известной формуле

$$Y = \frac{mv^2}{R}, \quad (1)$$

где  $m$  — масса грузового вагона, кг;  $v$  — скорость движения, м/с;  $R$  — радиус кривой, м.

Кроме этого, рекомендуют [3] учитывать поперечную силу от ветровой нагрузки  $W_b$ , кгс, величина которой определяется из расчета удельной ветровой нагрузки, равной  $50$  кгс/м<sup>2</sup>, по формуле

$$W_b = 50 S_n,$$

где  $S_n$  — площадь наветренной поверхности грузового вагона, м<sup>2</sup>.

Проверку устойчивости движения грузового вагона для оптимизации параметров скорости движения и размещения груза в вагоне следует проводить с помощью предлагаемого графоаналитического метода [6], который представлен на рис. 6, для определения показателя критической скорости по условиям опрокидывания грузового вагона. Потеря устойчивости грузового вагона при движении в кривой (критическое состояние) может произойти в том случае, когда равнодействующая этих сил проходит через правую опору (наружный рельс кривой), как представлено на рисунке. Такое положение возникает при достижении критической скорости. Векторы  $Q$  и  $g$  имеют общий коэффициент  $m$ , поэтому все графические построения выполняются независимо от массы грузового вагона и груза на основе соотношения векторов ускорения  $g$  и  $v^2/R$ , что не требует классификации груза по величине массы.

ЦТ грузового вагона с грузом располагается на некоторой высоте  $H$  относительно головки рельсов, поэтому при движении в кривой от действующей центробежной силы возникает опрокидывающий момент  $M = YH$ , который воспринимается колесами и приводит к перераспределению вертикальной реакции колес каждой колесной пары с базой, обозначаемой  $S_2$ . Устойчивость грузового вагона при действии момента от центробежной силы представляется как состояние силового равновесия движущейся системы, при котором не происходит опрокидывания грузового вагона наружу кривой. Таким образом, устойчивость движения грузового вагона зависит от расположения ЦТ, параметров рессорного подвешивания, скорости движения и радиуса кривой, а величина критической скорости  $v_k$ , м/с, при которой происходит потеря устойчивости, определяется с помощью графоаналитического метода из соотношения ускорений

$$\frac{v_k^2}{R} = g \frac{0,5S_2}{H}. \quad (2)$$

Поперечная устойчивость определяется размещением груза и центробежной силой, влияние которой зависит от высоты ЦТ, скорости движения грузового вагона и радиуса кривой (принято допущение, что сила ветра, а также продольная сила в поезде отсутствуют и в расчете не учитываются). На рис. 6 приводится схема распределения сил для случая смещения общего ЦТ на величину  $b_c$ . При движении на прямом участке и расположении общего ЦТ вагона на продольной оси реакция каждого из рельсов составляет половину веса вагона с грузом ( $0,5Q$ ). При



движении в кривой на вагон действует поперечная сила  $Y$ , вызванная центробежным ускорением. При поперечном смещении ЦТ на величину  $b_c$  (положение ЦТ) потеря устойчивости происходит при меньшей критической скорости; одновременно перераспределяется нагрузка от колес на рельсы. Показатель критической скорости, при которой происходит потеря устойчивости на пути без возвышения рельса, определяется из выражения

$$\frac{v_k^2}{R} = g \frac{0,5S_2 - b_c}{H},$$

где  $b_c$  — допускаемое поперечное смещение общего ЦТ груза в вагоне, м.

После подстановки известного значения ( $S_2 = 1,58$  м, где  $S_2$  — расстояние между кругами катания колес, единое расстояние для всех типов колесных пар, справочное значение 1,58 м) получим расчетную формулу

$$\frac{v_k^2}{R} = g \frac{0,79 - b_c}{H}. \quad (3)$$

Выражение  $v_k^2 / R$  обозначает показатель критической скорости при движении в кривой. Для всех значений смещения груза должны быть установлены единые значения показателя критической скорости. Обеспечение максимального показателя критической скорости возможно при минимальных значениях  $b_c$  и  $H$ , которые можно выбрать из условий, предусмотренных ТУ (табл. 11). Например, для массы груза в вагоне 67 т высота ЦТ составляет 1,5 м при  $b_c = 0,18$  м. Для выбранных параметров определяется показатель критической скорости  $v_k^2 / R = 0,4g$ .

Для компенсации действия центробежной силы в кривых устраивают возвышение  $h$ , м, наружного рельса. Поперечное смещение общего ЦТ грузового вагона проявляет различный характер при движении в кривой: при компенсации центробежной силы возвышением рельса поперечное смещение в сторону возвышения создает условия для опрокидывания вагона наружу кривой; при остановке поперечное смещение ЦТ внутрь кривой создает условия для потери устойчивости вследствие разгрузки колес на внешнем рельсе. Оценка влияния возвышения наружного рельса  $h$  и смещения груза относительно продольной оси  $b_c$  при остановке в кривой выполняется по формулам

$$Q \frac{hH}{S_2} = YH;$$

$$mg \frac{hH}{S_2} = mg(0,5S_2 - b_c);$$

$$hH = 0,5S_2^2 - S_2 b_c.$$

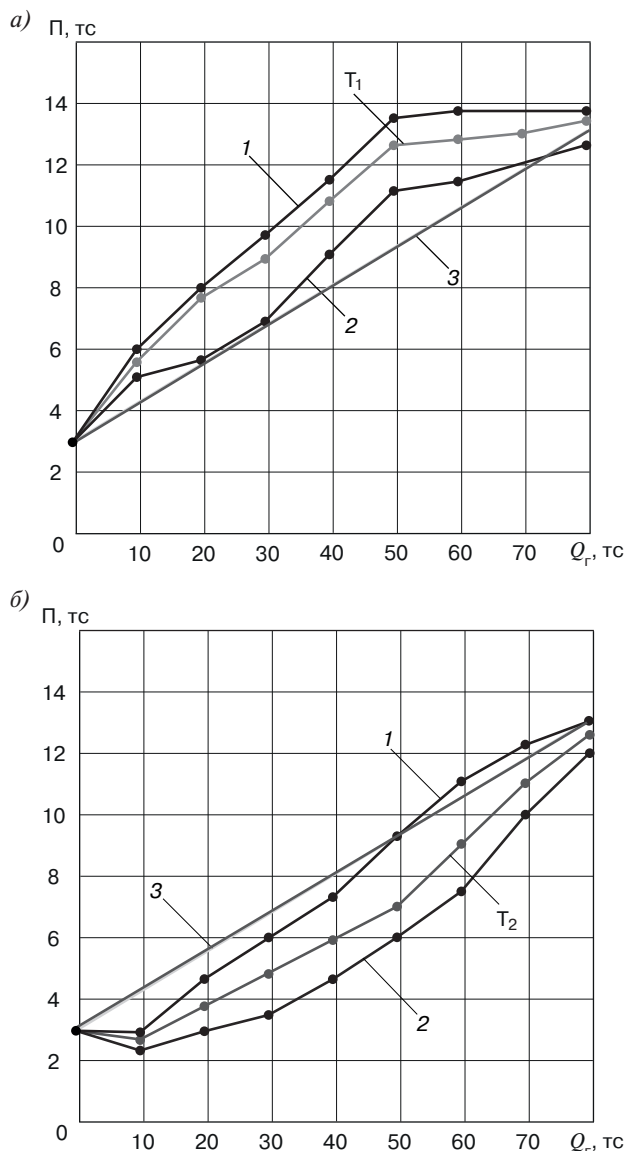


Рис. 4. Распределение нагрузки на колесо по нормам ТУ при максимально допустимых продольных и поперечных смещениях ЦТ груза (в зависимости от  $Q_1$ ): а — распределение нагрузки на колеса тележки  $T_1$  при смещении ЦТ груза в сторону тележки  $T_1$  от тележки  $T_2$ ; б — распределение нагрузки на колеса тележки  $T_2$  при смещении ЦТ груза в сторону тележки  $T_1$  от тележки  $T_2$ ; 1 — колеса правой стороны; 2 — колеса левой стороны; 3 — распределение нагрузки от перевозимого груза на колеса тележки при условии равномерной загрузки вагона и отсутствии смещения ЦТ груза;  $T_1$  — средняя нагрузка на колеса тележки  $T_1$ ;  $T_2$  — средняя нагрузка на колеса тележки  $T_2$

Fig. 4. Load distribution on the wheel according to the specifications of TS at the maximum permissible longitudinal and lateral displacements of the load CG (depending on  $Q_1$ ): а — load distribution on the wheels of the bogie  $T_1$  when the CG of the load is shifted towards the bogie  $T_1$  from the bogie  $T_2$ ; б — load distribution on the wheels of the bogie  $T_2$  when the CG of the load is shifted towards the bogie  $T_1$  from the bogie  $T_2$ ; 1 — wheels of the right side; 2 — wheels of the left side; 3 — distribution of load from the transported freight to the wheels of the bogie under the condition of a evenly loading of the car and no displacement of the load CG;  $T_1$  — average load on the wheels of the bogie  $T_1$ ;  $T_2$  — average load on the wheels of the bogie  $T_2$

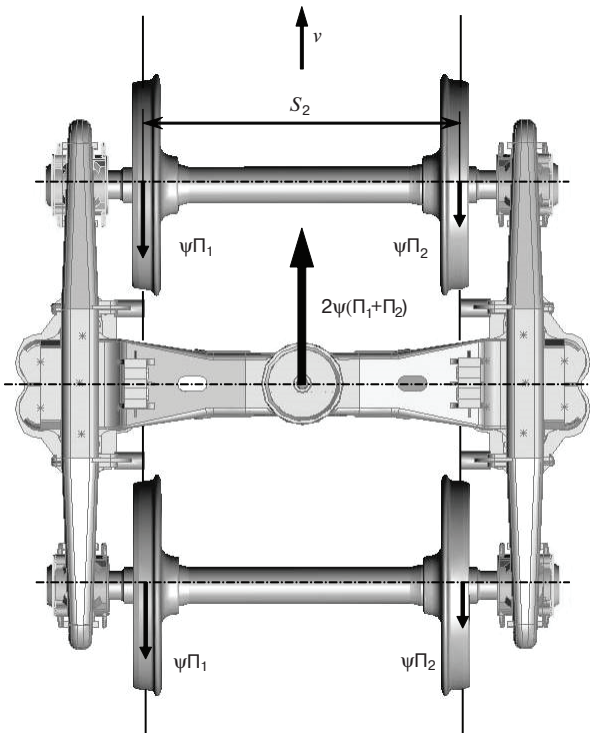


Рис. 5. Схема приложения сил сцепления к тележке при торможении

Fig. 5. Application scheme of coupling forces to the bogie at braking

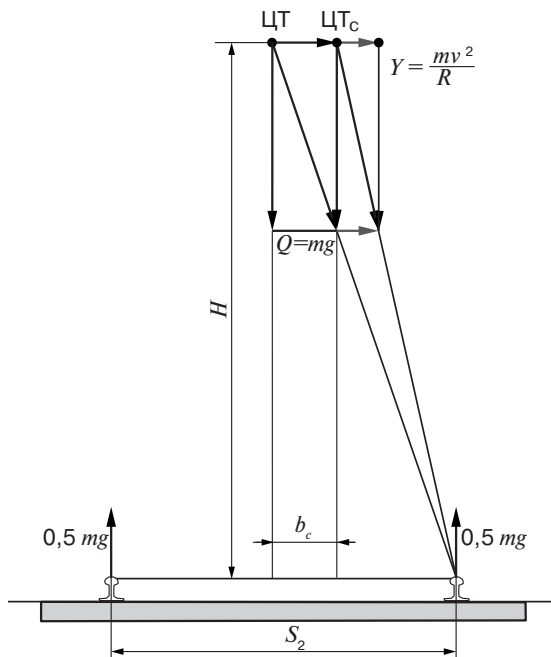


Рис. 6. Графический способ контроля устойчивости экипажа:  $S_2$  — расстояние между кругами катания колес, м;  $H$  — высота ЦТ вагона, м;  $Y = mv^2 / R$  — действующая центробежная (поперечная) сила, тс;  $Q = mg$  — вес вагона с грузом, тс;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>

Fig. 6. Graphic way to control the stability of the carriage:  $S_2$  — distance between wheel rounds, m;  $H$  — height of the car's CG, m;  $Y = mv^2 / R$  — acting centrifugal (transverse) force, ts;  $Q = mg$  — weight of the car with freight, ts;  $g$  — acceleration of gravity, m/s<sup>2</sup>

Принимая  $S_2 = 1,58$  м, получаем:

$$hH \leq 1,25 - 1,58b_c. \quad (4)$$

Проведенные расчеты условий опрокидывания (потери устойчивости) кузова и показателя критической скорости, при которой происходит сход грузового вагона по причине потери контакта колес с внутренней рельсовой нитью кривой, показывают одинаковые условия потери устойчивости кузова и вагона. Опорой кузова в конечном итоге является пружинно-фрикционный комплект тележки. Переход пятника на кромочное воздействие сопровождается дополнительным риском, так как при наличии зазоров переход сопровождается ударным воздействием и смещением ЦТ вагона не только за счет зазоров, но также и вследствие дополнительного прогиба пружинно-рессорного комплекта тележки. Таким образом, нюансы передачи нагрузки от кузова вагона на рельсы требуют особого внимания при проектировании тележек новых конструкций.

При движении в тяговом и тормозном режимах на подвижной состав действуют продольные силы, а от центробежного ускорения и воздействия ветра и, главное, из-за влияния — поперечные силы. Продольные силы в тормозном режиме вызывают разгрузку колесных пар последней тележки [7], поэтому при разгрузке тележки может происходить заклинивание колесных пар, а при различии силы сцепления колес каждой колесной пары — перекося тележки.

В отношении насыпных и наливных грузов, а также порожних вагонов известными остаются места приложения сил и последствия их воздействия. Для перевозки отдельных грузов пользуются рекомендациями ТУ. Продольное смещение ЦТ груза приводит к перераспределению нагрузки на тележки; поперечное смещение ЦТ груза приводит к перераспределению нагрузки на колеса каждой стороны вагона. Практически возможно любое сочетание динамических воздействий при движении в кривой, действии ветра, смещении ЦТ груза, приводящее к последствиям в виде заклинивания колесных пар, перекося тележек, схода или опрокидывания грузового вагона.

Все нормативы ТУ по размещению грузов являются теоретическим ориентиром для мастеров погрузки.

Контроль параметров вагона, обеспечивающих устойчивость, приобретает особое значение в связи с уже имеющейся концепцией грузового высокоскоростного поезда.

Фактические параметры объекта в виде грузового вагона с грузом должны определяться по нагрузке на рельс от каждого колеса методом последовательного взвешивания. Известные устройства взвешивания подвижного состава, например «Весы вагонные электро-механические для статического взвешивания и взвешивания при движении типа ТС-СД-ЖД «ИнфаТрэк»,

«Весы вагонные М8300» (Свидетельство RU.C 28.010.A № 50037) и ряд других, имеют коммерческий характер и предназначены «для измерения массы грузов, перевозимых железнодорожными вагонами» [8].

Недостатком их является отсутствие контроля состояния силового взаимодействия в зоне контакта колес с рельсами, влияющего на устойчивость вагона в движении. Целесообразно придать устройствам взвешивания функциональную возможность предварительного контроля устойчивости грузового вагона после размещения груза путем измерения параметров силового взаимодействия между колесами грузового вагона и рельсами для определения возможности допуска грузового вагона на инфраструктуру.

Такая возможность реализуется следующим образом. В процессе движения вагона производится измерение вертикальных сил взаимодействия между рельсом и каждым колесом грузового вагона с грузом на двух позициях с помощью двух взвешивающих модулей. Причем при движении на первой позиции, в виде горизонтального участка пути, проверяется соответствие различия сил между тележками, между каждым колесом и рельсом установленным нормам, а при движении на второй позиции, в виде участка пути с известным возвышением рельса, определяется высота общего ЦТ грузового вагона с грузом.

Для этого используется принцип взвешивания, который реализуется в применяемых железнодорожных вагонных весах «ВЖ», зарегистрированных в реестре средств измерения и допущенных к применению в ОАО «РЖД», или весах аналогичной конструкции типа «Матас™». Однако на предприятиях при отправке и приемке грузов железнодорожные весы пред-

назначены только для коммерческого взвешивания. Принцип взвешивания реализуется с помощью предлагаемого способа двухпозиционного контроля при движении подвижного состава перед допуском на инфраструктуру, схема которого приводится на рис. 7.

Контроль устойчивости вагона с грузом выполняется следующим образом. На первой позиции производится поочередное взвешивание каждого колеса двумя взвешивающими модулями 3, установленными на каждой нити рельсового пути, а при движении на второй позиции, выполненной в виде участка пути с известным возвышением рельса  $h$ , с помощью двух таких же взвешивающих модулей определяется высота  $H$  общего ЦТ грузового вагона с грузом. Результаты взвешивания поступают в программные модули, непосредственно связанные с вычислением веса. В соответствии с ГОСТ Р 8.598–2003 (п. 3.4.2.1) [9] устройство поочередно воспринимает нагрузку от каждой оси с дальнейшим суммированием результатов взвешивания и регистрацией результатов на печатающем устройстве для вагона в целом. В процессе движения вагона с грузом при помощи двухпозиционного контроля и результатов взвешивания определяются следующие параметры вагона с грузом (действия сил ветра и продольных сил в поезде в формулах не учитываются):

1. Распределение весовой нагрузки тележек вагона  $T$ ,  $t$ , на рельсы:

$$T_1 = \sum P_{л1,2} + \sum P_{п1,2}; \quad T_2 = \sum P_{л3,4} + \sum P_{п3,4}.$$

2. Общий вес вагона с грузом:

$$Q_r + P = T_1 + T_2,$$

где  $Q_r$  — общий вес груза,  $t$ ;  $P$  — тара вагона,  $t$ .

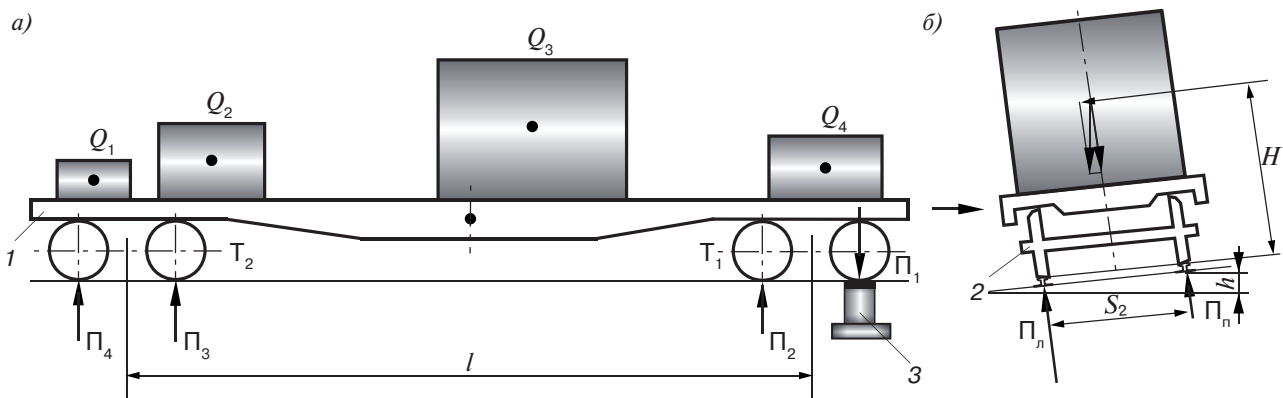


Рис. 7. Схема измерения усилий между колесами и рельсами и определения высоты ЦТ вагона с грузом при контроле устойчивости: а — первая позиция; б — вторая позиция;  $l$  — кузов вагона; 2 — колесная пара; 3 — взвешивающий модуль;  $T_1, T_2$  — первая и вторая тележки;  $l$  — база вагона, м;  $S_2$  — база колесной пары ( $S_2 = 1,58$  м);  $P_{л1...л4}$  — нагрузка от каждого колеса на рельс левой стороны,  $t$ ;  $P_{п1...п4}$  — то же правой стороны,  $t$ ;  $H$  — высота ЦТ вагона с грузом, м;  $h$  — возвышение одного из рельсов, м;  $\sum Q_i = Q_r$  — общий вес груза

Fig. 7. Measurement scheme of forces between wheels and rails and determination of the height of the car's CG with load under stability control: а — first position; б — second position;  $l$  — car body; 2 — wheelset; 3 — weighing module;  $T_1, T_2$  — first and second bogie;  $l$  — base of the car, m;  $S_2$  — wheelset base ( $S_2 = 1.58$  m);  $P_{л1...л4}$  — the load from each wheel to the rail on the left side,  $t$ ;  $P_{п1...п4}$  — the same on the right side,  $t$ ;  $H$  — height of the vehicle's CG with freight, m;  $h$  — the elevation of one of the rails, m;  $\sum Q_i = Q_r$  — total weight of freight

3. Соответствие нагрузки на ось 2П действующим нормам:

$$(\Pi_n + \Pi_{\text{н}}) \leq [2\Pi].$$

4. Различие весовой нагрузки тележек Т контролируемого вагона на рельсы:

$$T_1 - T_2 = \Delta T \leq [\Delta T].$$

5. Различие весовой нагрузки колес тележек П на рельсы:

$$\sum \Pi_{\text{л}1,2} - \sum \Pi_{\text{н}1,2} < [\Delta \Pi];$$

$$\sum \Pi_{\text{л}3,4} - \sum \Pi_{\text{н}3,4} < [\Delta \Pi].$$

6. Высота ЦТ вагона с грузом:

$$H = \frac{\sum \Delta \Pi_0}{hQ} S_2^2,$$

где  $\Delta \Pi_0$  — разность весовой нагрузки колес П одной стороны вагона на рельсы, измеренная на второй позиции, тс.

Выполнение приведенных неравенств по результатам контроля означает достаточную устойчивость вагона с грузом для допуска на инфраструктуру.

Кроме того, с учетом формулы (2) при выбранной высоте возвышения рельса  $h = 0,15$  м можно определить показатель критической скорости для полученного значения высоты ЦТ контролируемого вагона:

$$\frac{v_k^2}{R} = 0,46 \frac{Q}{\sum \Delta \Pi_0}.$$

При контроле устойчивости вагона с грузом с помощью двухпозиционного взвешивания полученные результаты позволяют также определить  $H$  общего ЦТ, величины  $l_c$  и  $b_c$  ЦТ груза:

$$H = 16 \frac{\sum \Delta \Pi_0}{Q}; \quad \frac{l_c}{l} = 0,5 \frac{T_1 - T_2}{Q}; \quad \frac{b_c}{S_2} = \frac{\sum \Pi_{\text{л}} - \sum \Pi_{\text{н}}}{Q}.$$

**Выводы.** Применение предлагаемого способа позволяет выявить параметры вагона с грузом, их соответствие установленным нормативам устойчиво-

сти для допуска на инфраструктуру, контролировать в процессе движения все необходимые параметры и корректировать скорость движения при наличии вагона с отклонениями от допустимых норм.

Работники, занятые погрузкой, размещением и креплением грузов в вагонах, будут нести ответственность только за надежное крепление грузов и контейнеров, обеспечивающее безопасность движения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сергеенко О. Ставка на высокие скорости // Гудок. 2016. № 227 (26132). С. 1–2.
2. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: утв. Приказом Минтранса России от 21 декабря 2010 г. № 286 [ред. от 01.09.2016 с изм. и доп., вступ. в силу 01.07.2017].
3. Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах: утв. МПС России 27.05.2003 г. № ЦМ-943. М.: Юргтранс, 2003. 544 с.
4. Молчанова О. В. Снижение коммерческих браков у грузов со смещенным центром тяжести на вагоне: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.08. Екатеринбург: УрГУПС, 2010. 18 с.
5. Вопрос дня: с какими проблемами вы сталкиваетесь в области ремонта подвижного состава? // Гудок. 2016. № 58 (25963). С. 4.
6. Глушко М. И. Вагон должен оставаться на рельсах // РСП Эксперт. 2016. № 6–7. С. 24–28.
7. Казаринов В. М., Карвацкий Б. Л. Расчет и исследование автотормозов. М.: Трансжелдориздат, 1961. 232 с.
8. ГОСТ Р 53228–2008. Весы неавтоматического действия. Ч. 1. Метрологические и технические требования. Испытания. М.: Стандартинформ, 2010. 140 с.
9. ГОСТ Р 8.598–2003. Государственная система обеспечения единства измерений. Весы для взвешивания железнодорожных транспортных средств в движении. Методика поверки. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 15 с.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### АНТРОПОВА Татьяна Анатольевна,

старший преподаватель, кафедра «Проектирование и эксплуатация автомобилей», ФГБОУ ВО УрГУПС

### ГЛУШКО Марат Иванович (1932–2017),

д-р техн. наук, профессор, ведущий специалист в области тормозов подвижного состава и безопасности движения. С 1957 до 2017 г. — сотрудник Уральского отделения ВНИИЖТ (ГУП УО ВНИИЖТ)

Статья поступила в редакцию 04.05.2017 г., актуализирована 11.09.2017 г., 10.12.2017 г., принята к публикации 18.12.2017 г.

## Analysis of the stability control of the car with the admission to the infrastructure

T. A. ANTROPOVA<sup>1</sup>, M. I. GLUSHKO<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Ural State University of Railway Transport" (FGBOU VO UrGUPS), Ekaterinburg, 620034, Russia

<sup>2</sup> "Ural Branch" — branch of the Joint Stock Company "Railway Research Institute" (The Ural Branch of the JSC "VNIIZhT"), Ekaterinburg, 620027, Russia

**Abstract.** The rolling stock and the railway track are a single mechanical system. The running parts of the rolling stock and the track are interacting under difficult dynamic conditions. The con-

stant tendency of the development of rail transport in relation to the interaction of the power wheel-to-rail friction pair consists in increasing the axle load on the rails for freight rolling stock and fur-



ther increasing the speed of the passenger trains. It takes a qualified approach to traffic safety issues and special attention to the stability of rolling stock to achieve these goals.

An analysis of the stability control of the car with an admission to the infrastructure was carried out based on the regulatory documents that establish the main provisions and procedures for the operation of railways and railway workers. Authors proposed the elimination of existing shortcomings and ensuring the stability of the carriage motion by optimizing parameters of the placement of goods in the car. Calculations were made on the rollover stability conditions (stability loss) of the body and the criterion of the critical speed at which the carriage derailed due to the loss of contact of the wheels with the internal rail line of the curve. A method for controlling the stability of a car with a load by means of two-position weighing is proposed. The results obtained also make it possible to determine the height of the common center of gravity (CG), the magnitude of the longitudinal and lateral displacement of the center of gravity of the freight.

**Keywords:** car; freight; wheelset; rail; power interaction; stability

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-1-49-57>

#### REFERENCES

1. Sergeenko O. *Stavka na vysokie skorosti* [Stake in high speeds]. Gudok, 2016, no. 227 (26132), pp. 1–2.
2. *Rules of technical operation of the railways of the Russian Federation*. Approved by Order of the Ministry of Transport of Russia of December 21, 2010, no. 286 [revised from 01.09.2016 with amendments and additions, entered into force 01.07.2017] (in Russ.).
3. *Technical conditions for placement and fastening of freights in cars and containers*. Approved by the Ministry of Railways of Russia on May 27, 2003, no. TsM-943. Moscow, Yurtrans Publ., 2003, 544 p. (in Russ.).

■ E-mail: [t-an-antropova@mail.ru](mailto:t-an-antropova@mail.ru) (Т. А. Антропова)

4. Molchanova O.V. *Snizhenie kommercheskikh brakov u gruzov so smeshchennym tsentrom tyazhesti na vagone*. Kand. tekhn. nauk. diss. avtoref. [Reduction of commercial rejects for freights with a shifted center of gravity in the car. Cand. tech. sci. diss. synopsis]. Ekaterinburg, UrGUPS Publ., 2010, 18 p.

5. *Vopros dnya: s kakimi problemami vy stalkivaetes' v oblasti remonta podvizhnogo sostava?* [Issue of the day: what problems do you face in the field of rolling stock repair?]. Gudok, 2016, no. 58 (25963), p. 4.

6. Glushko M.I. *Vagon dolzhen ostavat'sya na rel'sakh* [The car must remain on the rails]. RSP Ekspert, 2016, no. 6–7, pp. 24–28.

7. Kazarinov V.M., Karvatskiy B.L. *Raschet i issledovanie avto-tormozov* [Calculation and investigation of auto brakes]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1961, 232 p.

8. GOST R 53228–2008. *Weights of non-automatic operation. Part 1. Metrological and technical requirements. Tests*. Moscow, Standartinform Publ., 2010, 140 p. (in Russ.).

9. GOST R 8.598–2003. *State system for ensuring the uniformity of measurements. Scales for weighing railway vehicles in motion. Verification procedure*. Moscow, IPK Izdatel'stvo standartov [Standards Publishing] Publ., 2003, 15 p. (in Russ.).

#### ABOUT THE AUTHORS

**Tat'yana A. ANTROPOVA,**

Senior lecturer, Department “Design and operation of cars”, FGBOU VO UrGUPS

**Marat I. GLUSHKO (1932–2017),**

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Leading expert in the field of brakes of rolling stock and safe traffic. From 1957 till 2017 — researcher of the Ural branch of JSC “VNIIZhT” (GUP UO “VNIIZhT”)

Received 04.05.2017

Revised 11.09.2017, 10.12.2017

Accepted 18.12.2017

#### ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

**Савин А. В.** Безбалластный путь. М.: РАС, 2017. 192 с.

Представлена эволюция безбалластного пути как способа уменьшения давления на балласт и уменьшения трудозатрат на текущее содержание, а также рациональные сферы его применения. Выполнено сравнение различных конструкций по объемам укладки в разных странах мира. Описаны конструкции отечественных и зарубежных вариантов безбалластного пути и их классификация,

**Берент В. Я.** Сильноточный скользящий контакт (свойства, повреждаемость и процессы, протекающие в нем). Ногинск: АНАЛИТИКА РОДИС, 2016. 328 с.

Рассмотрены процессы, протекающие в материалах сильноточного скользящего контакта при их взаимодействии, а также свойства различных электротехнических медных сплавов применительно к проводам контактной сети электрифицированных железных дорог. Проведена классификация дефектов и повреждений контактных проводов и токосъемных элементов ползцов токопри-

**Антюхин Г. Г., Поварков И. Л.** Совершенствование учета расхода моторного масла тепловозами. Ногинск: АНАЛИТИКА РОДИС, 2016. 101 с.

Обоснованы направления совершенствования учета расхода моторного масла тепловозами и разработаны методические подходы к его реализации.

Книга предназначена для научных и инженерно-технических работников железнодорожной отрасли, занимающихся вопро-

даны технические требования к их отдельным элементам. Также описаны неисправности безбалластных конструкций и способы их устранения в процессе текущего содержания.

Книга предназначена для научных и научно-технических работников железнодорожного транспорта, будет полезна преподавателям и студентам отраслевых вузов, а также тем, кому предстоит проектировать, сооружать и эксплуатировать безбалластный путь.

емников в эксплуатации. Показана перспективность использования нанотехнологии для изготовления проводов и токосъемных элементов ползцов из медных дисперсно-упрочненных композитов и сделано технико-экономическое обоснование целесообразности использования новых разработок.

Книга предназначена для использования в работе специалистами служб электрификации и локомотивного хозяйства ОАО «РЖД», а также может быть полезна преподавателям и студентам транспортных вузов.

сами расходования горюче-смазочных материалов тягового подвижного состава, а также может быть полезна преподавателям и студентам транспортных вузов.

*По вопросам приобретения книг обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, редакционно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».*

*Тел.: (499) 260-43-20, e-mail: [rio@vniizht.ru](mailto:rio@vniizht.ru), [www.vniizht.ru](http://www.vniizht.ru).*