

Вестник

Научно-исследовательского института
железнодорожного транспорта

ISSN 2223 – 9731 (Print)
ISSN 2713 – 2560 (Online)

Издается с 1942 г.

Том 80, № 2, 2021



I Международная научно-практическая конференция
НАУКА 1520 ВНИИЖТ
ЗАГЛЯНИ ЗА ГОРИЗОНТ



2021

ТЕМЫ МЕРОПРИЯТИЙ

- /// Контейнеризация перевозок
- /// Городские пассажирские перевозки железнодорожным транспортом
- /// Развитие линий с высоким использованием пропускной способности
- /// Инфраструктура железнодорожного транспорта
- /// Тяговый подвижной состав
- /// Техническая диагностика на транспорте

Также вас ждут

ТЕХНИЧЕСКИЕ ТУРЫ

- ||||| Экспериментальное кольцо
- ||||| Испытательные стенды
- ||||| Лаборатории ВНИИЖТ



ОБРАЩЕНИЕ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА



Уважаемые авторы и читатели!

В апреле 2021 г. исполняется 103 года со дня образования Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ).

В текущем году, Году науки и технологий, наука вошла в ранг ключевых национальных приоритетов. Отрадно отметить внимание общества к научному знанию и труду ученых. Вспомним, что и в далеком 1918 г. научные знания были весьма востребованы для транспортной системы страны. Тогда необходимо было добиться устойчивой, бесперебойной работы железнодорожного транспорта для обеспечения жизнедеятельности всех регионов страны.

В задачи недавно созданного института входили испытательские, научные, а также и просветительские функции. И мы об этом не должны забывать. Издание технической и научной литературы для работников железнодорожного транспорта, а впоследствии и научно-го журнала считалось одной из первостепенных задач.

В первое десятилетие в состав института входило до девятнадцати самостоятельных подразделений, но впоследствии они были объединены в два крупных научно-исследовательских центра: НИИ железнодорожного транспорта (НИИЖТ) и НИИ пути и строительства (НИИПС). Государство в лице руководства Народного комиссариата путей сообщения (НКПС) взяло на себя ответственность за создание материальной базы института и организацию научной работы коллектива. Именно в 1930–40-е гг. институт приобрел узнаваемые черты: были построены Экспериментальное кольцо и центры для работы научного и инженерного персонала Москва-3 и Институт пути.

В 1940 г. снова принимается решение о разделении этих двух научных центров на шесть НИИ, но эвакуированные в декабре 1941 г. в Ташкент, все эти НИИ были объединены в единый научный центр — Всесоюзный научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ЦНИИ НКПС).

Руководство институтом было возложено на незаурядных людей, которые являлись прекрасными организаторами и крупнейшими учеными. Прежде

Dear authors and readers!

April 2021 marks the 103rd anniversary of the foundation of the Railway Research Institute (VNIIZHT).

This year, claimed as the Year of Science and Technology, science has become one of the key national priorities. It is gratifying to note the society's attention to scientific knowledge and the work of scientists. Let us recall that in the distant 1918 scientific knowledge was in great demand for the country's transport system. Then it was necessary to achieve a stable, uninterrupted operation of railway transport to ensure the vital activity of all regions of the country.

The tasks of the newly created institute included testing, scientific and also educational functions. And we shouldn't forget about this. The publication of technical and scientific literature for railway workers, and subsequently a scientific journal, was considered one of the primary tasks.

In the first decade, the institute included up to nineteen independent divisions, but later they were merged into two large research centers: the Scientific Research Institute of Railway Transport (NIIZHT) and the Scientific Research Institute of Tracks and Construction (NIIPS). The state, represented by the leadership of the People's Commissariat of Railways (NKPS), took responsibility for creating the material base of the institute and organizing the scientific work of the team. It was in the 1930s–40s that the institute acquired recognizable features — the Test Loop at the Scherbinka, centers for the work of scientific and engineering personnel at the Moscow-3 and the Institute of the Track Facility were built.

In 1940, the decision was again made to divide these two research centers into six research institutes, but being evacuated to Tashkent in December 1941, all these research institutes were integrated into a joint scientific center — the All-Union Railway Research Institute (TsNII NKPS).

The management of the Institute was entrusted to outstanding people who were excellent organizers and scientists. First of all, let us note Academician V.N. Obratsov,

всего отметим академика В. Н. Образцова, возглавлявшего институт с 1935 по 1940 г., организовавшего работу большого коллектива института и положившего начало созданию научных школ.

Институту как головному научному центру, активно участвующему в формировании технической политики отрасли, всегда уделялось большое внимание руководством МПС, ОАО «РЖД» и правительством страны.

Сегодня перед институтом стоит широкий круг новых задач. Это сохранение и приумножение научного потенциала, расширение сферы компетенций, т. е. освоение новых областей знаний, подготовка кадров высокой научной квалификации. Все это должно найти отражение в публикациях нашего научно-технического журнала «Вестник ВНИИЖТ» и «Трудах ВНИИЖТ».

Желаю авторам, коллегам и читателям журнала творческих успехов.

С уважением,
главный редактор журнала «Вестник ВНИИЖТ»,
первый заместитель Генерального директора
АО «ВНИИЖТ», профессор, доктор технических наук
Александр Косарев

who headed the institute from 1935 to 1940, organized the work of a large team of the institute and initiated the creation of scientific schools.

The Institute, as a leading research center being actively participating in the formation of the industry's technical policy, has always been given great attention by the leadership of the Ministry of Railways, the Russian Railways and the government of the country.

Nowadays the Institute challenges a wide range of new tasks. This is the preservation and augmentation of scientific potential, expansion of the sphere of competence, i. e. the development of new areas of knowledge, training of highly qualified scientific personnel. All this should be reflected in the publications of our VNIIZHT scientific journal and the Proceedings of VNIIZHT.

I would like to wish creative success to the authors, colleagues and readers of the journal.

Respectfully,
Alexander Kosarev,
Editor-in-Chief of the VNIIZHT Scientific Journal,
First Deputy of the JSC VNIIZHT General Director,
Professor, Doctor of Technical Sciences

О допустимых скоростях движения порожних грузовых вагонов на тележках модели 18-100

А. М. БРЖЕЗОВСКИЙ¹, О. А. КРАСНОБАЕВ¹, А. В. СПИРОВ², И. Е. ИЛЬИН²

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

² Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКИ»), Коломна, 140402, Россия

Аннотация. Проблема обеспечения безопасности движения порожних грузовых вагонов наиболее остро стоит по отношению к вагонам на тележках модели 18-100, что главным образом обусловлено эксплуатационными износами колесных пар, боковых рам и надрессорных балок, а также элементов рессорного подвешивания. Потенциальная угроза безопасности движения возникает при движении поезда, составленного из преимущественно порожних и малозагруженных вагонов, по участкам пути, имеющим отступления геометрии рельсовой колеи III и более высоких степеней или сочетаний и последовательностей отступлений II степени. В статье приведены основные результаты комплексных исследований: математического моделирования динамического взаимодействия пути и порожних грузовых вагонов различных типов с характерными видами износов тележек на основе программного продукта «Универсальный механизм» и полигонных испытаний вагонов на измерительных участках прямой, переходных и круговых кривых радиусом 350, 650, 800, 1000 и 2050 м на участке Белореченская—Майкоп Северо-Кавказской железной дороги. Исследованы динамические качества и устойчивость движения порожних грузовых вагонов различных типов в зависимости от параметров технического состояния ходовых частей и отступлений геометрии рельсовой колеи II и III степеней различных видов и сочетаний при движении в прямых и криволинейных участках пути. Приведены таблицы и графики зависимостей показателей динамических качеств и устойчивости движения универсальных порожних грузовых вагонов различных типов от скорости движения в прямых участках пути и круговых кривых различных радиусов и переходных кривых, содержащих искусственные отступления геометрии рельсовой колеи, наиболее негативно влияющие на безопасность движения. Даны рекомендации по корректировке нормативных документов ОАО «РЖД», регламентирующих допустимые скорости движения порожних грузовых вагонов в зависимости от технического состояния ходовых частей.

Ключевые слова: порожние грузовые вагоны; тележки модели 18-100; параметры технического состояния тележек; геометрия рельсовой колеи; отступления геометрии рельсовой колеи; допустимые скорости движения

Введение. Нормами допустимых скоростей движения подвижного состава в редакции приказа МПС России от 12.11.2001 г. № 41 регламентировались скорости движения грузовых вагонов на тележках модели 18-100 и их аналогов не более 90 км/ч независимо от степени реализованной загрузки исходя из ограничения осевой нагрузки до 23,5 тс [1]. Обобщение резуль-

татов многочисленных экспериментальных и теоретических исследований, а также статистика случаев брака в поездной работе показали, что тележки модели 18-100 с эксплуатационными износами не обеспечивают скорости движения грузовых вагонов более 70–80 км/ч в порожнем или малозагруженном режиме. Порожние грузовые вагоны более, чем груженные, чувствительны к износам ходовых частей, отступлениям геометрии рельсовой колеи (ГРК), продольным сжимающим силам в поезде. Сходы порожних грузовых вагонов на тележках модели 18-100 с нормативными износами тележек и колесных пар, следующих в организованных поездах в порожнем или малозагруженном режиме по пути с отступлениями ГРК в пределах установленных нормативов, существенно более вероятны, чем груженных вагонов по причине потери устойчивости против вкатывания колеса на головку рельса. Устойчивость порожних вагонов от выжимания при воздействии продольных сжимающих сил величиной 20–30 тс технически не обеспечивается [2, 3].

Нестабильность динамических качеств порожних грузовых вагонов на тележках модели 18-100 обусловлена главным образом нестабильностью параметров демпфирования колебаний обрессоренных масс, реализуемого клиновой системой центрального подвешивания тележек, нерегулируемым трением в пятниковых опорах кузова и в буксовых проемах боковых рам тележек. Так, нестабильность характеристик клиновых гасителей при малых величинах статического прогиба центрального подвешивания приводит к увеличению коэффициентов относительного трения в 2–4 раза по сравнению с расчетными значениями и блокирует свободные колебания вагона в диапазоне эксплуатационных скоростей движения 50–80 км/ч [4].

Фактическая зависимость коэффициента относительного трения в клиновых гасителях от динамического прогиба рессор близка к параболической с максимумом, соответствующим коэффициенту динамических добавок (0,3–0,4). При этом в диапазоне скоростей движения 60–100 км/ч максимальные

вероятные значения сил трения в клиновых гасителях в 2,6–3,6 раза больше, чем в статике [5]. Одним из мероприятий по повышению стабильности демпфирования колебаний и снижению износов трущихся поверхностей без существенной переработки конструкции тележки стала модернизация тележки, проводимая в рамках текущего ремонта по техническим условиям ТУ 32 ЦВ 2459–2007, проект Проектно-конструкторского бюро вагонного хозяйства (ПКБ ЦВ) М1698 [6]. По данным Центральной дирекции инфраструктуры (ЦДИ) ОАО «РЖД», около 95 % рабочего парка грузовых вагонов, обращающихся на железнодорожном пути с шириной колеи 1520 мм, оборудовано тележками модели 18-100, прошедшими модернизацию.

Последующие результаты испытаний показали, что максимальные скорости движения из условия обеспечения нормативного уровня критериев динамических качеств и устойчивости движения на пути с удовлетворительным техническим состоянием по ГРК не превышали 70 км/ч для вагонов с модернизированными тележками и 60 км/ч для вагонов с тележками, не прошедшими модернизацию. Указанные уровни скоростей были регламентированы Нормами допускаемых скоростей движения [7], однако применение установленных ограничений скорости движения привело к снижению провозной способности на направлениях сети железных дорог с преимущественным движением порожних грузовых поездов. Потребовался поиск дополнительных решений по повышению скоростей движения при фактическом эксплуатационном состоянии тележек модели 18-100 в совокупности с предложениями по регламентированию отступлений ГРК, не требующих дополнительного ограничения допускаемых скоростей движения порожних вагонов [8–11].

Для изыскания возможности повышения скоростей движения порожних грузовых вагонов на тележках модели 18-100 с нормативными эксплуатационными износами в рамках плана научно-технического развития ОАО «РЖД» АО «ВНИИЖТ» и АО «ВНИКТИ» в 2018–2019 гг. проводились совместные исследования, в ходе которых была изучена группа факторов, оказывающих наибольшее влияние на ограничение скоростей движения порожних грузовых вагонов на тележках модели 18-100.

Начальный этап работы. Были выполнены теоретические исследования влияния на устойчивость движения порожних вагонов фактических параметров текущего технического состояния тележек и отступлений ГРК в прямых и кривых участках пути. Исследования выполнялись с использованием программного комплекса «Универсальный механизм» [12] на цифровых моделях грузовых вагонов различных типов на тележках модели 18-100. Задавались следующие параметры

вагонов: хоппер с базой кузова 7,2 м массой 22 т; цистерна с базой кузова 7,8 м массой 24 т; полувагон с базой кузова 8,65 м массой 22 т. Модель образована 19 абсолютно твердыми телами (кузов, две наддрессорные балки, 4 боковых рамы, 8 клиньев, 4 колесные пары) и имеет 114 степеней свободы (по 6 степеней свободы для каждого тела). Структурное представление модели основано на использовании метода подсистем; дерево подсистем представлено на рис. 1.

На нижнем уровне расположены две подсистемы: стандартная подсистема «Колесная пара» (КП) и подсистема «Клин»; подсистема «Тележка» образована двумя включенными подсистемами «КП», четырьмя включенными подсистемами «Клин». (Подсистемы: наддрессорные балки, боковые рамы, пружинные комплекты на рис. 1 не показаны.)

По результатам многочисленных исследований, как экспериментальных, так и теоретических [13], установлено, что при наличии на колесах проката 2–3 мм существенно ухудшаются ходовые качества порожних вагонов на тележках модели 18-100 и аналогичных ей по конструкции. Для моделирования из имеющейся базы профилей колес грузовых вагонов, созданной по результатам обмеров профилометром осенью 2018 г. колес большого количества вагонов, находящихся в эксплуатации, выбирались профили с прокатом от 0 до 4 мм и с толщиной гребня от 26 до 32 мм. Для каждого из профилей проводилось моделирование движения вагонов различных типов исходного состояния по прямому участку пути с отличным, хорошим и удовлетворительным состоянием со скоростями от 60 до 90 км/ч.

Определялись рамные силы, вертикальные и горизонтальные (поперечные) ускорения кузова, коэффициенты запаса устойчивости против схода колеса с рельса, углы поворота тележек относительно кузова, прогибы пружин рессорного подвешивания, коэффициенты вертикальной динамики по пружинам, вертикальные и боковые силы, передающиеся от колес на рельсы, поперечное положение колес в колее (зазор между гребнем и боковой гранью головки рельса), вертикальное и горизонтальное отклонения рельсов под колесами. Нормативные значения показателей принимались в соответствии с требованиями стандартов [14, 15].

Путевая инфраструктура была смоделирована в виде прямой и криволинейного участка пути, состоявшего из круговой кривой постоянного радиуса 650 и 850 м с возвышением наружного рельса 100 мм и длиной переходных кривых 80 м, что соответствовало отводу возвышения, равному 1,25 мм/м. Упругие свойства пути с рельсами Р65 учитывались путем введения жесткостей каждого из рельсов в вертикальном (44 МН/м) и горизонтальном (18 МН/м) направлениях. Головка рельса имела неизношенный профиль; подуклонка рельса составляла 1/20. Отступ-

ления ГРК задавались в детерминированном виде с набором неровностей, соответствовавших последовательностям и сочетаниям отступлений, регламентированным нормативами МПС России [8, 9]. В круговой кривой отступления моделировались на расстоянии 30 м от ее начала, в переходных кривых — на расстоянии 15 м от окончания прямой и заканчивались за 15 м до начала круговой кривой. Исследовались следующие варианты отступлений ГРК:

- 3 просадки величиной 15 мм на длине 30 м;
- 8 просадок величиной 15 мм на длине 100 м;
- 3 рихтовки величиной 25 мм на длине 20 м на протяжении 100 м;
- 2 перекоса величиной 12 мм с расстоянием между вершинами 15 м;
- сочетание перекоса величиной 12 мм на длине 10 м и рихтовки величиной 15 мм на длине 20 м;
- сочетание просадки величиной 15 мм на длине 10 м и рихтовки величиной 15 мм на длине 10 м, а также отдельно расположенные перекосы величиной 16 мм на длине 10 м, просадка величиной 20 мм на длине 10 м, рихтовка величиной 25 мм на длине 20 м.

Анализ расчетных данных показал, что при прокате колес 2–3 мм, соответствующем эквивалентной конусности 0,11–0,13, значительно повышается амплитуда влияния тележек с частотой 2,2–2,4 Гц по сравнению с колесами с меньшим прокатом и прокатом 4 мм и более, уменьшаются минимальные значения коэффициента запаса устойчивости против схода колеса с рельса (рис. 2 и 3).

По результатам моделирования установлено также, что сочетание перекоса величиной 12 мм на длине 10 м и рихтовки величиной 15 мм на длине 10 м наиболее неблагоприятно при расположении в переходных участках кривых радиусом 850 м для движения цистерны со скоростью 90 км/ч: минимальное значение коэффициента запаса устойчивости против схода колеса с рельса при расположении указанного сочетания отступлений отмечалось во втором по направлению движения переходном участке — 1,03 (рис. 4).

Минимальное значение коэффициента запаса устойчивости против схода колеса с рельса получено на первом колесе, набегающем на наружный рельс при прохождении неровностей на длине 0,5 м. Исследованиями [16, 17, 18] установлено, что минимально необходимая длина пути вкатывания колеса гребнем на головку рельса составляет около 0,8 м. В то же время при возникновении какого-либо дополнительного фактора, способствующего увеличению рамной силы или обезгрузки набегающего колеса (например, при торможении поезда), вероятность возникновения схода может резко увеличиться. Влияние времени и пути вкатывания колеса на устойчивость движения в данном исследовании не рассматривалось. Результаты моделирования учитывались

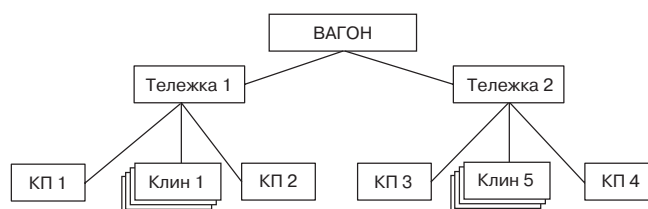


Рис. 1. Структура подсистем модели
Fig. 1. Model subsystem structure

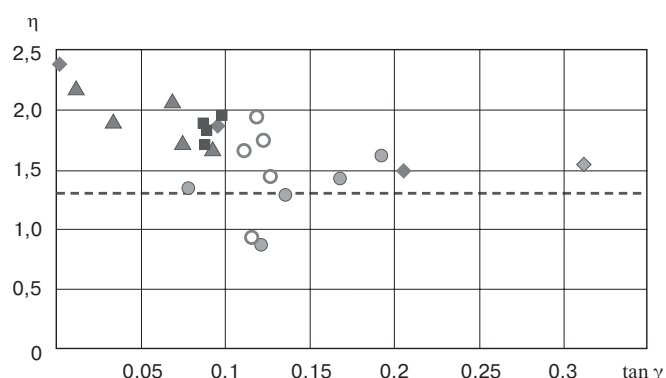


Рис. 2. Минимальные расчетные значения коэффициента запаса устойчивости против схода колеса с рельса η порожней цистерны при скорости движения 90 км/ч в зависимости от эквивалентной конусности $\tan \gamma$:

- ▲ прокат 0 мм ○ прокат 2 мм ◆ прокат 4 мм
■ прокат 1 мм ● прокат 3 мм --- нормативное значение

Fig. 2. Minimum calculated values of the safety factor of stability against wheel derailment from the rail of an empty tank at a speed of 90 km/h, depending on the equivalent taper $\tan \gamma$:

- ▲ 0 mm rolling ○ 2 mm rolling ◆ 4 mm rolling
■ 1 mm rolling ● 3 mm rolling --- standard value

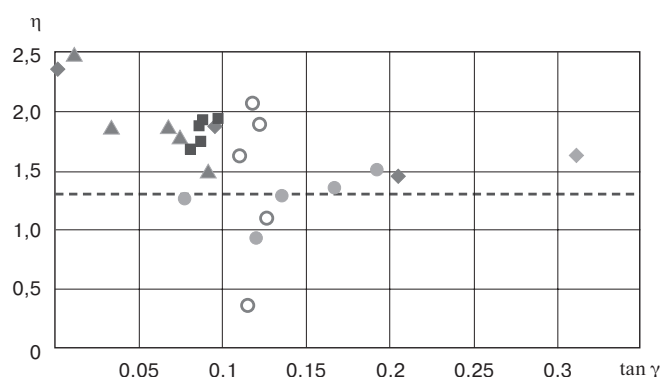


Рис. 3. Минимальные расчетные значения коэффициента запаса устойчивости против схода колеса с рельса порожнего полувагона при скорости движения 90 км/ч в зависимости от эквивалентной конусности:

- ▲ прокат 0 мм ○ прокат 2 мм ◆ прокат 4 мм
■ прокат 1 мм ● прокат 3 мм --- нормативное значение

Fig. 3. Minimum calculated values of the safety factor of stability against wheel derailment from the rail of an empty gondola car at a speed of 90 km/h, depending on the equivalent taper:

- ▲ 0 mm rolling ○ 2 mm rolling ◆ 4 mm rolling
■ 1 mm rolling ● 3 mm rolling --- standard value

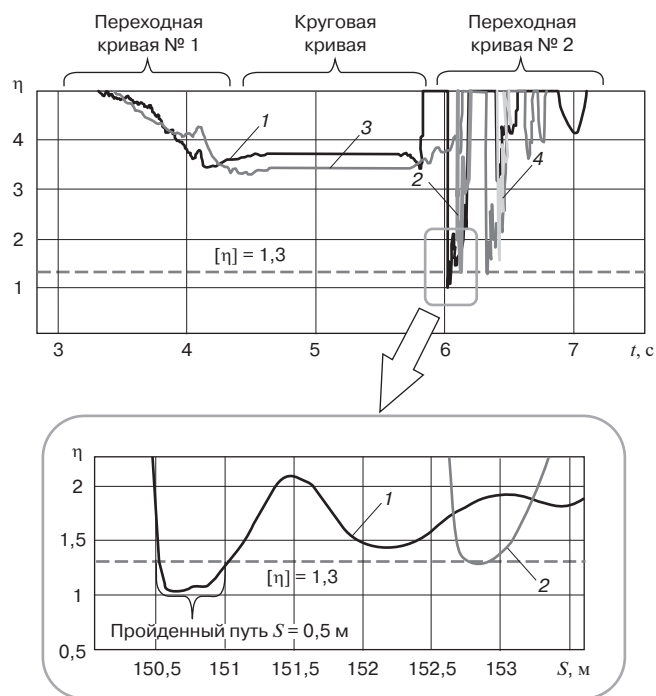


Рис. 4. Расчетные осциллограммы коэффициента запаса устойчивости против схода колеса с рельса при движении цистерны по кривой радиусом 850 м со скоростью 90 км/ч с расположенным в переходном участке сочетанием перекоса величиной 12 мм и рихтовки величиной 15 мм на длине 10 м:
1 — 1-е колесо; 2 — 2-е колесо; 3 — 3-е колесо; 4 — 4-е колесо
Fig. 4. Calculated oscillograms of the safety factor of stability against wheel derailment from the rail when the tank moves along a curve with a radius of 850 m at a speed of 90 km/h with a combination of a skew of 12 mm and a straightening of 15 mm at a length of 10 m located in the easement section:
1 — 1st wheel; 2 — 2nd wheel; 3 — 3rd wheel; 4 — 4th wheel

при формировании программы и методики натурных экспериментов.

На рельсовых нитях измерительных участков пути Скоростного испытательного полигона (СИП) АО «ВНИИЖТ» были искусственно созданы отступления ГРК (табл. 1).

Степени отступлений приняты в соответствии с параметрами, установленными нормативами [11]. Для

сравнительной оценки влияния на устойчивость движения отступлений ГРК в пределах измерительных участков пути выделялись также участки с балловой оценкой «отлично» и «хорошо» при наличии одиночных отступлений не выше II степени.

Испытания на измерительных участках пути СИП (рис. 5) проводились со скоростями движения в диапазоне от 40 до 90 км/ч.

Для проведения испытаний был сформирован поезд из двух локомотивов, опытных вагонов и вагона-лаборатории. Схема формирования опытного поезда приведена на рис. 6.

В качестве опытных вагонов были отобраны из эксплуатации грузовые вагоны различных типов на тележках модели 18-100 с износами ходовых частей в пределах допускаемых значений (табл. 2).

Перед началом испытаний опытные вагоны были подвергнуты визуальному контролю и измерениям (табл. 3).

С целью имитации технического состояния немодернизированных тележек на одной из тележек цистерны № 75001339 были демонтированы износоустойчивые элементы, установленные при модернизации по техническим условиям ТУ 32 ЦВ 2459–2007 [6].

Кроме этого, были подкачены КП с толщиной гребня 24,0 мм и равномерным прокатом 4,3 мм. Цистерна № 77323624 испытывалась в двух вариантах. В первом варианте (табл. 3) были подкачены КП с толщиной гребня 24,3–29,9 мм и равномерным прокатом 0–1,5 мм, во втором варианте (табл. 3) — с толщиной гребня 29,8–33,0 мм и равномерным прокатом не более 0,7 мм.

Коэффициенты относительного трения клиновых гасителей центрального подвешивания опытных порожних вагонов, полученные по результатам статических тарировок, составляли 0,10–0,20 и, как правило, не совпадали по величинам даже по рессорным комплектам одной тележки.

По результатам испытаний на пути с балловой оценкой «отлично» и «хорошо» при наличии одиночных отступлений ГРК не выше II степени установлено следующее.



Рис. 5. Схема СИП АО «ВНИИЖТ»
Fig. 5. Scheme of the High-Speed Testing Ground of JSC «VNIIZHT»

При движении по прямому участку пути со скоростями до 90 км/ч динамические показатели опытных вагонов оказались ниже нормативных значений, за исключением цистерны № 77323624 (вариант 2) и платформы № 44716975, по которым зафиксировано превышение показателей коэффициента вертикальной динамики необрессоренных частей тележки и снижение коэффициента запаса устойчивости против схода колеса с рельса. Предельные допускаемые значения коэффициента вертикальной динамики необрессоренных частей тележки по указанным вагонам достигались уже при скорости движения 80 км/ч. При этом устойчивость против схода данных вагонов обеспечивалась достаточным коэффициентом запаса. Исходя из этого, максимальные скорости движения грузовых поездов, имеющих в составе 4-осные порожние грузовые вагоны на тележках модели 18-100 и на аналогичных ей по конструкции и параметрам тележках, составляют не более 80 км/ч.

При движении опытных вагонов со скоростями до 80 км/ч в кривой радиусом 800 м динамические показатели не превышали нормативных значений. По цистерне № 77323624 (вариант 2), платформе № 44716975 и хопперу зафиксированы предельные значения коэффициента вертикальной динамики необрессоренных частей тележки, но не превышающие допустимых значений. При этом обеспечивалась устойчивость против схода данных вагонов. Таким образом, можно рекомендовать в кривых участках пути радиусом 800 м и более установление максимальных допускаемых скоростей движения грузовых поездов, имеющих в составе 4-осные порожние грузовые вагоны на тележках модели 18-100 и на аналогичных ей по конструкции и параметрам тележках, не более 80 км/ч.

При движении всех опытных вагонов со скоростями до 90 км/ч в кривой радиусом 650 м превышение нормативных значений динамических показателей зафиксировано по хопперу (коэффициент вертикальной динамики необрессоренных частей). При движении со скоростями до 80 км/ч по платформе № 44716975 получено превышение нормативных значений по коэффициенту вертикальной динамики необрессоренных частей и вертикальным ускорениям кузова. При движении со скоростями до 70 км/ч на платформе № 44716975 зафиксированы предельные значения динамических показателей (коэффициент вертикальной динамики необрессоренных частей тележки, вертикальные ускорения обрессоренных частей), но не превышающие допустимых значений. Устойчивость против схода платформы № 44716975 при этом была обеспечена. Для остальных вагонов при движении со скоростями до 70 км/ч динамические показатели не превышали нормативных значений. Таким образом, можно рекомендовать в кривых участках пути радиу-

Таблица 1

Сочетания, последовательности и одиночные отступления ГРК на измерительных участках СИП

Table 1

Combinations, sequences and single deviations of the track geometry in the measuring sections of the High-Speed Testing Ground

Измерительный участок	Тип отступления, амплитуда, мм/длина, м	Форма отступления	Оценки отступлений по Временной инструкции [11]	
			Степень	Балл
Прямая 7 км 8 пк	перекос (16/14)	Сочетание двух перекосов с рихтовкой на длине 25 м	III	22
	рихтовка (27/26)		II	3
	перекос (17/18)		III	28
Кривая $R=350$ м 20 км 3 пк (круговая кривая)	рихтовка (12/17)	Сочетание рихтовки с перекосом на длине 20 м	I	0
	перекос (10/9)		II	0
Кривая $R=650$ м 17 км 3 пк (круговая кривая)	перекос (12/12)	Сочетание перекоса с двумя рихтовками и просадкой на длине 25 м	II	2
	рихтовка (31/28)		III	4
	просадка (13/4)		II	1
	рихтовка (32/22)		III	4
Кривая $R=650$ м 16 км 10 пк (переходная)	перекос (13/9)	Сочетание перекоса с двумя рихтовками и одной просадкой на длине 42 м	III	4
	рихтовка (35/30)		III	6
	просадка (12/6)		II	0
	рихтовка (18/34)		I	0
Кривая $R=800$ м 15 км 7 пк (переходная)	рихтовка (33/16)	Одиночное отступление	IV	40
Кривая $R=800$ м 15 км 6 пк (круговая)	рихтовка (34/16)	Одиночное отступление	IV	60

Таблица 2

Параметры опытных вагонов

Table 2

Test car parameters

Тип, номер вагона	Масса тары, т	Длина по осям сцепления автосцепок, мм	База вагона, мм
Полувагон № 62451059	23,6	13 920	8650
Цистерна № 77323624	24,4	12 020	7800
Цистерна № 75001339	27,6	12 020	7800
Платформа № 44716975	20,9	14 620	9720
Платформа № 44667582	20,8	14 620	9720
Хоппер № 30817589	23,1	11 520	7200

сом 650 м установление максимальных допускаемых скоростей движения грузовых поездов, имеющих в составе 4-осные порожние грузовые вагоны на тележках

Таблица 3

Фактические показатели технического состояния тележек вагонов

Table 3

Actual indicators of the technical condition of car bogies

Тип, номер вагона	Толщина гребня, мм				Прокат, мм				Положение клина, мм			
	1 КП	2 КП	3 КП	4 КП	1 КП	2 КП	3 КП	4 КП	1 комплект	2 комплект	3 комплект	4 комплект
Полувагон № 62451059	28,8	28,9	28,7	29,4	0,5	0,6	0,7	0,4	–6	–2	+2	+5
	29,5	29,5	29,7	29,2	0,4	0,4	0,5	0,1	+6	–4	+4	+2
Платформа № 44716975	30,5	28,4	29,2	29,0	0,2	0,7	0,1	0,3	–4	–9	–8	–8
	28,2	28,1	29,6	29,2	0,6	0,9	0	0,2	–3	–12	–5	–3
Платформа № 44667582	28,6	29,9	30,0	29,2	0,8	0,6	0	0,4	–4	–9	–8	–8
	29,2	30,5	29,6	28,9	0,8	0,3	0,3	0,2	–3	–12	–5	–3
Хоппер № 30817589	29,5	29,8	30,0	30,4	0,2	0,1	0,1	0,3	+2	–2	–2	+2
	30,0	29,5	30,2	31,0	0,2	0,2	0,1	0,4	0	+2	+2	–3
Цистерна № 75001339	24,0	24,7	32,8	28,8	4,3	0,8	0	0	–6	–5	–4	–3
	28,9	26,9	32,7	29,8	1,8	0,6	0	0	–14	–4	+2	–5
Цистерна № 77323624 1 вариант	29,9	28,6	30,9	33,0	0,1	0,1	0	0,2	–6	0	+4	–6
	25,3	24,3	30,2	31,7	1,3	1,5	0,2	0,2	0	–2	+3	–5
Цистерна № 77323624 2 вариант	30,4	30,4	30,9	33,0	0,4	0	0	0,2	–11	0	+4	–6
	29,8	30,6	30,2	31,7	0,7	0,3	0,2	0,2	–8	–4	+3	–5

Примечание: знак «+» — завышение, знак «–» — занижение клина относительно опорной поверхности наддрессорной балки тележки.

модели 18-100 и на аналогичных ей по конструкции и параметрам тележках, не более 70 км/ч.

При движении опытных вагонов со скоростями до 80 км/ч в кривой радиусом 350 м превышение нормативных значений коэффициента вертикальной динамики необрессоренных частей зафиксировано на цистерне № 77323624 (вариант 2), платформе № 44716975 и хоппере, на платформе № 44716975 и хоппере зафиксировано также превышение показателей вертикальных ускорений обрессоренных частей. Кроме этого, при скорости движения 80 км/ч по хопперу не обеспечивалась устойчивость против схода (коэффициент запаса устойчивости против схода колеса с рельса был ниже допустимого значения). При скорости движения 70 км/ч по платформе № 44716975 и хопперу зафиксированы предельные значения показателей коэффициента вертикальной динамики необрессоренных частей и вертикальных ускорений обрессоренных частей.

При этом обеспечивалась устойчивость против схода платформы № 44716975 и хоппера. Таким образом, можно рекомендовать в кривых участках пути радиусом 350 м установление максимальных допустимых скоростей движения грузовых поездов, имеющих в составе 4-осные порожние грузовые вагоны на тележках модели 18-100 и на аналогичных ей по конструкции и параметрам тележках, не более 70 км/ч.

На основании результатов испытаний с учетом фактического разброса параметров поверхностей катания колес (наименьшая толщина гребня 24 мм, наибольший прокат 4,3 мм) можно рекомендовать установление следующих допустимых скоростей движения грузовых поездов, имеющих в составе 4-осные порожние грузовые вагоны на тележках модели 18-100 и на аналогичных ей по конструкции и параметрам тележках, на участках пути с балловой оценкой «отлично» и «хорошо» при наличии одиноч-



Рис. 6. Схема формирования опытного поезда
Fig. 6. Scheme of the formation of a test train

ных отступлений ГРК не выше II степени: в прямых и кривых участках радиусом 800 м и более — не более 80 км/ч; в кривых радиусом 799 м и менее — не более 70 км/ч.

При движении опытных вагонов по участкам пути с наиболее неблагоприятными отступлениями ГРК со скоростями до 90 км/ч установлено следующее. В прямых участках пути динамические показатели опытных вагонов не превышали нормативных значений, за исключением цистерны № 77323624 (вариант 2), платформы № 44716975 и хоппера, по которым зафиксировано превышение допускаемых значений коэффициента вертикальной динамики необрессоренных частей тележки, вертикальных ускорений обрессоренных частей и коэффициента запаса устойчивости против схода колеса с рельса. При скорости движения 80 км/ч по цистерне № 77323624 (варианты 1 и 2) и платформе № 44716975 зафиксировано превышение допускаемых значений коэффициента вертикальной динамики необрессоренных частей тележки, а для платформы еще и превышение допускаемых значений вертикальных ускорений обрессоренных частей. При скорости движения 70 км/ч для всех вагонов динамические показатели не превышали нормативных значений. Предельное значение по показателю коэффициента вертикальной динамики необрессоренных частей тележки при скорости 70 км/ч было достигнуто только для цистерны № 77323624 (вариант 1) на тележках без модернизации по техническим условиям ТУ 32 ЦВ 2459–2007. При этом обеспечивалась устойчивость цистерны против схода.

При движении порожних вагонов в переходной и круговой кривой радиусом 800 м с отступлениями по рихтовке III степени со скоростями до 70 км/ч все контролируемые показатели динамических качеств находились в пределах нормативных значений. При скоростях движения более 70 км/ч зафиксировано превышение нормативных показателей на платформах, цистерне № 75001339 и хоппере.

При движении порожних вагонов в кривой радиусом 650 м с сочетанием отступлений по перекосу II степени и рихтовке II степени, а также с сочетанием отступлений по просадке II степени с рихтовкой II степени все контролируемые показатели динамических качеств находились в пределах нормативных значений при скоростях до 60 км/ч.

В связи с большим объемом экспериментальной информации приведены иллюстративные материалы (рис. 7–10), относящиеся к зависимостям наибольших показателей динамических качеств и наименьших значений запаса устойчивости против вкатывания колеса на головку рельса, зарегистрированным при движении порожних вагонов по кривой радиусом 650 м с наибольшим набором неблагоприятных отступлений ГРК.

При скорости движения 70 км/ч предельный уровень показателей динамических качеств достигался по платформам и цистерне № 77323624 (2 вариант). При движении со скоростями до 80 км/ч в кривой радиусом 350 м с сочетанием отступлений по перекосу II степени с рихтовкой II степени зафиксировано превышение нормативных значений показателей рамных сил, коэффициентов вертикальной динамики обрессоренных и

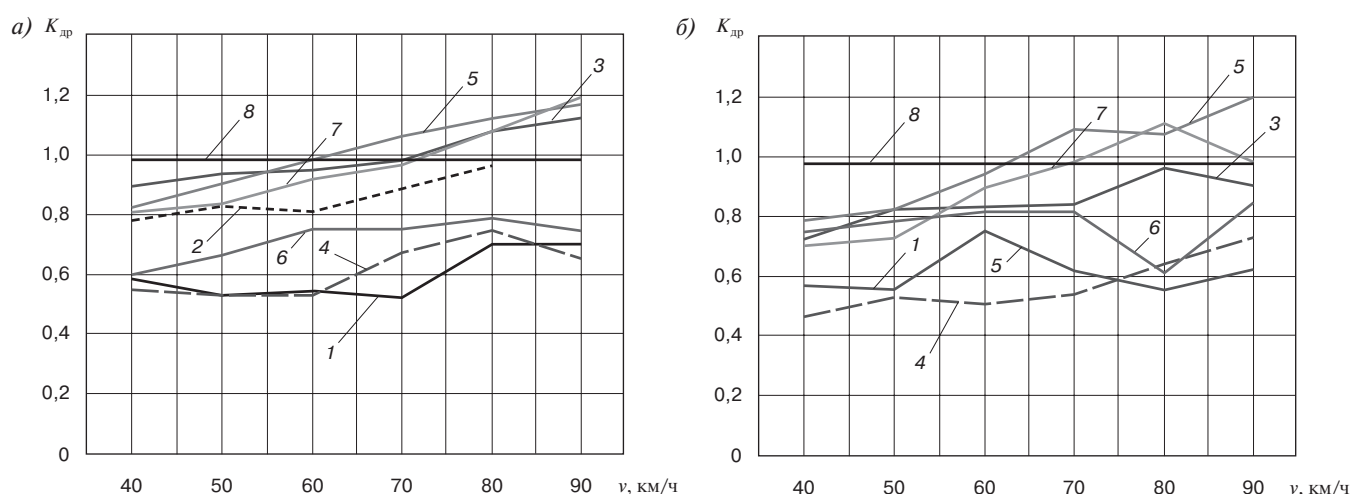


Рис. 7. Коэффициент вертикальной динамики необрессоренных частей K_{dp} в кривой радиусом 650 м (а) и в переходной кривой (б): 1 — полувагон № 62451059; 2 — цистерна № 77323624 (1 вариант); 3 — цистерна № 77323624 (2 вариант); 4 — цистерна № 75001339; 5 — платформа № 44716975; 6 — платформа № 44667582; 7 — хоппер № 30817589; 8 — нормативное значение
Fig. 7. Coefficient of vertical dynamics of unsprung parts K_{dp} in a curve with a radius of 650 m (a) and in easement curve (b): 1 — gondola car no. 62451059; 2 — tank no. 77323624 (option 1); 3 — tank no. 77323624 (option 2); 4 — tank no. 75001339; 5 — platform no. 44716975; 6 — platform no. 44667582; 7 — hopper no. 30817589; 8 — normative value

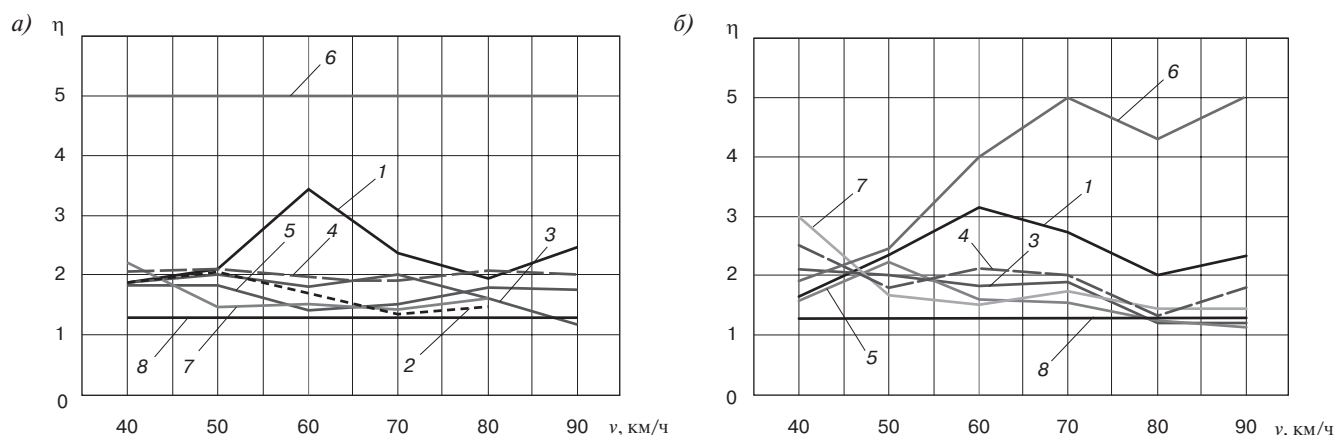


Рис. 8. Коэффициент запаса устойчивости против схода колеса с рельса в кривой радиусом 650 м (а) и в переходной кривой (б): 1 — полувагон № 62451059; 2 — цистерна № 77323624 (1 вариант); 3 — цистерна № 77323624 (2 вариант); 4 — цистерна № 75001339; 5 — платформа № 44716975; 6 — платформа № 44667582; 7 — хоппер № 30817589; 8 — нормативное значение

Fig. 8. Safety factor of stability against wheel derailment from the rail in a curve with a radius of 650 m (a) and in easement curve (b): 1 — gondola car no. 62451059; 2 — tank no. 77323624 (option 1); 3 — tank no. 77323624 (option 2); 4 — tank no. 75001339; 5 — platform no. 44716975; 6 — platform no. 44667582; 7 — hopper no. 30817589; 8 — normative value

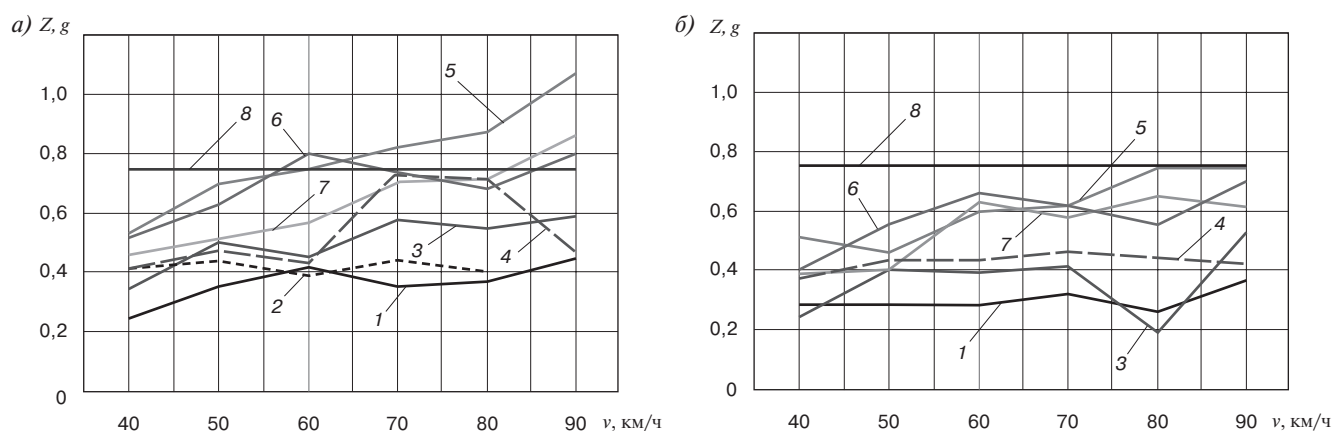


Рис. 9. Вертикальные ускорения кузова Z в кривой радиусом 650 м (а) и в переходной кривой (б): 1 — полувагон № 62451059; 2 — цистерна № 77323624 (1 вариант); 3 — цистерна № 77323624 (2 вариант); 4 — цистерна № 75001339; 5 — платформа № 44716975; 6 — платформа № 44667582; 7 — хоппер № 30817589; 8 — нормативное значение

Fig. 9. Vertical acceleration of the body Z in the curve with a radius of 650 m (a) and in easement curve (b): 1 — gondola car no. 62451059; 2 — tank no. 77323624 (option 1); 3 — tank no. 77323624 (option 2); 4 — tank no. 75001339; 5 — platform no. 44716975; 6 — platform no. 44667582; 7 — hopper no. 30817589; 8 — normative value

необрессоренных частей, вертикальных ускорений у платформы № 44716975, хоппера и цистерн. По платформе № 44667582 и хопперу зафиксировано превышение нормативных значений коэффициента вертикальной динамики необрессоренных частей и вертикальных ускорений при скорости движения 70 км/ч.

Результаты экспериментальных исследований позволили сформировать предложения для внесения изменений в нормативную документацию ОАО «РЖД», относящуюся к установлению допускаемых скоростей движения порожних грузовых вагонов на тележках модели 18-100.

Даны предложения по корректировке нормативов по оценке состояния рельсовой колеи путеизмеритель-

ными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения [10, 11]. В частности, по Дополнительным нормативам по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами [10] предложено исключить примечание 3 к табл. 4.4 «при обнаружении в кривых радиусом менее 850 м перекося длиной до 10 м и величиной более 13 мм скорость для грузовых поездов, имеющих в своем составе порожние вагоны, ограничивается до 60 км/ч»; исключить примечание к табл. 4.6; примечание 1 к табл. 4.8 изложить в следующей редакции: «в кривых радиусом менее 650 м, для грузовых поездов, имеющих в своем составе порожние вагоны». Указанные предложения переданы для рассмотрения и согласования в ЦП ЦДИ ОАО «РЖД».

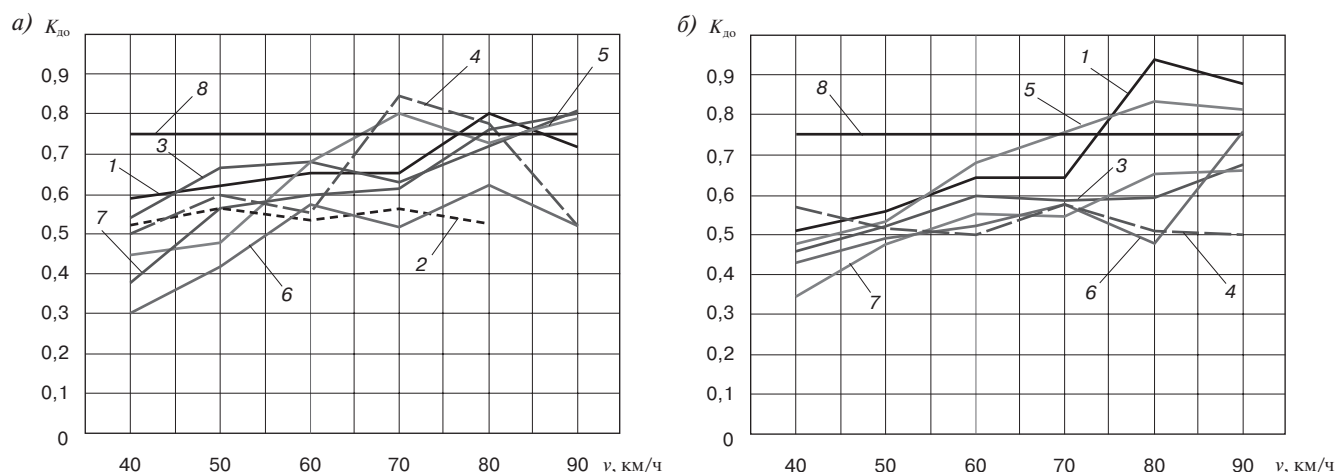


Рис. 10. Коэффициент вертикальной динамики обрессоренных частей $K_{\text{до}}$ в кривой радиусом 650 м (а) и в переходной кривой (б): 1 — полувагон № 62451059; 2 — цистерна № 77323624 (1 вариант); 3 — цистерна № 77323624 (2 вариант); 4 — цистерна № 75001339; 5 — платформа № 44716975; 6 — платформа № 44667582; 7 — хоппер № 30817589; 8 — нормативное значение
Fig. 10. Coefficient of vertical dynamics of sprung parts $K_{\text{до}}$ in a curve with a radius of 650 m (a) and in easement curve (b): 1 — gondola car no. 62451059; 2 — tank no. 77323624 (option 1); 3 — tank no. 77323624 (option 2); 4 — tank no. 75001339; 5 — platform no. 44716975; 6 — platform no. 44667582; 7 — hopper no. 30817589; 8 — normative value

Заключение. Результаты комплекса теоретических и экспериментальных работ, проведенных совместно АО «ВНИИЖТ» и АО «ВНИКТИ» в рамках плана НТР ОАО «РЖД», позволили дать конкретные предложения по отмене ограничений допускаемой скорости движения (не более 60 км/ч) для тележек без модернизации по техническим условиям ТУ 32 ЦВ 2459–2007 и повышению допускаемой скорости движения в прямых участках до 80 км/ч. Эти предложения введены в действие распорядительными документами ОАО «РЖД», в том числе распоряжением ОАО «РЖД» от 6 апреля 2020 г. № 763/р «О внесении изменений в распоряжение ОАО «РЖД» от 8 ноября 2016 г. № 2240р «О нормах допускаемых скоростей движения подвижного состава по железнодорожным путям колеи 1520 (1524) мм».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормы допускаемых скоростей движения подвижного состава по железнодорожным путям колеи 1520 (1524) мм федерального железнодорожного транспорта: приказ МПС РФ от 12 ноября 2001 г. № 41. М.: Транспорт, 2001. 125 с.
2. Вершинский С. В. Устойчивость вагонов от выжимания продольными силами при торможении поезда // Труды ЦНИИ МПС. М., 1970. Вып. 425. С. 4–38.
3. Лысюк В. С. Причины и механизм схода колеса с рельса. Проблема износа колес и рельсов. М.: Транспорт, 1997. 188 с.
4. Требования к конструкции двухосных тележек грузовых вагонов для перспективных условий эксплуатации / Л. И. Бартенева [и др.] // Труды ВНИИЖТ. М., 1973. Вып. 483. С. 14–21.
5. Анисимов П. С. Исследование сил трения в клиновом гасителе колебаний тележки ЦНИИ-ХЗ // Труды ВНИИЖТ. М., 1974. Вып. 519. С. 164–174.
6. Износостойкие элементы для установки в узлы тележки типа 2 грузовых вагонов. Технические условия: (ТУ 32 ЦВ 2459–2007) [Электронный ресурс] / ПКБ ЦВ ОАО «РЖД». М., 2007. 13 с. URL: <http://www.1bm.ru/techdocs/kgs/tu/274/info/188704> (дата обращения: 16.07.2020 г.).

<http://www.1bm.ru/techdocs/kgs/tu/274/info/188704> (дата обращения: 16.07.2020 г.).

7. О нормах допускаемых скоростей движения подвижного состава по железнодорожным путям колеи 1520 (1524) мм [Электронный ресурс]: распоряжение ОАО «РЖД» от 8 ноября 2016 г. № 2240р. М., 2016. 142 с. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=675788> (дата обращения: 16.07.2020 г.).
8. О внесении изменений и дополнений в Инструкцию по расшифровке лент и оценке состояния рельсовой колеи по показаниям путеизмерительного вагона ЦНИИ-2 и мерам по обеспечению безопасности движения [Электронный ресурс]: приказ МПС РФ от 1 сентября 2001 г. № 27Ц. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564292506> (дата обращения: 16.07.2020 г.).
9. О дополнительных мерах по повышению устойчивости порожних грузовых вагонов при прохождении кривых участков пути [Электронный ресурс]: приказ МПС РФ от 27 апреля 2002 г. № 20Ц. М., 2002. 8 с. URL: <https://beta.docs.cntd.ru/document/564269664> (дата обращения: 16.07.2020 г.).
10. Дополнительные нормативы по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 20 декабря 2010 г. № 2650р. М., 2010. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=503293> (дата обращения: 16.07.2020 г.).
11. Об утверждении Временной инструкции по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов [Электронный ресурс]: распоряжение ЦДИ ОАО «РЖД» от 8 июля 2019 г. № ЦДИ-586/р. М., 2019. 100 с. URL: <http://scbist.com/put-putevoe-hozyaistvo/52432-vremennaya-instrukciya-po-ocenke-sostoyaniya-relsovoi-kolei-puteizmeritelnyimi-sredstvami-i-meram-po-obespecheniyu-bezopasnostidvizheniya-poezdov.html> (дата обращения: 16.07.2020 г.).
12. Погорелов Д. Ю. Введение в моделирование динамики систем тел: [учеб. пособие] / Брянский гос. техн. ун-т (БГТУ). Брянск: Изд-во БГТУ, 1997. 156 с.
13. Ромен Ю. С. Устойчивость движения вагонов на тележках 18-100 // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2019. Т. 78. № 3. С. 149–154. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-3-149-154>.

14. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам: межгос. стандарт: введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 июня 2015 г. № 565-ст: дата введения 2016-07-01. М.: Стандартинформ, 2016. 58 с.

15. ГОСТ Р 55050–2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на путь и методы испытаний: нац. стандарт Российской Федерации: дата введения 2013-07-01. М.: Стандартинформ, 2013. 16 с.

16. Матусовский Г. И., Коган А. Я. Траектория движения колеса при вкатывании его на рельс // Труды ВНИИЖТ. М., 1975. Вып. 542. С. 148–155.

17. Матусовский Г. И. Об исследовании вкатывания колеса гребнем на рельс в пути, имеющем неровности // Труды ВНИИЖТ. М., 1978. Вып. 592. С. 114–121.

18. К вопросу об устойчивости против вкатывания колеса на рельс порожних грузовых вагонов / В. Д. Данович [и др.] // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского на-

ционального университета железнодорожного транспорта. 2004. С. 90–97.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

БРЖЕЗОВСКИЙ Александр Менделович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, АО «ВНИИЖТ»

КРАСНОБАЕВ Олег Александрович, руководитель группы, АО «ВНИИЖТ»

СПИРОВ Андрей Владимирович, заведующий отделом, АО «ВНИИЖТ»

ИЛЬИН Илья Евгеньевич, заведующий лабораторией, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 28.07.2020 г., принята к публикации 08.04.2021 г.

Для цитирования: О допустимых скоростях движения порожних грузовых вагонов на тележках модели 18-100 / А. М. Бржезовский [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 2. С. 65–75. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-65-75>.

On the permissible speeds of empty freight cars mounted on 18-100 model bogies

A. M. BRZHEZOVSKIY¹, O. A. KRASNOBAEV¹, A. V. SPIROV², I. E. IL'IN²

¹Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC "VNIIZHT"), Moscow, 129626, Russia

²Joint Stock Company "Research and Design Technological Institute of Rolling Stock" (JSC "VNIKT"), Kolomna, 140402, Russia

Abstract. Problem of ensuring motion safety of empty freight cars is most acute in relation to cars on bogies of model 18-100, which is mainly due to operational wear of wheelsets, side frames and bolsters, as well as spring suspension elements. A potential threat to traffic safety arises when a train, composed of mostly empty and lightly loaded cars, moves along track sections that have deviations in the geometry of rail track of III and higher degrees or combinations and sequences of deviations of II degree. The article presents the main results of complex studies: mathematical modeling of the dynamic interaction of the track and empty freight cars of various types of bogie wear based on the Universal Mechanism software and field tests of cars on measuring sections of tangent, easement and circular curves with a radius of 350, 650, 800, 1000 and 2050 m on the section Belorechenskaya—Maykop of the North Caucasian railway. Dynamic qualities and motion stability of empty freight cars of various types are investigated depending on the parameters of the technical condition of the running gears and the deviations of the geometry of the rail track of II and III degrees of various types and combinations when moving in tangent and curved track sections. Authors provide tables and graphs of the dependences of indicators of dynamic qualities and motion stability of universal empty freight cars of various types on the motion speed in tangent sections of the track and circular curves of various radii and easement curves containing artificial deviations of the geometry of the rail track, most negatively affecting traffic safety. Recommendations are given for correcting the regulatory documents of the Russian Railways, which regulate the permissible speed of motion of empty freight cars, depending on the technical condition of the running gear.

Keywords: empty freight cars; 18-100 model bogies; technical condition parameters of bogies; rail track geometry; deviations of the geometry of the rail lines; permissible speeds

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-65-75>

REFERENCES

1. *Norms of permissible speeds of rolling stock on railway tracks of 1520 (1524) mm gauge of federal railway transport*. Order of the Ministry of Railways of the Russian Federation dated November 12, 2001 No. 41. Moscow, Transport Publ., 2001, 125 p. (in Russ.).
2. Vershinskiy S. V. *Ustoychivost' vagonov ot vyzhimaniya prodol'nymi silami pri tormozhenii poezda* [Stability of cars from squeezing by longitudinal forces when braking a train]. Trudy TsNII MPS [Proceedings of the TsNII MPS]. Moscow, 1970, no. 425, pp. 4–38.
3. Lysyuk V. S. *Prichiny i mekhanizm skhoda kolesa s rel'sa. Problema iznosa koles i rel'sov* [Causes and mechanism of wheel derailment. Wheel and rail wear problem]. Moscow, Transport Publ., 1997, 188 p.
4. Barteneva L. I., Dolmatov A. A., Kudryavtsev N. N., Kochenov A. D., Cherkashin Yu. M. *Trebovaniya k konstruksii dvukhosenykh telezhok gruzovykh vagonov dlya perspektivnykh usloviy ekspluatatsii* [Requirements for the design of two-axle bogies of freight cars for prospective operating conditions]. Trudy VNIIZhT [Proceedings of the VNIIZHT]. Moscow, 1973, no. 483, pp. 14–21.
5. Anisimov P. S. *Issledovanie sil treniya v klinovom gasitele kolebaniy telezhki TsNII-Kh3* [Investigation of friction forces in a wedge vibration damper of a bogie TsNII-Kh3]. Trudy VNIIZhT [Proceedings of the VNIIZHT]. Moscow, 1974, no. 519, pp. 164–174.
6. *Wear-resistant elements for installation in bogie units of type 2 of freight cars. Specifications*. TU 32 TsV 2459–2007. PKB TsV JSC "Russian Railways". Moscow, 2007, 13 p. URL: <http://www.1bm.ru/techdocs/kgs/tu/274/info/188704> (retrieved on 16.07.2020) (in Russ.).
7. *On the norms of the permissible speeds of rolling stock on the 1520 (1524) mm track gauge*. Order of JSC "Rus-

sian Railways" dated November 8, 2016 No. 2240r. Moscow, 2016, 142 p. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=675788> (retrieved on 16.07.2020) (in Russ.).

8. *On amendments and additions to the Instruction for decoding tapes and assessing the state of the rail track according to the indications of the TsNII-2 track measuring car and measures to ensure traffic safety.* Order of the Ministry of Railways of the Russian Federation dated September 1, 2001 No. 27Ts. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564292506> (retrieved on 16.07.2020) (in Russ.).

9. *On additional measures to increase the stability of empty freight cars when passing curved track sections.* Order of the Ministry of Railways of the Russian Federation dated April 27, 2002 No. 20Ts. Moscow, 2002, 8 p. URL: <https://beta.docs.cntd.ru/document/564269664> (retrieved on 16.07.2020) (in Russ.).

10. *Additional standards for assessing the state of the track gauge and measures to ensure traffic safety.* Approved by order of the JSC "Russian Railways" dated December 20, 2010 No. 2650r. Moscow, 2010. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=503293> (retrieved on 16.07.2020) (in Russ.).

11. *On the approval of the Temporary Instructions for assessing the state of the rail track by track measuring devices and measures to ensure the safety of train traffic.* Order of the Central Dispatch Office of the JSC "Russian Railways" dated July 8, 2019 No. CDI-586/r. Moscow, 2019, 100 p. URL: <http://scbist.com/put-putevoe-hozyaistvo/52432-vremennaya-instrukciya-po-ocenke-sostoyaniya-relsovoi-kolei-puteizmeritelnyimi-sredstvami-i-meram-po-obespecheniyu-bezopasnosti-dvizheniya-poezdov.html> (retrieved on 16.07.2020) (in Russ.).

12. Pogorelov D. Yu. *Vvedenie v modelirovanie dinamiki sistem tel: (ucheb. posobie)* [Introduction to modeling the dynamics of systems of bodies: (Textbook)]. Bryanskiy gos. tekhn. un-t (BGU) [Bryansk State Technical University]. Bryansk, BGU Publ., 1997, 156 p.

13. Romen Yu. S. *Ustoychivost' dvizheniya vagonov na telezhkakh 18-100* [Motion stability of railway cars on bogies 18-100]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2019, Vol. 78, no. 3, pp. 149–154. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-3-149-154>.

■ E-mail: s_brz@mail.ru (A. M. Brzhezovskiy)

14. GOST 33211–2014. *Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities.* Interstate standard, put into effect as national standard of the Russian Federation by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated June 5, 2015 No. 565-st. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 58 p. (in Russ.).

15. GOST R 55050–2012. *Railway rolling stock. Permissible exposure norms to the railway track and test methods.* National Russian Federation standard. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 16 p. (in Russ.).

16. Matusovskiy G. I., Kogan A. Ya. *Traektoriya dvizheniya kole-sa pri vkatyvanii ego na rel's* [Trajectory of the wheel when rolling it onto the rail]. Trudy VNIIZhT [Proceedings of the VNIIZHT]. Moscow, 1975, no. 542, pp. 148–155.

17. Matusovskiy G. I. *Ob issledovanii vkatyvaniya kole-sa greb-nem na rel's v puti, imeyushchem nerovnosti* [On the study of rolling a wheel with a flange on a rail in a track with irregularities]. Trudy VNIIZhT [Proceedings of the VNIIZHT]. Moscow, 1978, no. 592, pp. 114–121.

18. Danovich V. D., Rybkin V. V., Reydemeyster A. G., Khalipova N. V., Tryakin A. P. *K voprosu ob ustoychivosti protiv vkatyvaniya kole-sa na rel's porozhnikov gruzovykh vagonov* [On the issue of stability against rolling of a wheel onto a rail of empty freight cars]. Nauka i progress transporta [Science and progress of transport]. Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta [Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport], 2004, pp. 90–97.

ABOUT THE AUTHORS

Aleksander M. BRZHEZOVSKIY,
Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, JSC "VNIIZHT"

Oleg A. KRASNOBAEV,
Head of the Group, JSC "VNIIZHT"

Andrey V. SPIROV,
Head of the Department, JSC "VNIKT"

Il'ya E. IL'IN,
Head of the Laboratory, JSC "VNIKT"

Received 28.07.2020

Accepted 08.04.2021

For citation: Brzhezovskiy A. M., Krasnobaev O. A., Spirov A. V., Il'in I. E. On the permissible speeds of empty freight cars mounted on 18-100 model bogies // VNIIZHT Scientific Journal. 2021. 80 (2): 65–75 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-65-75>.

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Максимов И. Н., Кондрашов В. М. Альтернативные методы исследования динамики железнодорожных экипажей. М.: РАС, 2019. 108 с.

В книге подробно изложена методика исследования динамики железнодорожных экипажей, в основе которой лежит оригинальный подход к моделированию движения колесных пар железнодорожных экипажей в рельсовой колее, позволяющий реализовывать движение экипажей любой осности в прямых и кривых участках пути в режимах выбега, тяги и торможения.

Книга рассчитана на научных и инженерно-технических работников железнодорожного транспорта, также может быть полезна преподавателям и студентам транспортных вузов.

По вопросам приобретения книги 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, www.vniizht.ru.

Разработка и оценка комплекса исследований по повышению частоты изгибных колебаний кузовов современных пассажирских вагонов

А. Н. СКАЧКОВ, С. Л. САМОШКИН, С. Д. КОРШУНОВ, Д. А. НИКИФОРОВ, Д. А. РОМАШОВ

Акционерное общество Научная организация «Тверской институт вагоностроения» (АО НО «ТИВ»), Тверь, 170003, Россия

Аннотация. Описываются исследования частоты изгибных колебаний кузовов вагонов модельного ряда 61-4440, который включает вагоны купейные, штабные, некупейные, с местами для сидения, вагон-ресторан и другие. Кузова всех вагонов этого модельного ряда имеют одинаковые габаритные размеры и изготовлены из коррозионно-устойчивых сталей (нержавеющих) с плоскоффрированной обшивкой нижнего (подоконного) пояса.

Для оценки влияния конструктивных особенностей кузовов из нержавеющей стали на их изгибную жесткость и параметры изгибных колебаний в вертикальной плоскости проведен расчетно-экспериментальный комплекс работ.

После анализа результатов расчета и экспериментальных данных были выработаны и реализованы предложения по повышению изгибной жесткости металлоконструкции кузова с обшивкой из нержавеющей стали. Для проверки реализованных предложений были проведены комплексные испытания по определению параметров изгибных колебаний металлоконструкции опытного кузова. Испытания проводились по разработанному авторами комбинированному методу. Для этого использовались вибромашина, устанавливаемая в консольных частях кузова, и импульсное возбуждение.

Полученные результаты испытаний металлоконструкции опытного кузова по сравнению с результатами испытаний кузовов вагонов модельного ряда 61-4440 показали эффективность реализованных предложений, а именно: повышение частоты первого тона изгибных колебаний на 18 %; снижение амплитуды вертикальных колебаний конструкции кузова на частоте первого тона от 12 до 50 %; снижение амплитуды вертикальных ускорений металлоконструкции кузова при колебаниях на частоте первого тона приблизительно в 2 раза; существенное снижение горизонтального ускорения в зоне простенков среднего сечения. Эффективность реализованных предложений по повышению изгибной жесткости металлоконструкции опытного кузова позволяет рекомендовать их для всего модельного ряда вагонов 61-4440.

Ключевые слова: пассажирский вагон; модельный ряд; металлоконструкция кузова; вибрационные испытания; изгибные колебания; шпангоут; изгибная жесткость

Введение. В 2009 г. на ОАО «Тверской вагоностроительный завод» началось серийное производство пассажирских вагонов нового поколения с гофрированной обшивкой из нержавеющей стали нижнего (подоконного) пояса и крыши кузова — вагонов модельного ряда 61-4440. В настоящее время пассажирские вагоны локомотивной тяги этого модельного ряда являются самой массовой продукцией завода.

Указанный ряд включает в себя следующие модели вагонов:

- вагон пассажирский купейный модели 61-4440 (количество спальных мест 36 или 18 по желанию заказчика);
- вагон пассажирский купейный штабной модели 61-4445 (количество спальных мест 26, в том числе 2 места для инвалида и сопровождающего его лица);
- вагон пассажирский некупейный модели 61-4447 (количество спальных мест 54 в девяти 6-местных пассажирских отделениях);
- вагон пассажирский с местами для сидения модели 61-4458 (количество мест для сидения: 60 — для вагона со стандартным интерьером, 40 — для вагона с улучшенным интерьером);
- вагон-ресторан модели 61-4460 (количество посадочных мест: 32 — в салоне, 4 — в баре).

Все вагоны указанных моделей имеют много общих систем и узлов, а именно:

- систему автономного электроснабжения с генератором мощностью 32 кВт и редукторно-карданным приводом от середины оси колесной пары типа WBA 32/2;
- установку кондиционирования воздуха;
- систему экологически чистых туалетов;
- переходные площадки, автосцепки и буфера.

Большинство моделей вагонов установлены на 2-осные тележки безлюточного типа с дисковым тормозом (модель 68-4095 и модель 68-4096 с приводом), при этом модели вагонов в данном конструктивном исполнении могут быть установлены и на классические люлочные тележки моделей 68-4065 и 68-4066.

Очень близки по конструкции систем и узлов к модельному ряду 61-4440 вагоны поездов постоянного формирования. К ним относятся:

- вагон пассажирский купейный модели 61-4462 (количество спальных мест 36 или 18 по желанию заказчика);
- вагон пассажирский купейный штабной модели 61-4463 (количество спальных мест 26, в том числе 2 места для инвалида и сопровождающего его лица);
- вагон-ресторан модели 61-4464 (количество посадочных мест: 32 — в салоне, 4 — в баре).

В отличие от вагонов модельного ряда 61-4440 вагоны поездов постоянного формирования имеют централизованную систему электроснабжения, оборудованы замкнутыми междвагонными переходами производства фирмы Hubner GmbH и беззазорными сцепными устройствами.

Более подробное описание вагонов указанных моделей приведено в [1]. Особенности металлоконструкции базовой модели рассмотрены в [2].

Постановка задачи исследований. Все вагоны указанных выше моделей прошли обязательную сертификацию и получили сертификаты соответствия требованиям [3]. В процессе проведения приемочных и сертификационных испытаний было установлено, что низшая частота собственных изгибных колебаний в вертикальной плоскости близка к предельно допустимой для нагрузки «брутто» и равна 8 Гц согласно [4]. В [2] отмечалось, что указанный показатель более чем на 1 Гц меньше по сравнению с вагонами, обшивка которых изготовлена из обыкновенных углеродистых сталей. Такое положение дел для вагонов модельного ряда 61-4440 может привести к ухудшению вибрационных и шумовых характеристик при определенных условиях их эксплуатации. Подобные факты имели место и описаны в [5].

В табл. 1 приведены результаты экспериментальных исследований частоты первого тона изгибных колебаний основных моделей пассажирских вагонов модельного ряда 61-4440, которые были проведены за последние годы акционерным обществом Научная организация «Тверской институт вагоностроения» (АО НО «ТИВ»).

Для обеспечения благоприятных условий пребывания пассажиров в вагоне целесообразно повышение собственных частот изгибных колебаний более 8 Гц для нагрузки вагона «брутто». Одним из путей повышения собственных частот колебаний кузова является увеличение его изгибной жесткости [6].

АО НО «ТИВ» был проведен большой комплекс расчетно-экспериментальных исследований по оценке влияния конструктивных особенностей кузовов из нержавеющей стали на их изгибную жесткость и параметры изгибных колебаний [7, 8, 9, 10]. Одной из причин проведения указанных работ являлось исследование металлоконструкции для изготовления специализированных вагонов (вагоны-салоны, вагоны-лаборатории и т. д.) [5]. В этих исследованиях рассмотрено влияние конструктивных особенностей кузовов, форм контура поперечного сечения, установки дополнительных стрингеров, фрамуг и перегородок, расположения оборудования, имеющего существенную массу, и др. Выработанные по ходу исследований отдельные рекомендации внедрялись на серийных вагонах модельного ряда 61-4440 и проверялись экспериментально.

После анализа результатов расчета и экспериментальных данных, полученных при эксплуатации серийных кузовов вагонов модельного ряда 61-4440, где внедрялись рекомендации, было принято решение на опытном кузове проверить следующие технические предложения по повышению изгибной жесткости металлоконструкции (рис. 1):

- установить поперечные балки из швеллера 100×60×4 и дуги крыши на участке между шпренгель-

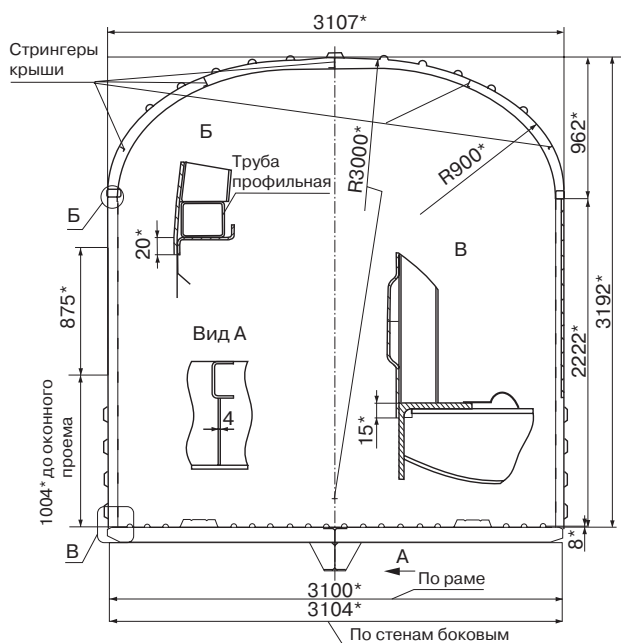
Таблица 1

Результаты экспериментального определения частоты первого тона изгибных колебаний вагонов модельного ряда 61-4440

Table 1

Results of experimental determination of the frequency of the first tone of bending vibrations of cars of the 61-4440 model range

Параметр		Единица измерения	Год проведения испытаний				
			2013	2011	2017	2018	2013
			Модель вагона				
			61-4440	61-4445	61-4447	61-4458	61-4462
Размеры	Длина кузова по концам торцевых стен	мм	~ 24 950				
	Длина кузова по раме	мм	~ 24 420				
	База вагона	мм	17 000				
	Ширина кузова по наружной обшивке	мм	3104				
	Высота кузова от пятника	мм	3580				
Масса	Металлоконструкция кузова при испытаниях	кг	12 790	19 500	18 530	18 900	12 750
	Тара кузова	кг	43 960	45 100	43 000	43 400	42 200
	Брутто кузова	кг	48 760	47 900	49 600	47 700	47 000
Частота колебаний	Металлоконструкция кузова	Гц	11,2	10,38	10,53	10,45	10,8
	Тара кузова	Гц	8,5	8,31	8,39	8,36	8,58
	Кузов брутто	Гц	8,1	8,04	8,06	8,05	8,1



*Размер для справок.

Рис. 1. Сечение опытного кузова (по оконному проему)
Fig. 1. Section of the experimental body (along the window opening)

ными балками (усиленные поперечные балки в переходной зоне хребтовой балки рамы) в одной плоскости со стойками боковин для образования с ними шпангоутов;

- установить пять стрингеров в крыше из z-образного профиля (центральный $40 \times 86 \times 45 \times 2,5$, два боковых $40 \times 65 \times 45 \times 2,5$ и два на скатах крыши $30 \times 30 \times 30 \times 2$);

- верхнюю обвязку боковых стен выполнить из замкнутого элемента типа «труба профильная»;

- в зоне соединения поперечных балок рамы с двутавром хребтовой балки установить трапециевидные ребра толщиной 4 мм.

Для оценки влияния внесенных в конструкцию кузова изменений на его параметры изгибных колебаний и сопоставление полученных результатов с результатами ранее проведенных испытаний базовых моделей были проведены вибрационные испытания опытного кузова пассажирского вагона.

На испытания была подана металлоконструкция на технологических тележках со следующими узлами, установленными на штатные места:

- котел опытной системы;
- люки крыши;
- откидные подножки;
- ударно-тяговые приборы;
- буферы.

Масса поданной на испытания металлоконструкции с вышеперечисленными узлами составила 17,6 т. Подготовка металлоконструкции испытуемого кузова проводилась для одного режима опирания, при кото-

ром кузов устанавливается на жесткие опоры. В качестве жестких опор использовались домкраты стенда статических испытаний вагонов, расположенные под концами шкворневых балок. Применение жестких опор позволяло достичь более точного позиционирования металлоконструкции.

В соответствии с целью вибрационных испытаний определялись следующие показатели:

- частота первого тона изгибных колебаний металлоконструкции кузова в вертикальной плоскости, (далее — частота первого тона);
- логарифмический декремент колебаний на частоте первого тона, определенный по наиболее характерным процессам ускорения;
- зависимость средней амплитуды перемещения контрольных точек, расположенных вдоль обвязки рамы, от частоты возмущающей силы (далее — АЧХ перемещения);
- зависимость средней амплитуды возмущающей силы от ее частоты.

Для определения указанных показателей регистрировались следующие процессы:

- ускорение в контрольных точках металлоконструкции кузова, м/с^2 ;
- перемещение в контрольных точках металлоконструкции кузова, мм;
- частота возмущающего усилия вибромашины, Гц;
- возмущающая сила вибромашины, Н.

Вибратор машины ВМ-10 был установлен на полу в тамбуре нетормозного конца вагона, условие жесткой связи его рабочего основания с рамой вагона было обеспечено. Возмущающая сила регистрировалась динамометрическими датчиками, установленными на вибраторе вибромашины. На валу двигателя вибратора установленный тахогенератор обеспечивал замеры частоты возмущающей силы. Также металлоконструкция кузова была оборудована следующими датчиками:

- акселерометры (датчики ускорения) ARF-10A с частотным диапазоном 0–100 Гц, обеспечивающие измерение ускорения в контрольных точках рамы металлоконструкции кузова;
- акселерометры ARF-50A с частотным диапазоном 0–200 Гц, обеспечивающие измерение ускорения в контрольных точках среднего сечения металлоконструкции кузова;
- датчики малого перемещения с диапазоном измерения от 0,02 до 2 мм, обеспечивающие измерение перемещения в контрольных точках рамы металлоконструкции кузова.

Датчики малого перемещения были установлены вдоль линии боковой обвязки на массивных, устойчивых опорах и имели возможность подстройки нулевого положения. Датчики ускорения устанавливались на обвязке рамы, а также в среднем сечении кузова и ориентировались на регистрацию амплитуды ускорения

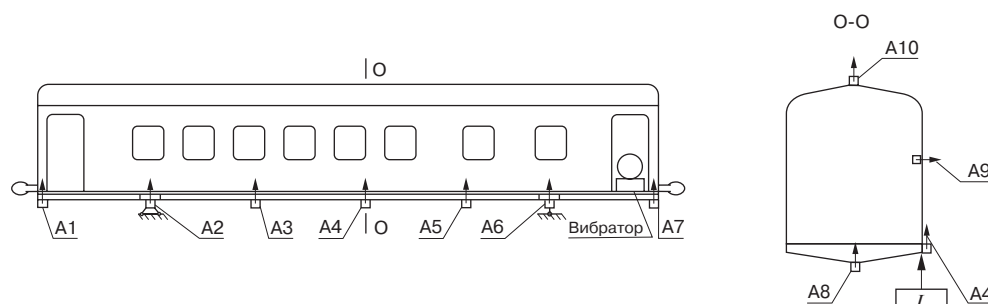


Рис. 2. Расположение датчиков ускорения на металлоконструкции опытного кузова при испытаниях:
A1–A10 — зоны установки акселерометров для определения вертикального и горизонтального ускорения
элементов кузова; L — зона установки датчиков перемещения

Fig. 2. Location of accelerometers sensors on the metal structure of the experimental body during testing:
A1–A10 — zones of installation of accelerometers for determining vertical and horizontal acceleration of body elements;
L — area of installation of motion sensors

в вертикальной и горизонтальной плоскостях кузова. Схемы размещения контрольных точек регистрации ускорения, перемещения и расположения вибратора на металлоконструкции кузова приведены на рис. 2 и 3.

При испытаниях применялся комплект усиленно-регистрирующей аппаратуры, построенный на базе динамических усилителей Spider 8/SR55, обеспечивавший работу с указанными датчиками и частоту дискретизации записываемых процессов 300 Гц. Для получения наиболее полных данных о вибрационных свойствах металлоконструкции кузова испытания объекта проводились тремя методами [11, 12, 13, 14].

Метод 1. Получение данных с помощью вибромашины последовательным дискретным набором. Во время проведения испытаний этим методом на кузов вагона воздействовали синусоидальной динамической силой, которая фиксировалась четырьмя силоизмерительными датчиками, установленными в основании вибромашины. Частота возмущающей силы изменялась ступенчато от 5 до 25 Гц с переменным шагом от 0,3 Гц в начале частотной оси до 1 Гц в конце. Было записано 73 реализации средней длительностью 15 с.

Метод 2. Получение данных с помощью вибромашины последовательным непрерывным набором. Во время проведения испытаний этим методом на кузов вагона воздействовали синусоидальной динамической силой, которая фиксировалась четырьмя силоизмерительными датчиками, установленными в основании вибромашины. Частота возмущающей силы изменялась плавно от 5 до 25 Гц и от 25 до 5 Гц. Было записано 6 реализаций средней длительностью 110 с.

Метод 3. Получение данных импульсным возбуждением. При испытаниях этим методом на кузов вагона оказывалось импульсное силовое воздействие с последующей регистрацией процесса затухающих колебаний в его конструкции при помощи датчиков ускорения. Возбуждение затухающих колебаний осуществлялось сбросом мерного стального груза массой 25 кг с высоты около 1,0 м на пол обоих тамбуров и се-

редины кузова поочередно. Всего было записано 9 реализаций длительностью около 11 с.

В процессе испытаний проводились периодические осмотры и визуальный контроль состояния конструкции кузова вагона.

Анализ результатов вибрационных испытаний опытного и серийного кузовов вагонов. На рис. 4 представлена зависимость возмущающей силы, измеренной на опытном кузове, от ее частоты. Зависимость получена по данным испытаний последовательным непрерывным набором.

Исходными данными для построения АЧХ перемещения являлись соответствующие процессы, записанные при испытаниях последовательным дискретным набором. Исходными данными для построения АЧХ ускорения являлись соответствующие процессы, записанные при испытаниях последовательным непрерывным набором. Квадратичное нарастание возмущающей силы от частоты учтено при обработке данных для построения АЧХ перемещения и ускорения. Типичная зависимость амплитуды перемещения от частоты показана на рис. 5 для датчика L4 (см. рис. 3).

На рис. 6 представлена зависимость амплитуды ускорения от частоты для всех датчиков среднего сечения опытного кузова.

На рис. 7 представлены формы вертикальной деформации опытного кузова при его колебаниях (из

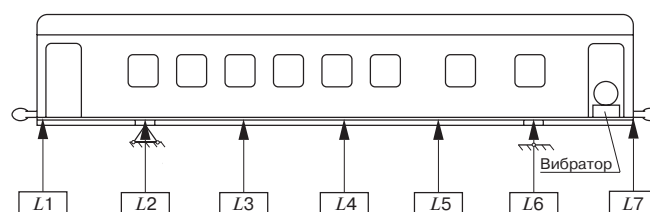


Рис. 3. Расположение датчиков перемещения L1–L7 на металлоконструкции опытного кузова при испытаниях
Fig. 3. Location of motion sensors L1–L7 on the metal structure of the experimental body during testing

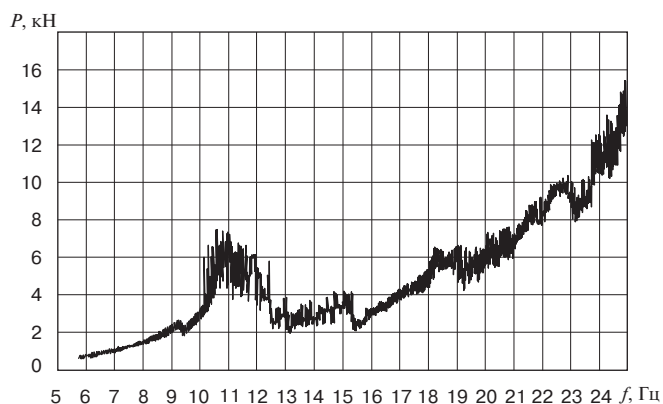


Рис. 4. Зависимость возмущающей силы P , измеренной на опытном кузове, от ее частоты f
Fig. 4. Dependence of disturbing force P , measured on the experimental body, on its frequency f

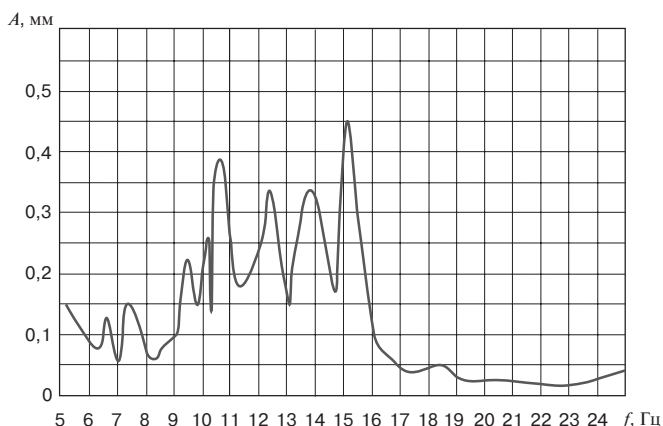


Рис. 5. Зависимость амплитуды перемещения A датчика $L4$ от частоты f на опытном кузове
Fig. 5. Dependence of amplitude of A motion of the sensor $L4$ on the frequency f on the experimental body

Таблица 2

Логарифмические декременты колебаний
опытного кузова на частоте 12,4 Гц

Table 2

Logarithmic decrements of vibrations
of the experimental body at a frequency of 12.4 Hz

Зона металлоконструкции кузова	Процесс	Декремент колебаний
Тормозной конец. Концевая балка	A1	0,09
Среднее сечение. Нижняя обвязка	A4	0,08
Среднее сечение. Хребтовая балка	A8	0,08
Среднее сечение. Зона простенка	A9	0,06
Среднее сечение. Конек крыши	A10	0,08
Нетормозной конец. Концевая балка	A7	0,08

предположения совпадения с формой деформации нижней обвязки), построенные для частот, на которых получены экстремумы АЧХ перемещения. Фор-

мы деформации кузова получены по данным с датчиков перемещения $L1-L7$.

Осциллограмма и спектральная плотность наиболее характерного процесса ускорения, полученные при испытаниях импульсным возбуждением кузова, установленного на жестких опорах, представлены на рис. 8.

Логарифмические декременты колебаний опытного кузова представлены в табл. 2. Исходными данными для определения декрементов являлись осциллограммы затухающих ускорений, полученные при импульсном методе возбуждения колебаний металлоконструкции.

При испытаниях металлоконструкции опытного кузова, установленного на жесткие опоры, максимальное значение векторной суммы возмущающей силы составило 16 кН и было получено на частоте 25 Гц (рис. 4). Возмущающая сила нарастает в целом пропорционально квадрату частоты и имеет значительный локальный подъем (до 7,5 кН) в области частот от 10,5 до 12,5 Гц.

Полученные в испытаниях АЧХ перемещения по датчикам $L1-L7$ имеют сложный вид, включающий в себя ряд экстремумов на частотах 9,5; 10,6; 12,4; 13,9 и 15,2 Гц. Максимальная амплитуда перемещения средней части кузова (см. рис. 5) составила 0,45 мм, а консольных частей — 1,44 мм на частоте 10,8 Гц (датчики $L1$ и $L7$).

АЧХ ускорения в зоне боковой обвязки имеют в целом экстремумы на тех же частотах, что и АЧХ перемещения, при этом не один из них существенно не доминирует, исключением является АЧХ, полученная с датчика $A7$, которая имеет преобладающий экстремум на частоте 10,8 Гц.

АЧХ вертикального ускорения, полученные с датчиков, размещенных в среднем сечении кузова (рис. 6), существенно отличаются. Так, АЧХ ускорения в зоне хребтовой балки имеет подъем в зоне частот от 10,4 до 14,2 Гц и два экстремума на частотах 10,6 и 13,9 Гц, АЧХ ускорения крыши имеет более узкую полосу подъема (от 10,4 до 12,5 Гц) и два экстремума на частотах 10,6 и 12,4 Гц. Максимальная амплитуда ускорения хребтовой балки составляет 4,8 м/с² (крыши — 5,3 м/с²) и вдвое превосходит амплитуду ускорения обвязки на частотах ниже 13 Гц.

АЧХ горизонтального ускорения, полученная с датчика, размещенного на простенке среднего сечения кузова, имеет множественные экстремумы, незначительно доминирующим из которых является экстремум на частоте 10,6 Гц.

При импульсном методе возбуждения частоты затухающих колебаний составили 9,8; 12,5 и 15,4 Гц, частота основного максимума, присутствующего на всех спектральных плотностях записанных процессов ускорения, — 12,5 Гц.

Значение частоты первого тона колебаний металлоконструкции опытного кузова, определенное при испытаниях, составляет 12,4 Гц.

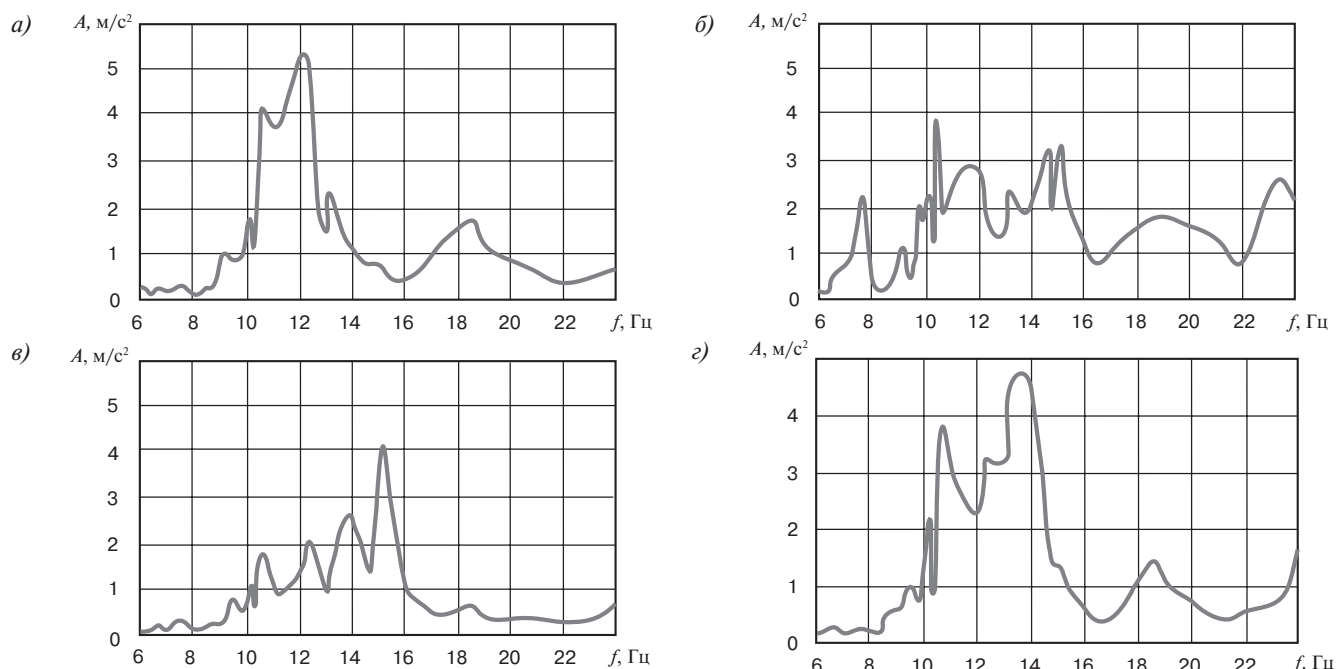


Рис. 6. Зависимость амплитуды ускорения от частоты, полученная в зоне среднего сечения опытного кузова для датчиков ускорения:

a — A10; *б* — A9; *в* — A4; *г* — A8

Fig. 6. Dependence of amplitude of acceleration on the frequency, obtained in the zone of the middle section of the experimental body for acceleration sensors:

a — A10; *б* — A9; *в* — A4; *г* — A8

Форма деформации кузова при колебаниях на частоте 12,4 Гц (рис. 7, *в*) совпадает с формой деформации балки на двух опорах при колебаниях на частоте первого тона.

Среднее значение логарифмического декремента вертикальных колебаний металлоконструкции кузова при испытаниях, определенное для частоты первого тона, составляет 0,08.

Для оценки эффективности увеличения жесткости металлоконструкции опытного кузова на повышение частоты изгибных колебаний проведем сопоставление результатов с данными по металлоконструкции кузова вагона модели 61-4447 [15]. Вагоны этой модели проходили наибольшее количество вибрационных, динамических и стационарных испытаний [16, 17] при постановке на производство и в процессе сертификации.

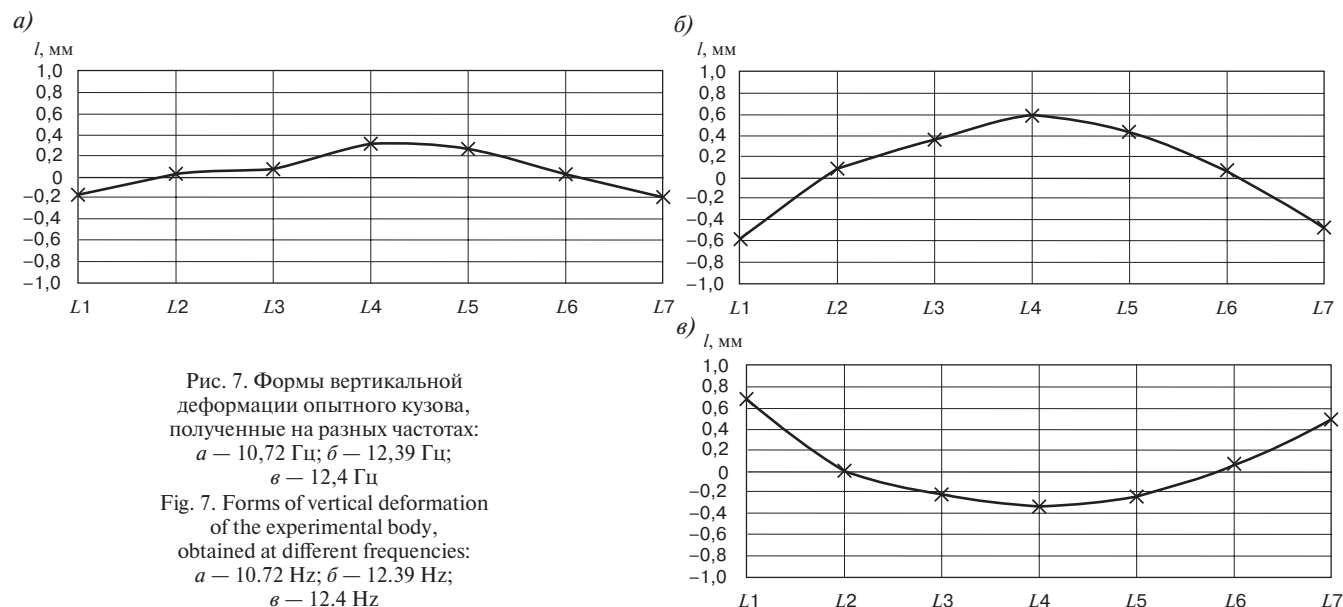
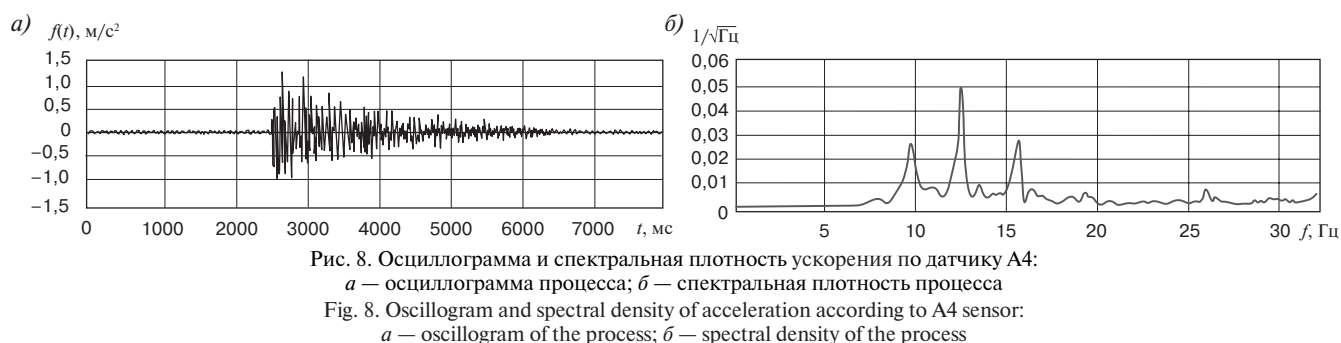


Рис. 7. Формы вертикальной деформации опытного кузова, полученные на разных частотах:
a — 10,72 Гц; *б* — 12,39 Гц;
в — 12,4 Гц

Fig. 7. Forms of vertical deformation of the experimental body, obtained at different frequencies:
a — 10.72 Hz; *б* — 12.39 Hz;
в — 12.4 Hz



На рис. 9 показана зависимость амплитуды ускорения от частоты для сравниваемых кузовов. По сравнению с кузовом вагона модели 61-4447 у опытного кузова для АЧХ ускорения в зоне среднего сечения характерно большее число экстремумов с меньшей амплитудой ускорения, амплитуда ускорения в зоне хребтовой балки ниже в 2 раза, а поперечные колебания в зоне простенка — в 4 раза.

В табл. 3 приведены значения ускорения различных зон металлоконструкции опытного кузова и кузова вагона модели 61-4447, полученные при колебаниях на частоте первого тона. Значения в таблице приведены к возмущающей силе, равной 7,5 кН. Как

видно из результатов, значения ускорения на металлоконструкции опытного кузова в большинстве зон существенно меньше, чем значения ускорения на металлоконструкции кузова вагона модели 61-4447.

В табл. 4 приведены сравнительные значения логарифмических декрементов колебаний сравниваемых металлоконструкций кузовов вагонов. Как видно из приведенных результатов испытаний, среднее значение логарифмического декремента вертикальных колебаний металлоконструкции, определенное для частоты первого тона, у кузова вагона модели 61-4447 на 27 % больше значения, полученного для опытного кузова.

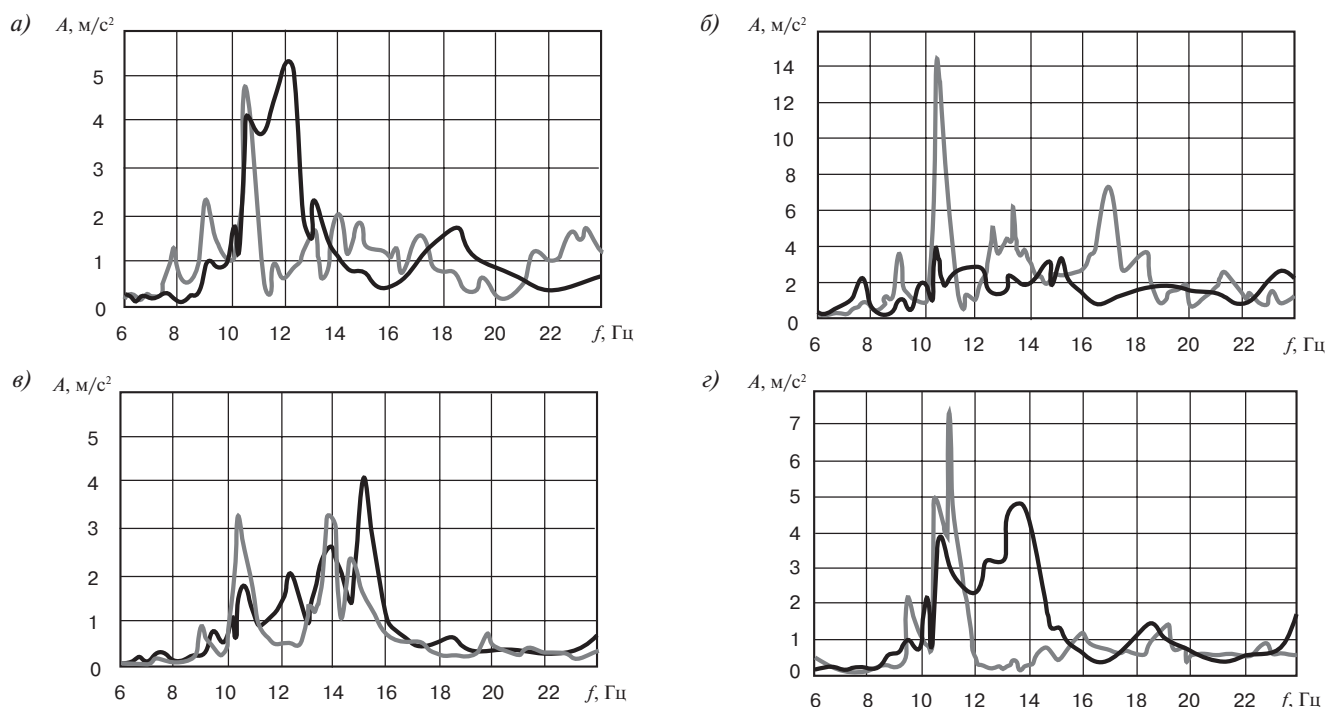


Таблица 3

Значения ускорения в металлоконструкциях опытного и серийного кузовов вагонов при одинаковой возмущающей силе

Table 3

Acceleration values in metal structures of experimental and serial car bodies with the same disturbing force

Зона металлоконструкции кузова	Процесс (в соответствии с рис. 2)	Ускорение в металлоконструкциях, Гц	
		Опытный кузов	Кузов вагона модели 61-4447
Тормозной конец. Концевая балка	A1	2,5	6,3
Среднее сечение. Нижняя обвязка	A4	2,6	3,3
Среднее сечение. Хребтовая балка	A8	4,1	7,8
Среднее сечение. Зона простенка	A9	1,9	14,9
Среднее сечение. Конек крыши	A10	6,8	4,9
Нетормозной конец. Концевая балка	A7	3,2	8,5
Частота сравнения	частота первого тона	12,4	10,5

Таблица 4

Логарифмические декременты колебаний опытного и серийного кузовов вагонов

Table 4

Logarithmic decrements of vibrations of experimental and serial car bodies

Зона металлоконструкции кузова	Процесс	Декремент колебаний	
		Опытный кузов	Кузов вагона модели 61-4447
Тормозной конец. Концевая балка	A1	0,09	0,11
Среднее сечение. Нижняя обвязка	A4	0,08	0,11
Среднее сечение. Хребтовая балка	A8	0,08	0,10
Среднее сечение. Зона простенка	A9	0,06	0,04
Среднее сечение. Конек крыши	A10	0,08	0,11
Нетормозной конец. Концевая балка	A7	0,08	0,12

Заключение. Проведенные экспериментальные исследования металлоконструкции опытного кузова и экспертиза результатов ранее выполненных испытаний металлоконструкции серийных вагонов показали положительную динамику параметров, характеризующих изгибные колебания, а именно:

- повышение частоты первого тона колебаний на 18,1 % (с 10,5 до 12,4 Гц);
- снижение (от 12 до 50 %) амплитуды вертикальных колебаний кузова на частоте первого тона;
- снижение (в среднем вдвое) амплитуды вертикальных ускорений кузова при колебаниях на частоте первого тона;
- существенное (с 14,9 до 1,9 м/с²) снижение горизонтального ускорения в зоне простенка среднего сечения при колебаниях на частоте первого тона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективный пассажирский подвижной состав / К. В. Бобышев [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2015. № 7. С. 43–45.
2. Анализ и оценка расчетно-экспериментального определения частоты изгибных колебаний кузовов пассажирских вагонов / А. Н. Скачков [и др.] // Тяжелое машиностроение. 2017. № 9. С. 24–31.

3. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности подвижного состава»: ТРТС 001/2011. Минск: БелГИИС, 2012. 46 с.

4. ГОСТ Р 55182–2012. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Общие технические требования: нац. стандарт Российской Федерации: утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 ноября 2012 г. № 1161-ст: дата введения 2014-01-01. М.: Стандартинформ, 2013. 24 с.

5. Скачков А. Н., Самошкин С. Л., Зайцев А. В. Способы управления параметрами вибрации пассажирских вагонов // Мир транспорта. 2017. № 2. С. 60–73.

6. Самошкин С. Л., Скачков А. Н., Коршунов С. Д. О необходимости интенсификации научно-исследовательских работ по определению изгибной жесткости и параметров колебаний кузовов современных пассажирских вагонов // Техника и технологии наземного транспорта: материалы Всерос. науч. конф. аспирантов, посвященной 50-летию кафедры «Вагоны» (25–26 января 2018 г.) / Уральский гос. ун-т путей сообщения (УрГУПС). Екатеринбург: УрГУПС, 2018. Вып. 2 (232). С. 86–90.

7. Скачков А. Н., Самошкин С. Л., Коршунов С. Д. Влияние снижения массы кузовов вагонов на их изгибную жесткость и параметры изгибных колебаний // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. (Санкт-Петербург, 5–9 июля 2017 г.) / Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС). СПб.: ПГУПС, 2017. С. 88–90.

8. Скачков А. Н., Самошкин С. Л., Коршунов С. Д. Влияние габаритно-весовых параметров кузовов пассажирских вагонов на их изгибную жесткость и параметры изгибных колебаний // Транспорт: наука, образование, производство: тр. Междунар. науч.-практ.

конф. (Ростов-на-Дону, 2017) / Ростовский гос. ун-т путей сообщения (РГУПС). Ростов н/Д.: РГУПС, 2017. Т. 1: Технические науки. С. 254–257.

9. Скачков А. Н., Самошкин С. Л., Коршунов С. Д. Определение изгибной жесткости кузовов пассажирских вагонов по результатам статических испытаний // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. (Санкт-Петербург, 4–8 июля 2018 г.) / Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС). СПб.: ПГУПС, 2018. С. 89–91.

10. Ломаков П. С., Скачков А. Н., Самошкин С. Л. Расчетные исследования влияния конструктивных особенностей кузова пассажирского вагона из нержавеющей стали на параметры его изгибных колебаний // Проблемы и перспективы развития вагоностроения: сб. науч. тр. VIII Всерос. науч.-техн. конф. (Брянск, 18–19 апреля 2019 г.) / Брянский гос. техн. ун-т (БГТУ). Брянск: БГТУ, 2019. С. 163–165.

11. Никифоров Д. А., Скачков А. Н. Отработка методики определения первого тона собственной частоты при испытаниях кузова вагона модели 61-4514 // Проблемы безопасности на транспорте: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель, 23–24 ноября 2017 г.): в 2 ч. / Белорусский гос. ун-т транспорта (БелГУТ); под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. Гомель: БелГУТ, 2017. Ч. 1. С. 132–133.

12. Скачков А. Н., Самошкин С. Л., Дементьев С. А. Анализ методов экспериментального определения параметров изгибных колебаний кузовов пассажирских вагонов // Проблемы безопасности на транспорте: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель, 23–24 ноября 2017 г.): в 2 ч. / Белорусский гос. ун-т транспорта (БелГУТ); под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. Гомель: БелГУТ, 2017. Ч. 1. С. 159–160.

13. Скачков А. Н., Самошкин С. Л., Коршунов С. Д. Экспериментальные исследования параметров изгибных колебаний кузовов вагонов метрополитена комбинированным способом // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. (Санкт-Петербург, 9 июля 2019 г.) / Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС). СПб.: ПГУПС, 2019. С. 280–282.

14. Совершенствование методов экспериментального определения параметров изгибных колебаний пассажирских ваго-

нов / А. Н. Скачков [и др.] // Труды РГУПС. 2019. № 4 (49). С. 108–111.

15. Разработка основополагающих принципов экспериментального метода определения изгибной жесткости кузовов цельнометаллических вагонов / А. Н. Скачков [и др.] // Тяжелое машиностроение. 2018. № 10. С. 32–37.

16. Коршунов С. Д. Методика расчетно-экспериментальных исследований кузовов современного подвижного состава / С. Д. Коршунов [и др.] // Известия ПГУПС. 2015. № 4. С. 38–47.

17. Коршунов С. Д. Развитие методов подресорного взвешивания железнодорожного подвижного состава // Вестник РГУПС. 2020. № 4. С. 60–64.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

СКАЧКОВ Александр Николаевич,

канд. техн. наук, заместитель генерального директора — технический директор, АО НО «ТИВ»

САМОШКИН Сергей Львович,

д-р техн. наук, начальник управления научно-технического обеспечения и развития, АО НО «ТИВ»

КОРШУНОВ Сергей Дмитриевич,

канд. техн. наук, заведующий лабораторией «Динамико-прочностные испытания вагонов», АО НО «ТИВ»

НИКИФОРОВ Дмитрий Александрович,

инженер первой категории, лаборатория «Динамико-прочностные испытания вагонов», АО НО «ТИВ»

РОМАШОВ Дмитрий Александрович,

инженер второй категории, лаборатория «Динамико-прочностные испытания вагонов», АО НО «ТИВ»

Статья поступила в редакцию 07.04.2021 г., принята к публикации 16.04.2021 г.

Для цитирования: Разработка и оценка комплекса исследований по повышению частоты изгибных колебаний кузовов современных пассажирских вагонов / А. Н. Скачков [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 2. С. 76–85. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-76-85>.

Development and evaluation of a complex of studies to increase the frequency of bending vibrations of modern passenger car bodies

A. N. SKACHKOV, S. L. SAMOSHKIN, S. D. KORSHUNOV, D. A. NIKIFOROV, D. A. ROMASHOV

Joint Stock Company Scientific Organization "Tver Institute of Car Construction" (JSC NO "TIV"), Tver, 170003, Russia

Abstract. Investigations of the frequency of bending vibrations of the car bodies of 61-4440 model range, which includes compartment cars, staff cars, non-compartment cars, coach cars, restaurant cars and others, are described. The bodies of all cars of this model range have the same overall dimensions and are made of corrosion-resistant steels (stainless) with flat corrugated sheathing of the lower (under the window) belt.

To assess the influence of the design features of stainless steel bodies on its bending stiffness and the parameters of bending vibrations in the vertical plane, a computational and experimental complex of works was carried out.

After analyzing the calculation results and experimental data, proposals were developed and implemented to increase the bending stiffness of the metal body structure with stainless steel

skin. To check the implemented proposals, complex tests were carried out to determine the parameters of bending vibrations of the metal structure of the experimental body. The tests were carried out according to the combined method developed by the authors. For this, a vibrator, installed in the console parts of the body, and impulse excitation were used.

The results of testing the metal structure of the experimental body in comparison with the results of testing the car bodies of 61-4440 model range showed the effectiveness of the implemented proposals, namely: increasing the frequency of the first tone of bending vibrations by 18 %; decrease in the amplitude of vertical vibrations of the body structure at the frequency of the first tone from 12 to 50 %; decrease in the amplitude of the vertical accelerations of the metal structure of the body during oscillations at the

frequency of the first tone approximately by 2 times; significant reduction in horizontal acceleration in the area of the middle section walls. The effectiveness of the implemented proposals for increasing the bending stiffness of the metal structure of the experimental body allows recommending them for the entire model range of 61-4440 cars.

Keywords: passenger car; car model range; body metal structure; vibration tests; bending vibrations; frame; bending stiffness

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-76-85>

REFERENCES

1. Bobryshev K. V., Kornev Yu. V., Pokrovskiy B. C., Samoshkin O. S. *Promising passenger rolling stock*. Zheleznodorozhnyy transport, 2015, no. 7, pp. 43–45.
2. Skachkov A. N., Samoshkin S. L., Korshunov S. D., Gorin S. A. *Analysis and evaluation of the calculated and experimental determination of the frequency of bending vibrations of the bodies of passenger cars*. Tyazheloe mashinostroenie, 2017, no. 9, pp. 24–31.
3. *Technical regulations of the Customs Union "On the safety of rolling stock": TRTS 001/2011*. Minsk, BelGIS Publ., 2012, 46 p. (in Russ.).
4. GOST R 55182–2012. *Passenger cars on locomotive traction. General technical requirements*. National standard of the Russian Federation, approved and put into effect by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology of November 26, 2012 No. 1161-st. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 24 p. (in Russ.).
5. Skachkov A. N., Samoshkin S. L., Zaytsev A. V. *Methods of controlling the vibration parameters of passenger cars*. World of Transport and Transportation, 2017, no. 2, pp. 60–73.
6. Samoshkin S. L., Skachkov A. N., Korshunov S. D. *On the need to intensify research work to determine the flexural stiffness and vibration parameters of the bodies of modern passenger cars*. Techniques and technologies of ground transport: materials of the All-Russian scientific conf. for postgraduate students dedicated to the 50th anniversary of the Department "Cars" (January 25–26, 2018). Ural state University of Railways (UrGUPS). Yekaterinburg, UrGUPS Publ., 2018, no. 2 (232), pp. 86–90.
7. Skachkov A. N., Samoshkin S. L., Korshunov S. D. *The effect of reducing the mass of car bodies on its bending stiffness and bending vibration parameters*. Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects: materials of the XII Int. scientific and technical conf. (St. Petersburg, July 5–9, 2017). St. Petersburg State University of Railway Transport of Emperor Alexander I (PGUPS). St. Petersburg, PGUPS Publ., 2017, pp. 88–90.
8. Skachkov A. N., Samoshkin S. L., Korshunov S. D. *Influence of the overall and weight parameters of passenger car bodies on its bending stiffness and bending vibration parameters*. Transport: science, education, production: proc. of the Int. scientific and practical conf. (Rostov-on-Don, 2017). Rostov State University of Railways (RGUPS). Rostov n/D, RGUPS Publ., 2017, Vol. 1: Tekhnicheskie nauki [Technical Sciences], pp. 254–257.
9. Skachkov A. N., Samoshkin S. L., Korshunov S. D. *Determination of the flexural stiffness of passenger car bodies according to the results of static tests*. Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects: materials of the XIII Int. scientific and technical conf. (St. Petersburg, July 4–8, 2018). St. Petersburg State University of Railway Transport of Emperor Alexander I (PGUPS). St. Petersburg, PGUPS Publ., 2018, pp. 89–91.
10. Lomakov P. S., Skachkov A. N., Samoshkin S. L. *Computational studies of the influence of the design features of a passenger car body made of stainless steels on the parameters of its bending vibrations*. Problems and prospects for the development of car

building: coll. of scientific papers of the VIII All-Russian scientific and technical conf. (Bryansk, April 18–19, 2019). Bryansk State Technical University (BGUT). Bryansk, BGUT Publ., 2019, pp. 163–165.

11. Nikiforov D. A., Skachkov A. N. *Development of the method for determining the first tone of the natural frequency when testing the 61-4514 car body*. Problems of safety in transport: materials of the VIII Int. scientific and practical conf. (Gomel, November 23–24, 2017): in 2 parts. Belarusian State University of Transport (BelGUT). Gomel, BelGUT Publ., 2017, Part 1, pp. 132–133.

12. Skachkov A. N., Samoshkin S. L., Dement'ev S. A. *Analysis of methods of experimental determination of the parameters of bending vibrations of passenger car bodies*. Problems of safety in transport: materials of the VIII Int. scientific and practical conf. (Gomel, November 23–24, 2017): in 2 parts. Belarusian State University of Transport (BelGUT). Gomel, BelGUT Publ., 2017, Part 1, pp. 159–160.

13. Skachkov A. N., Samoshkin S. L., Korshunov S. D. *Experimental studies of the parameters of bending vibrations of metro car bodies in a combined way*. Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects: materials of the XIV Int. scientific and technical conf. (St. Petersburg, July 9, 2019). St. Petersburg State University of Railway Transport of Emperor Alexander I (PGUPS). St. Petersburg, PGUPS Publ., 2019, pp. 280–282.

14. Skachkov A. N. *Improvement of methods for experimental determination of the parameters of flexural vibrations of passenger cars*. Trudy RGUPS [Proceedings of the RGUPS], 2019, no. 4 (49), pp. 108–111.

15. Skachkov A. N., Samoshkin S. L., Korshunov S. D., Zhukov A. S., Nikiforov D. A. *Development of the fundamental principles of the experimental method for determining the bending stiffness of the bodies of all-metal cars*. Tyazheloe mashinostroenie, 2018, no. 10, pp. 32–37.

16. Korshunov S. D., Skachkov A. N., Samoshkin S. L., Goncharov D. I., Zhukov A. S. *Method of calculation and experimental research of bodies of modern rolling stock*. Proceedings of Petersburg Transport University, 2015, no. 4, pp. 38–47.

17. Korshunov S. D. *Development of methods for wheel weighing of railway rolling stock*. Vestnik RGUPS, 2020, no. 4, pp. 60–64.

ABOUT THE AUTHORS

Aleksander N. SKACHKOV,

Cand. Sci. (Eng.), Deputy General Director — Technical Director, JSC NO "TIV"

Sergey L. SAMOSHKIN,

Dr. Sci. (Eng.), Head of Scientific and Technical Support and Development Department, JSC NO "TIV"

Sergey D. KORSHUNOV,

Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory "Dynamic Strength Testing of Cars", JSC NO "TIV"

Dmitriy A. NIKIFOROV,

1st Category Engineer, Laboratory "Dynamic Strength Testing of Cars", JSC NO "TIV"

Dmitriy A. ROMASHOV,

2nd Category Engineer, Laboratory "Dynamic Strength Testing of Cars", JSC NO "TIV"

Received 07.04.2021

Accepted 16.04.2021

■ E-mail: zaotiv@yandex.ru (S. D. Korshunov)

For citation: Skachkov A. N., Samoshkin S. L., Korshunov S. D., Nikiforov D. A., Romashov D. A. Development and evaluation of a complex of studies to increase the frequency of bending vibrations of modern passenger car bodies // VNIIZHT Scientific Journal. 2021. 80 (2): 76–85 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-76-85>.

Новый стенд для испытаний на надежность окон и дверей пассажирских вагонов

В. А. МАКАРОВ

Санкт-Петербургское государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение «Академия транспортных технологий» (СПб ГБПОУ «АТТ»), Санкт-Петербург, 192102, Россия

Аннотация. В статье дано описание нового стенда для испытаний на надежность окон и дверей пассажирских вагонов. Стенд может быть использован в различных отраслях промышленности, преимущественно в транспортном машиностроении, а также в строительной индустрии. Данный стенд функционально предназначен для испытания всего изделия (окна или двери), а также для определения ресурса работы отдельных механизмов этого изделия. В отличие от известных аналогов новый стенд для испытаний на надежность окон и дверей позволяет производить испытания при воздействии переменного аэродинамического давления, возникающего при эксплуатации окон и дверей на движущихся объектах, например на высокоскоростном наземном транспорте. Предложена специально разработанная методика испытаний на данном стенде, позволяющая имитировать знакопеременные аэродинамические воздействия на окна и двери, возникающие при прохождении поездом туннелей или расхождении поездов встречных направлений в условиях повышенных скоростей движения. Благодаря этому стендовые испытания могут послужить актуальным дополнением к существующим методам испытаний окон и дверей современного высокоскоростного подвижного состава.

Ключевые слова: пассажирский вагон; окна; двери; работоспособность; надежность; ресурс; динамическое давление; переменное давление; определение прочности; стенд для испытаний

Введение. В современных условиях происходит постоянное увеличение скорости движения поездов, а это приводит к возрастанию переменной аэродинамической нагрузки на окна и двери подвижного состава. Аэродинамическая нагрузка возникает в момент прохождения поездом туннелей, расхождения поездов встречных направлений, прохождения столбов, зданий, ограждений и других препятствий, находящихся вблизи железнодорожного пути. Увеличение аэродинамической нагрузки может привести к разрушению оконных блоков — образованию трещин, осколков (рис. 1) и травмированию пассажиров. Необходимо производить испытания окон и дверей на стойкость к переменным аэродинамическим нагрузкам перед тем, как устанавливать их на современный подвижной состав. Вопросы учета нагрузок от переменного аэродинамического давления на окна и двери подвижного состава возникли с ростом скорости движения поездов в конце XX в. [1, 2, 3], ранее ис-

пытаний таких видов не проводилось и не было специализированных испытательных стендов и методик испытаний.

Испытания боковых окон железнодорожного подвижного состава включают в себя следующие основные методы [4, 5]:

- испытание на вибропрочность;
- испытание на воздействие одиночных ударов;
- испытание на воздействие верхнего значения температуры среды при эксплуатации;
- испытание на воздействие нижнего значения температуры среды при эксплуатации;
- испытание на воздействие влажности воздуха (кратковременное);
- испытание на воздействие солнечного излучения;
- испытание на стойкость к воздействию постоянного статического давления;
- испытание на соответствие коэффициента теплопередачи окна;
- проверка качества стеклопакетов;
- проверка механической прочности форточки;
- испытание на надежность;
- проверка работоспособности окна «аварийный выход».

В современных условиях основным свойством окон, установленных на высокоскоростном железнодорожном транспорте, является стойкость к переменному давлению, возникающему в момент прохождения поездом туннеля или расхождения поездов встречных направлений.

С помощью ранее известных стендов на надежность окон и дверей и методик испытаний на них можно оценить работоспособность механизмов открытия/закрытия, но они не предусматривают возможность проведения испытаний на стойкость к переменному аэродинамическому давлению [6]. Повышение стойкости является очень важным требованием в условиях возрастания скорости движения поездов, так как при увеличении скорости движения растут и величины переменного давления, действующего на окна [7]. Новая модель стенда на надежность окон и дверей [8] и методика испытаний на нем позволяют проводить испытания на стой-

кость к переменному аэродинамическому давлению. Это дает возможность расширить состав существующих испытаний, что в конечном счете позволит изготавливать оконные и дверные конструкции, стойкие к переменным аэродинамическим нагрузкам, вследствие чего повысится безопасность пассажиров.

Новый стенд для испытаний на надежность окон и дверей. Данный стенд [8] позволяет производить испытания при воздействии переменного аэродинамического давления, характерного при эксплуатации окон и дверей на движущихся объектах, например на высокоскоростном наземном транспорте.

Устройство стенда приведено на схеме (рис. 2).

Стенд для испытаний на надежность окон и дверей состоит из основания 1, на котором установлен пульт управления 2, выходы которого соединены со входами счетчика циклов 3, датчика импульсов 4, с мотором-редуктором 5 через регулятор частоты напряжения 6, вертикальной опоры 7, стойки 8, которая может перемещаться в трех взаимно перпендикулярных направлениях для регулировки в зависимости от габаритных размеров испытуемого изделия 12. На стойке 8 установлена горизонтальная плита 9 с мотор-редуктором, который через водило 10 и рычаг-толкатель 11 соединен с испытуемым изделием. На вертикальной опоре 7 установлена герметичная камера 13 с закрепленным в ней каркасом 14 для крепления испытуемого изделия. Также в герметичной камере установлена рама 15 с возможностью возвратно-поступательного движения относительно каркаса. На основании установлен электродвигатель 16 гидропривода 18, электрически соединенный с пультом управления через регулятор частоты напряжения 17 и также соединенный с рамой 15, на которой установлен второй датчик импульсов 19, электрически соединенный со счетчиком циклов и пультом управления. Гидропривод состоит из гидронасоса, бака, предохранительного и обратного клапанов.

В качестве основания может быть использован пол производственного помещения, либо оно может быть выполнено в виде отдельной конструкции, например плиты или рамы, как показано на рис. 2.

В процессе испытаний имеется возможность изменения угловой скорости водила, для этого в цепь питания электродвигателя мотор-редуктора встроен регулятор частоты напряжения, который служит для плавного пуска электродвигателя с целью обеспечения безударного закрытия/открытия створки испытуемого изделия в начальный момент запуска стенда.

Стенд позволяет оценить как ресурс механизмов открытия/закрытия, так и ресурс испытуемого изделия в целом.

Для проведения испытаний на надежность механизмов открытия и закрытия подвижной створки необходимо перед началом испытаний вставить ис-

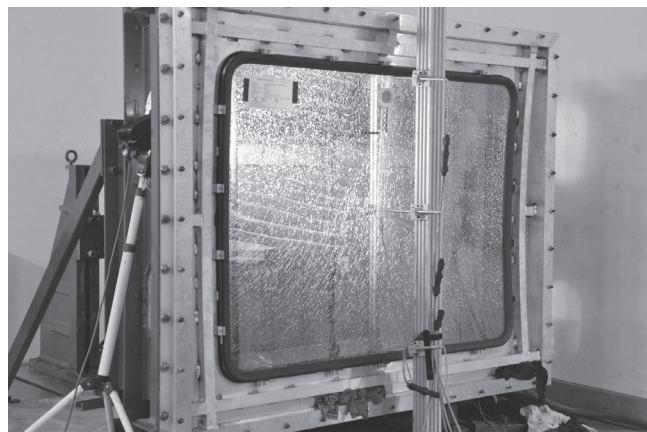


Рис. 1. Разрушение окна при воздействии динамического давления
Fig. 1. Window destruction when exposed to dynamic pressure

пытываемое изделие с помощью каркаса в герметичную камеру так, чтобы имитировалось крепление изделия в штатной конструкции. После этого к створке испытуемого изделия крепится датчик импульсов. К открывающейся створке испытуемого изделия прикрепляется рычаг-толкатель.

Работа стенда при испытаниях осуществляется следующим образом.

С помощью пульта управления через регулятор частоты напряжения происходит включение мотор-редуктора, который приводит в действие механизмы

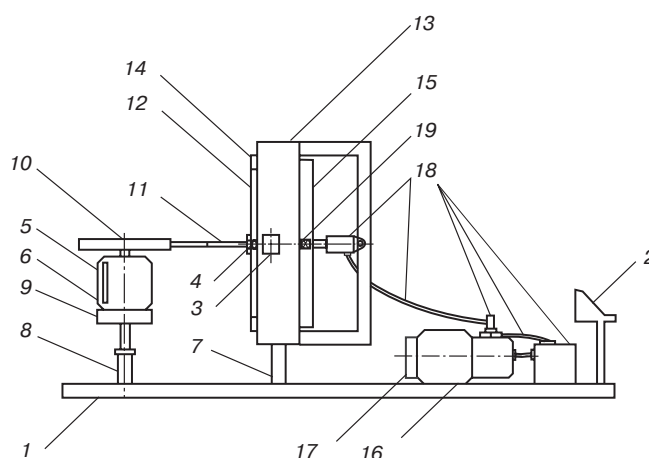


Рис. 2. Новый стенд для испытаний на надежность окон и дверей:

1 — основание; 2 — пульт управления; 3 — счетчик циклов; 4 — датчик импульсов; 5 — мотор-редуктор; 6 — регулятор частоты напряжения; 7 — вертикальная опора; 8 — стойка; 9 — горизонтальная плита; 10 — водило; 11 — рычаг-толкатель; 12 — испытуемое изделие; 13 — герметичная камера; 14 — каркас; 15 — рама; 16 — электродвигатель; 17 — регулятор частоты напряжения; 18 — гидропривод; 19 — датчик импульсов
Fig. 2. New bench for testing reliability of windows and doors:
1 — base; 2 — control panel; 3 — cycle counter; 4 — impulse sensor; 5 — gear motor; 6 — voltage frequency regulator; 7 — vertical support; 8 — rack; 9 — horizontal plate; 10 — carrier; 11 — pusher lever; 12 — tested product; 13 — sealed chamber; 14 — base framing; 15 — frame; 16 — electric motor; 17 — voltage frequency regulator; 18 — hydraulic drive; 19 — impulse sensor

открытия и закрытия испытуемого изделия. Циклы открытия и закрытия фиксируются с помощью датчика импульсов и счетчика циклов.

Для проведения испытаний на надежность всей конструкции при воздействии переменного давления необходимо вставить испытуемое изделие в каркас, имитирующий установку при эксплуатации. Каркас с испытуемым изделием устанавливается в герметичную камеру. Подвижная рама приводится в возвратно-поступательное движение с помощью штока гидроцилиндра гидропривода.

Работа стенда при данных испытаниях осуществляется следующим образом.

При помощи пульта управления включается электродвигатель гидронасоса, который обеспечивает подачу из бака через шланги рабочей жидкости и приводит в возвратно-поступательное движение шток поршня гидроцилиндра. Для безопасной работы в гидроприводе имеются предохранительный и обратный клапаны. При возвратно-поступательном движении штока гидроцилиндра приводится в движение подвижная рама герметичной камеры, при этом внутри камеры создается переменное давление, имитирующее разрежение, либо избыточное давление, создаваемое при прохождении поездом туннелей или расхождении поездов встречных направлений. Величина создаваемого давления и разрежения внутри камеры зависит от смещения рамы. Поскольку величина переменного динамического давления зависит от скорости движения поездов, на стенде можно имитировать различные скоростные режимы поездов. Также допускается изменение скорости возвратно-поступательного движения рамы с помощью регулятора частоты напряжения, электродвигателя гидронасоса. Количество циклов перемещений рамы

фиксируется датчиком импульсов и отображается на счетчике циклов. Таким образом, можно отслеживать изменения испытуемых изделий в зависимости от количества циклов нагрузки, при этом оценивая надежность и ресурс изделия при работе в условиях переменного давления.

Методика испытаний по воздействию переменного аэродинамического давления. С помощью рассмотренного стенда были произведены испытания комплекта боковых окон с целью определения возможности их использования на высокоскоростном подвижном составе (рис. 3). Благодаря применению климатической камеры были подобраны резинопластмассовые изделия, способные работать в оконных блоках, которые предполагается использовать на поездах такого типа.

Для проведения испытаний окно устанавливается в каркас испытательного стенда.

Первые 100 тыс. циклов окно нагружают давлением $\pm 1,5$ кПа с частотой 6 Гц. После этого производят визуальный осмотр внешнего вида испытуемого окна и проверку его работоспособности (например, работы механизмов открывания/закрывания форточки при наличии). При отсутствии повреждений испытания продолжаются.

Следующие 600 тыс. циклов окно нагружают давлением $\pm 2,5$ кПа с частотой 3 Гц. После этого тоже производится визуальный осмотр внешнего вида испытуемого окна и проверка его работоспособности. Продолжение испытаний возможно только при отсутствии повреждений.

Следующие 400 тыс. циклов окно нагружают давлением ± 4 кПа с частотой 1,5 Гц с последующим визуальным осмотром и проверкой работоспособности.

Последние 100 тыс. циклов окно нагружают давлением $\pm 1,5$ кПа с частотой 6 Гц.

После этого испытуемое окно вместе с каркасом демонтируют с испытательного стенда и производят визуальный осмотр внешнего вида испытуемого окна и проверку его работоспособности. Далее производят испытание на точку росы в соответствии с ГОСТ Р 54174–2010 [9], приложение С.

Испытуемые окна считаются выдержавшими испытание, если:

- отсутствуют трещины на раме, отрыв и отделение уплотнения, нет образования трещин на стекле или осколков;
- максимальное перемещение центра стеклопакета не превышает 10 мм;
- точка росы стеклопакета ниже -60 °С.

Заключение. В отличие от существующих стендов рассмотренный стенд дополнительно предусматривает возможность проведения испытаний на воздействие знакопеременного аэродинамического давления,

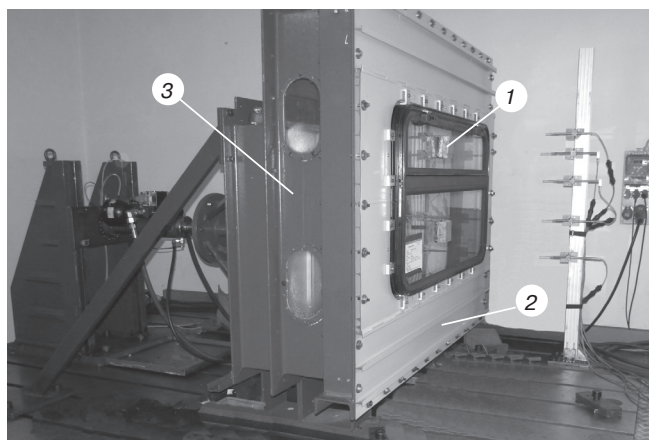


Рис. 3. Окно в каркасе на стенде:

1 — испытуемое окно; 2 — каркас; 3 — испытательный стенд

Fig. 3. Window in the framing at the bench:

1 — tested window; 2 — framing; 3 — test bench

влияние которого на надежность окон и дверей становится все значительнее по мере увеличения скоростей движения подвижного состава. Предложенная методика испытаний на новом стенде является актуальным дополнением к существующим методам испытаний окон и дверей высокоскоростного подвижного состава и позволяет имитировать знакопеременные аэродинамические воздействия на окна и двери, возникающие при прохождении поездом туннелей или расхождении поездов встречных направлений в условиях повышенных скоростей движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гарг В. К., Дуккипати Р. В. Динамика подвижного состава: пер. с англ. М.: Транспорт, 1988. 391 с.
2. Вериго М. Ф. Динамика вагонов. М.: ВЗИИТ, 1971. 176 с.
3. The Car & Locomotive Cyclopedia / P. Kentner [et al.]. [S. l.], 1997. P. 11–36.
4. ГОСТ 30630.0.0–99. Методы испытаний на стойкость к внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Общие требования: межгос. стандарт: введен в действие в качестве гос. стандарта постановлением Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации и метрологии от 15 февраля 2000 г. № 38-ст: дата введения 2000-09-01. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. 28 с.
5. ГОСТ 30630.1.2–99. Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие вибрации: межгос. стандарт: введен в действие в качестве гос. стандарта постановлением Государственного комитета Российской Федерации

по стандартизации и метрологии от 13 апреля 2000 г. № 104-ст: дата введения 2001-01-01. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. 28 с.

6. Стенд для испытаний на надежность окон и дверей: пат. 2486487 Российская Федерация: МПК G01M 99/00 / Г. Г. Бас, Л. Ю. Еремеев, Е. К. Ильченко; патентообладатель Государственный ракетный центр им. акад. В. П. Макеева. № 2011129193/28; заявл. 12.07.2011; опубл. 27.06.2013, Бюл. № 18.

7. Поляков Б. О., Ватулина Е. Я. Взаимодействие высокоскоростного поезда с воздушной средой вблизи объектов инфраструктуры // Транспорт Российской Федерации. 2017. № 3 (70). С. 25–28.

8. Стенд для испытаний на надежность окон и дверей: пат. 179747 Российская Федерация: МПК G01M 99/00 / В. А. Макаров, Ю. П. Бороненко; патентообладатель Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. № 2017143248; заявл. 11.12.2017; опубл. 23.05.2018, Бюл. № 15.

9. ГОСТ Р 54174–2010. Стеклопакеты клееные. Правила и методы обеспечения качества продукции: нац. стандарт Российской Федерации: утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 декабря 2010 г. № 946-ст: дата введения 2012-07-01. М.: Стандартинформ, 2012. 46 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

МАКАРОВ Виктор Анатольевич, аспирант, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I; преподаватель СПб ГБПОУ «АТТ»

Статья поступила в редакцию 11.09.2020 г., принята к публикации 05.03.2021 г.

Для цитирования: Макаров В. А. Новый стенд для испытаний на надежность окон и дверей пассажирских вагонов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 2. С. 86–90. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-86-90>.

New bench for testing the reliability of windows and doors of passenger cars

V. A. MAKAROV

St. Petersburg State Budgetary Professional Educational Institution "Academy of Transport Technologies" (SPb GBPOU "ATT"), St. Petersburg, 192102, Russia

Abstract. The article describes a new bench for testing the reliability of passenger car windows and doors. The bench can be used in various industries, mainly in transport engineering, as well as in the construction industry. This bench is functionally designed to test the entire product (windows or doors), as well as to determine the service life of individual mechanisms of this product. In contrast to the known analogs, the new bench for testing the reliability of windows and doors allows testing under the influence of variable aerodynamic pressure arising from the operation of windows and doors on moving objects, for example on high-speed transport. Specially developed test method is proposed on this bench, which allows simulating alternating aerodynamic effects on windows and doors that occur when a train passes tunnels or when trains in opposite directions diverge at high speeds. Thanks to this, bench tests can serve as an actual addition to the existing methods of testing windows and doors of modern high-speed rolling stock.

Keywords: passenger car; window; doors; working capacity; reliability; resource; dynamic pressure; variable pressure; determination of strength; test bench

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-86-90>

REFERENCES

1. Garg V. K., Dukkupati R. V. *Dinamika podvijnogo sostava* [Dynamics of rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1988, 391 p.
2. Verigo M. F. *Dinamika vagonov* [Dynamics of cars]. Moscow, VZII Publ., 1971, 176 p.
3. Kentner P., Brundige B., Thorpe J. C. [et al.]. *The Car & Locomotive Cyclopedia*. [S. l.], 1997, pp. 11–36.
4. GOST 30630.0.0–99. *Environment stability test methods for machines, instruments and other industrial products. General requirements*. Interstate standard, put into effect as a state standard

by the decree of the State Committee of the Russian Federation for Standardization and Metrology dated February 15, 2000 No. 38-st. Moscow, IPK Publishing house of standards, 2000. 28 p. (in Russ.).

5. GOST 30630.1.2–99. *Mechanical environment stability test methods for machines, instruments and other industrial products. Tests for influences of vibration*. Interstate standard, put into effect as a state of the standard by the decree of the State Committee of the Russian Federation for Standardization and Metrology dated April 13, 2000 No. 104-st. Moscow, IPK Publishing house of standards, 2000, 28 p. (in Russ.).

6. Bas G. G., Ereemeev L. Yu., Il'chenko E. K. *Stend dlya ispytaniy na nadezhnost' okon i dverey* [Bench for testing the reliability of windows and doors]. Pat. 2486487 Rossiyskaya Federatsiya; opubl. 27 iyunya 2013 g., Byul. No. 18. [Utility Patent No. 2486487 Russian Federation; publ. June 27, 2013, Bull. No. 18.] (in Russ.).

7. Polyakov B. O., Vatulina E. Ya. *Vzaimodeystvie vysokoskorostnogo poezda s vozduшной sredoy vblizi ob'ektov infrastruktury* [Interaction of a high-speed train with an air environment

near infrastructure facilities]. Transport of the Russian Federation, 2017, no. 3, pp. 25–28.

8. Makarov V. A., Boronenko Yu. P. *Stend dlya ispytaniy na nadezhnost' okon i dverey* [Bench for testing the reliability of windows and doors]. Pat. 179747 Rossiyskaya Federatsiya; opubl. 23 maya 2018 g., Byul. No. 15 [Utility Patent No. 179747 Russian Federation; publ. May 23, 2018, Bull. No. 15.] (in Russ.).

9. GOST R 54174–2010. *Sealed insulating glass units. Rules and methods of products quality assurance*. National standard of the Russian Federation. Approved and put into effect by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 21, 2010 No. 946-st. Moscow, Standartinform Publ., 2012, 46 p. (in Russ.).

ABOUT THE AUTHOR

Viktor A. MAKAROV,

Post-Graduate, Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I; Teacher, SPb GBPOU "ATT"

Received 11.09.2020

Accepted 05.03.2021

■ E-mail: viktor.mak361@yandex.ru (V. A. Makarov)

For citation: Makarov V. A. New bench for testing the reliability of windows and doors of passenger cars // VNIIZHT Scientific Journal. 2021. 80 (2): 86–90 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-86-90>.

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Марков Д. П. Атомно-молекулярные механизмы вещественного трения. М.: РАС, 2019. 102 с.

В монографии представлены результаты 40-летних поисков ответа на вопрос «Что такое трение?». Даны определения полевого и вещественного трения. Уточнены понятия и особенности действия адгезионных и когезионных сил межатомного притяжения, введено понятие дегезионных сил межатомного отталкивания. Предложены новые атомно-молекулярные теории внешнего трения и изнашивания, течения жидкостей, дислокационной и аморфной

пластической деформации и разрушения кристаллических тел. Выдвинута гипотеза активации плавления, кристаллизации, пластической деформации и других процессов волнового акустического теплового диапазона и произведена оценка их параметров. На обсуждение выносятся 14 гипотез, очерчивающих контуры теории вещественного трения на границе и внутри твердых тел, в жидкостях и газах.

Монография предназначена для научных и научно-технических работников, изучающих процессы трения, также может быть полезна преподавателям и студентам вузов.

Ромен Ю. С. Взаимодействие пути и экипажа в рельсовой колее. М.: РАС, 2019. 160 с.

Рассмотрены проблемы системы «колесо–рельс». Дано описание основных этапов моделирования динамических процессов и проведения испытаний. Изложена методика составления математической модели движения подвижного состава и определения пара-

метров взаимодействия подвижного состава и пути в процессе испытаний. Показано влияние состояния поверхности катания на силы вписывания, а также влияние неровностей на колебания тележки.

Книга предназначена для научных и научно-технических работников железнодорожного транспорта, а также может быть полезна преподавателям и студентам транспортных вузов.

Экспериментальная оценка взаимодействия экипажа и пути при скоростном и высокоскоростном движении: коллективная монография / под ред. А. М. Бржезовского. М.: РАС, 2019. 152 с.

Авторы: к.т.н. А. М. Бржезовский — редактор (предисловие, 1.1, 1.2, 1.4, 2–4, 5.1, заключение); к.т.н. Д. Н. Аршинцев (3.1–3.3, 4); инж. О. Г. Бржезовская (2.1); д.т.н. проф. Б. Э. Глюзберг (1.3, 5.2); инж. В. Г. Донец (5.2); к.т.н. А. В. Завертало (1.2); к.т.н. Д. Е. Кирюшин (3.2); к.т.н. М. В. Козлов (2.2, 3.4); к.т.н. И. Н. Максимов (5.1); инж. А. Г. Парчевский (4.1); к.т.н. И. В. Смелянский (3.1–3.3, 4); д.т.н. проф. Ю. С. Ромен (1.2, 1.4); к.т.н. Ю. С. Тихов (4.1); к.т.н. М. И. Титаренко (5.2); инж. С. В. Толмачев (3.1–3.3, 4, 5.1).

В монографии приведен обзор особенностей конструкции экипажной части скоростного и высокоскоростного пассажирского

подвижного состава железных дорог шириной колеи 1520 мм. Обобщены результаты комплексных ходовых и по воздействию на путь и на стрелочные переводы испытаний различных типов пассажирского подвижного состава, проведенные с целью определения условий обращения на линиях смешанного пассажирского и грузового движения.

Книга рассчитана на научных и инженерно-технических работников железнодорожного транспорта, 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, www.vniizht.ru.

Методология построения цифровых двойников на железнодорожном транспорте

Д. В. ШЕВЧЕНКО

Общество с ограниченной ответственностью «Всесоюзный научно-исследовательский центр транспортных технологий» (ООО «ВНИЦТТ»), Санкт-Петербург, 199106, Россия

Аннотация. Четвертая промышленная революция охватывает все направления экономической деятельности человека, в том числе и области, связанные с проектированием и эксплуатацией различных изделий (здание атомной станции, грузовой вагон, МЭМС-устройства и т. д.) на протяжении всего их жизненного цикла. Одним из основных инструментов цифровой трансформации промышленности под новые конкурентные требования является цифровой двойник (Digital Twin), который всегда строится для конкретного физического объекта. Внедрение в жизненный цикл грузового вагона технологии цифровых двойников позволит повысить экономическую эффективность на всем его протяжении.

Эффективное применение технологии цифрового двойника возможно только при создании адекватной виртуальной модели окружающего этот физический объект пространства. В этой связи прогнозирование поведения конструкции при движении на основе высокоточной модели цифрового двойника физического объекта требует создания виртуального пространства, в котором будет реализован виртуальный полигон, обеспечивающий возможность математического моделирования движения. Для этого необходимо создавать виртуальные стенды и полигоны, на которых можно будет проводить численные испытания. Создание качественного виртуального пространства позволит резко снизить количество проводимых натурных испытаний, изучить влияние большего числа параметров на эксплуатационные характеристики физического объекта.

Создание и применение цифровых двойников согласуется с целями, задачами и планом мероприятий Стратегии развития транспортного машиностроения РФ на период до 2030 г. Внедрение цифровых двойников в железнодорожном транспорте, в частности грузовом подвижном составе, позволит правильно назначать срок службы, сроки межремонтного пробега, повысить эффективность эксплуатации, собрать информацию о реальной нагруженности и т. д. Для сохранения конкурентных преимуществ перед другими видами транспорта вагоностроительной отрасли необходимо развиваться в сторону внедрения элементов четвертой промышленной революции, в том числе и цифровых двойников.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт; грузовой вагон; цифровой двойник; четвертая промышленная революция; цифровая тень; виртуальные стенды и полигоны; цифровизация процессов

Введение. За время своего развития человечество пережило три этапа качественного преобразования производительных сил, основанных на превращении знаний в непосредственную производительную силу. Такие превращения называются промышленными (производственными) революци-

ями [1]. Первая революция (рубеж XVIII и XIX вв.) была связана с внедрением машин и паровой энергии, вторая революция (конец XIX — начало XX в.) основана на внедрении электричества и массового производства, третья (конец XX в.) — на внедрении элементов автоматического производства, IT-систем и электроники.

В 2011 г. в Германии впервые прозвучал термин «четвертая промышленная революция». В рамках этого этапа преобразований производства и жизни человека предполагается широкое внедрение киберфизических систем. В данном случае под киберфизической системой понимается интеграция вычислительных ресурсов в физические объекты любого вида [2]. Такое развитие связано с возросшими требованиями к производительности труда, экономической эффективности и глобальной конкурентоспособности. Эта революция основана на таких инновациях и методах, как интернет вещей (IoT), дополненная реальность (AR), 3D-печать, искусственный интеллект (AI) и т. д. Она охватывает все направления экономической деятельности человека, в том числе и области, связанные с проектированием и эксплуатацией различных изделий. В данном случае под изделием понимаются физические объекты широкого круга: здание атомной станции, грузовой вагон-платформа, МЭМС-устройства и т. д.

Одним из основных инструментов цифровой трансформации промышленности под новые конкурентные требования является цифровой двойник (Digital Twin) физического объекта. Этот термин в настоящее время еще не получил окончательной формулировки, и в разных отраслях могут подразумеваться несколько отличные друг от друга понятия. Но во всех этих определениях есть объединяющая их составляющая: цифровой двойник всегда строится для конкретного физического объекта. Проекты, в рамках которых внедряются и применяются цифровые двойники, показывают высокую экономическую эффективность. Например, согласно данным, представленным подразделением Digital корпорации General Electric, применение цифровых двойников позволило на 93 % повысить надежность выпускаемых изделий,

на 40 % снизить стоимость их обслуживания в эксплуатации, на 75 % сократить время возврата вложенных средств, а также снизить потери на 11 млн долл. за счет предотвращения трех аварийных случаев [3].

Цифровая модель, цифровая тень и цифровой двойник. В конце XX в. на производствах активно реализовывалась новая концепция, названная CALS (Continuous Acquisition and Life Cycle Support), в рамках которой широко внедрялись различные CAD/CAE/CAM-технологии. На этом этапе возникло понятие «цифровая модель изделия», которое означало численное представление существующего или проектируемого объекта, в котором не используется никакая-либо форма автоматического обмена данными между реальным изделием и его виртуальным представлением. Цифровая модель может описывать объект с разной степенью детализации и предназначаться для описания конкретных физических явлений. В результате возникло понятие «иерархическая последовательность цифровых моделей», т. е. такой набор, с помощью которого можно описать поведение объекта с необходимой степенью точности и в различных физических областях, в которых осуществляется его эксплуатация [4, 5].

Сначала цифровые модели широко использовались на первом этапе жизненного цикла изделия, а именно на этапе проектирования. Параллельно проводились попытки учитывать в виртуальных объектах данные, полученные в рамках испытаний или эксплуатации, но накопление и передача этой информации в цифровую модель происходила в «ручном» режиме. Можно сказать, что изменение состояния физического объекта не оказывало прямого «активного» влияния на виртуальное изделие, и наоборот. Однако в тот момент, когда возникли и стали использоваться понятия цифровой модели и иерархической последовательности, возникла необходимость рассмотреть два независимых множества: физическое пространство, в котором существует проектируемый и исследуемый предмет, и виртуальное пространство, в котором существует и видоизменяется иерархическая последовательность цифровых моделей изделия, т. е.

$$\exists r \in R \text{ и } \exists v \in V \subset V, \quad (1)$$

где r — физический объект; R — физическое пространство; v — виртуальный объект; V — иерархическая последовательность цифровых моделей; V — виртуальное пространство.

Так как соответствие между этими объектами устанавливалось только за счет знаний и умений инженера, создающего цифровую модель, то нельзя сказать, что существовала какая-то устойчивая связь между этими пространствами. Специалисты разной ква-

лификации могли создать различные виртуальные объекты одного и того же изделия, выбрать разные граничные и начальные условия для описания его поведения.

Накопление опыта применения цифровых изделий и противоречий, реализуемых в ходе их создания специалистами разной квалификации, привело к пониманию необходимости введения процедур верификации и валидации создаваемых цифровых моделей. Также возникло желание на основе компьютерного моделирования предугадывать поведение эксплуатируемого объекта в будущем. В этот момент начали появляться различные системы мониторинга состояния объектов во время эксплуатации, позволяющие на основе собранных ими данных уточнять реализуемые цифровые модели. Эти системы, будучи установленными, например, на грузовом вагоне, могут передавать неоптимизированный избыточный набор измеренной информации о состоянии изделия в общую систему хранения данных большого объема (Big Data), где после обработки данная информация используется для валидации цифровых моделей, а также на основе предиктивной аналитики позволяют выявить закономерности, которые могут помочь спрогнозировать поведение изучаемого объекта в будущем. В этом случае изменение состояния физического объекта оказывает прямое влияние на цифровое изделие, но не работает в обратном направлении. Возникающая в таком подходе цифровая модель называется цифровой тенью физического объекта [6]. Применение цифровых теней позволяет снизить число допущений, вносимых при проектировании, и увеличить адекватность проводимых численных исследований за счет применения данных, полученных в процессе эксплуатации. Подход, построенный на основе цифровых теней, может быть представлен в виде следующего выражения:

$$\exists m: R \xrightarrow{m} V \subset V$$

или

$$\exists m: \{v \in V \subset V \mid \exists r \in R, v = m(r)\}, \quad (2)$$

где m — отображение элементов физического пространства в соответствующую им иерархическую последовательность, содержащуюся в виртуальном пространстве (набор правил, по которым физическому объекту ставится в соответствие цифровая модель из иерархической последовательности, описывающая конкретное физическое явление).

В подходах, использующих цифровые тени в качестве отображения m , позволяющего сопоставить физический и виртуальный объекты, применяется система измерений, осуществляемая с помощью установленных на исследуемом объекте систем мониторинга.

На основе этих измерений формируются наборы исходных данных, используемые в численных исследованиях и оказывающие прямое влияние на цифровое изделие.

Однако технология цифровых теней, вообще говоря, является промежуточным шагом на пути эволюции виртуального объекта. Применение такого подхода на практике сопряжено со следующими трудностями:

- возможно применение в задачах, в которых наблюдаются повторяющиеся или не сильно отличающиеся друг от друга процессы;
- невозможно моделирование ситуации, которая не реализовывалась на физическом объекте в прошлом;
- генерируется избыточное количество данных, большая часть которых не является информативной.

Следующим шагом на пути цифровизации процессов проектирования и производства, без которого не может полностью осуществиться четвертая промышленная революция, является внедрение нового подхода, основанного на построении и применении цифровых двойников физических объектов, где под объектом может пониматься технология, процесс, компонент, изделие, система или совокупность изделий.

Этот термин впервые использовался экспертом NASA Джоном Викерсом (John Vickers), в дальнейшем его стал применять один из основоположников концепции цифрового двойника Майкл Гривс (Michael Grieves). В серии работ, опубликованных Гривсом на протяжении 2011–2014 гг., в том числе и в соавторстве с Викерсом, понятие «цифровой двойник» сильно эволюционировало, однако три базовых составляющих оставались неизменными. Согласно Гривсу, для создания цифрового двойника необходимо существование [7]:

- физического объекта вместе с физическим окружением, в котором он существует;
- виртуального объекта вместе с виртуальным окружением;
- каналов связи и центров анализа информации, организующих передачу и предиктивную обработку данных в обоих направлениях: измерения от системы мониторинга, установленной на эксплуатируемом изделии, — к виртуальному объекту, управляющие команды/сигналы/предупреждения, полученные в виртуальном пространстве, — к физическому.

Основное отличие цифрового двойника от цифровой тени связано с наличием полноценного виртуального объекта, максимально точно описывающего в виртуальном пространстве однозначно связанное с ним изделие из физического пространства. Подход, построенный на основе цифровых двойников, может быть представлен в виде следующего выражения:

$$\begin{cases} \exists m: R \xrightarrow{m} Y \subset V \\ \exists \hat{m}: Y \xrightarrow{\hat{m}} R \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \exists m: \{v \in Y \subset V \mid \exists r \in R, v = m(r)\} \\ \exists \hat{m}: \{r \in R \mid \exists v \in Y, r = \hat{m}(v)\} \end{cases}, \quad (3)$$

где $\hat{m}$ — отображение элементов виртуального пространства в физическое пространство (набор правил, по которым цифровой модели из иерархической последовательности, описывающей конкретное физическое явление, ставится в соответствие физический объект).

Анализируя (3), можно сделать вывод, что в модели цифрового двойника по Гривсу отображениями m и $\hat{m}$ служат двусторонние каналы связи, передающие информацию между физическим и виртуальным объектами. Важно отметить наличие именно двусторонней связи, которая позволяет как изменять цифровые модели на основе измерений, осуществляемых на исследуемом объекте, так и вносить изменения в управление физическим объектом за счет вычислений, произведенных в виртуальном пространстве. С развитием таких технологий, как интернет вещей, искусственный интеллект, облачные вычисления и т. д., сопоставление объектов из двух пространств с помощью отображений m и $\hat{m}$ производится все с большей точностью, т. е. можно сказать, что

$$m^{-1} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \hat{m}, \quad (4)$$

где ε — отклонение между поведением исследуемого объекта и цифровой моделью.

Следует отличать информацию, применяемую для построения цифровой тени, и информацию, передающуюся через каналы связи цифрового двойника. В первом случае происходит сбор информации о состоянии изучаемого объекта с помощью избыточной сети датчиков, которая накапливается в общей системе Big Data. Большая часть этих данных оказывается неинформативной, за счет чего увеличиваются транзакционные издержки, общее время предиктивного анализа, объем пространства, выделяемого для хранения. В случае цифровых двойников сбор информации о состоянии объекта производится с помощью сети датчиков, расположение которых оптимизировано под физический объект на основе цифровой модели. Датчики устанавливаются в критические зоны, позволяющие проводить непрерывную валидацию цифрового изделия, остальная часть необходимой информации извлекается непосредственно из цифрового двойника в виртуальном пространстве, где осуществляются междисциплинарные

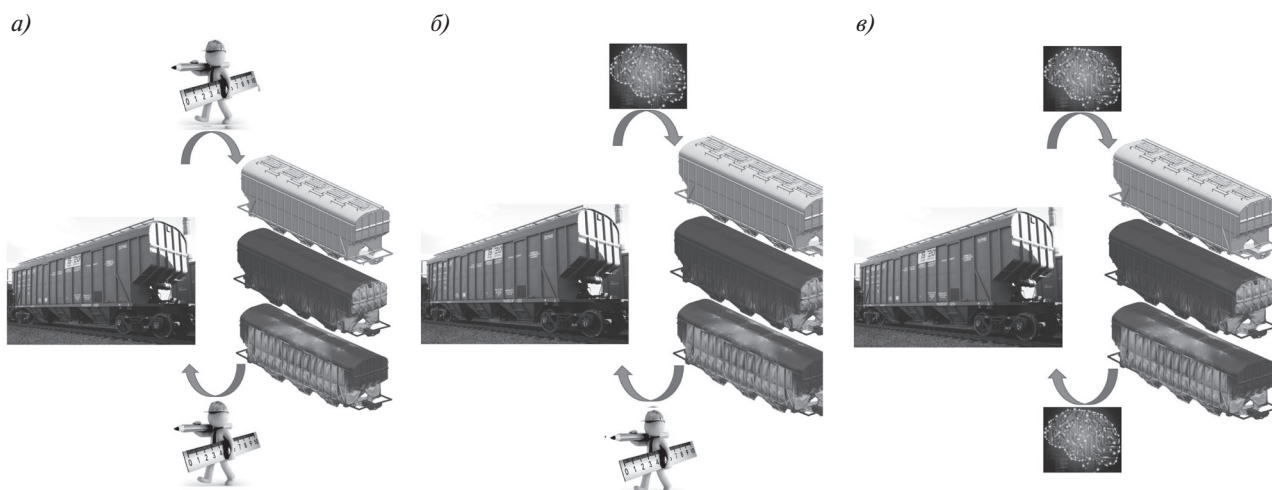


Рис. 1. Различие в подходах к цифровому проектированию:
 а — цифровая модель; б — цифровая тень; в — цифровой двойник

Fig. 1. Difference in approaches to digital design:
 а — digital model; б — digital shadow; в — digital twin

и многомасштабные исследования. За счет этого возникает система содержательных («умных») данных (Smart Big Data), в которых снижен объем неинформативной информации, повышена прозрачность и наглядность процессов генерации и обработки данных [8].

Различие в подходах, основанных на цифровых моделях, цифровых тенях и цифровых двойниках, схематично изображено на рис. 1.

Системы цифровых двойников и их классификация.

В железнодорожном транспорте процессы, связанные с эксплуатацией подвижного состава, зачастую носят случайный характер. Это связано не только с большим разбросом реализуемых значений эксплуатационных воздействий, но и с тем, что реальный подвижной состав используется в условиях, когда он окружен физическими объектами, свойства которых могут сильно меняться в течение времени. Например, сверхнормативные случайные воздействия могут реализовываться в ходе разгрузки грейфером, или в процессе движения по одному и тому же участку пути может изменяться несущая способность насыпи, а это, в свою очередь, будет влиять на «динамические качества» подвижного состава, или в процессе эксплуатации могут меняться характеристики пружин, установленных в тележке и т. д. Это говорит о том, что часто могут возникать ситуации, которые не реализовывались на физическом объекте в прошлом. В связи с этим можно сделать вывод, что применение систем, основанных на методологии цифровых двойников, в железнодорожном транспорте более эффективно, чем систем, построенных на основе цифровых теней, так как применение обратной связи, реализованной

в рамках цифрового двойника, которая подразумевает отправку управляющих сигналов на вагон, может позволить избежать многих аварийных ситуаций конкретной эксплуатируемой единицы, связанных с изломом как элементов тележки, так и несущих элементов кузова.

Понятие «цифровой двойник» не имеет четкого сложившегося определения. Этот термин достаточно универсален и применяется не только в промышленности, но и в других сферах деятельности, например: торговле, сельском хозяйстве, городском планировании и т. д. Попробуем дать обобщенное определение: цифровой двойник — это виртуальное адаптивно изменяющееся отображение физического объекта/процесса, которое учитывает функциональные особенности и физические связи всех его составных частей, сопровождает его на всем жизненном цикле (от этапа проектирования до этапа утилизации), позволяет изучать текущее состояние физического объекта/процесса и прогнозировать его изменения в будущем на микро- и макроуровнях с помощью мультифизического, многомасштабного, вероятностного моделирования и на основе собранных в режиме реального времени данных с установленных систем мониторинга, а также за счет обратной связи с физическим объектом/процессом выдавать управляющие воздействия.

В настоящее время существуют различные классификации цифровых двойников, связанные с их конкретной областью применения. В рамках задач железнодорожного транспорта наиболее применимыми являются две системы, представленные на рис. 2.

Первая система была введена Майклом Гривсом [7] и называется агрегатор цифрового двойника. Эта

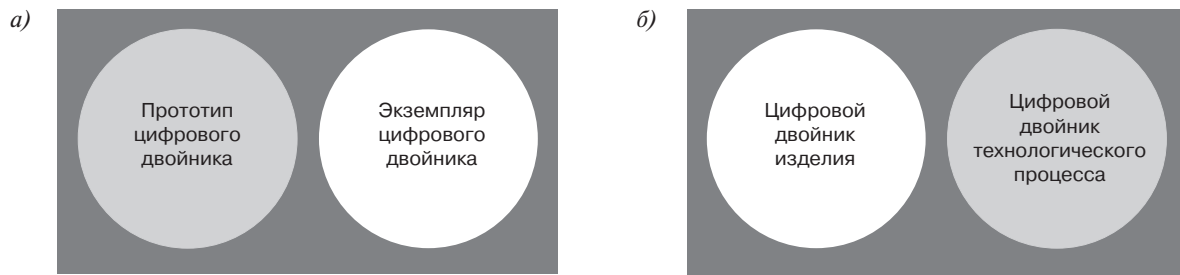


Рис. 2. Системы цифровых двойников:

а — агрегатор цифрового двойника; б — цифровой двойник производственной системы

Fig. 2. Digital twin systems:

а — digital twin aggregator; б — digital twin of the production system

система представляет собой совокупность всей информации, собираемой от всех цифровых двойников конкретных физических объектов, в рамках одного множества, объединенного по некому признаку (модель, модификация, партия и т. д.). Согласно предлагаемой классификации в рамках этой системы выделяются:

- прототип цифрового двойника — описывает прототип физического объекта. Основан на валидированной иерархической последовательности цифровых моделей (валидированной с помощью данных, полученных на ее аналогах), которая позволяет прогнозировать поведение физического объекта в условиях эксплуатации. Содержит все данные, позволяющие приступить к производству изделия;

- экземпляр цифрового двойника — описывает конкретный физический объект, с которым данный экземпляр остается связанным на протяжении всей жизни этого изделия. Содержит все данные, используемые для производства физического объекта, информацию, поступающую от систем мониторинга, установленных на конкретном исследуемом объекте, и всю историю его эксплуатации с учетом истории замены различных узлов и агрегатов.

Вторая система возникла в рамках производственно-эксплуатационного подхода и называется цифровой двойник производственной системы. Представляет собой цифровую модель всей производственной или эксплуатационной системы (вагоностроительное предприятие, депо, сортировочная станция и т. д.). В рамках этой системы выделяются:

- цифровой двойник изделия — описывает конкретный физический объект, по классификации Гривса является экземпляром цифрового двойника;

- цифровой двойник технологического процесса — соответствует конкретному физическому производственному или эксплуатационному процессу. Благодаря ему можно рассматривать различные сценарии и анализировать успешность их выполнения. Позволяет организации оптимизировать методики

производства и эксплуатации, а значит, снижать время простоя оборудования и стоимость производства/ремонт.

На протяжении жизненного цикла железнодорожного изделия, в частности грузового вагона, могут быть реализованы и успешно использованы обе системы. Первая система будет применяться в ходе проектирования и дальнейшей эксплуатации конкретного физического объекта, вторая — будет помогать в ходе отработки технологических процессов, используемых при производстве и ремонте.

Применение цифровых двойников на железнодорожном транспорте. Цифровой двойник — это динамически изменяющийся виртуальный объект, структура которого представлена на рис. 3. Элементы, находящиеся в темно-сером прямоугольнике, являются неотъемлемыми его частями.

Первым элементом, без которого невозможно построить цифровой двойник, является матрица требований, предъявляемых к разрабатываемому изделию. Она формируется на основе данных, полученных с помощью систем мониторинга, установленных на эксплуатируемые аналоги, накопленного опыта проектирования, технологических ограничений, возникающих при сборке на конкретном заводе-изготовителе и т. д. Общее число ограничений может исчисляться десятком тысяч. Очевидно, что такое количество ограничений, зачастую вступающих в противоречие друг с другом, может быть проанализировано только с помощью математического моделирования.

Следующая группа элементов — иерархическое семейство цифровых моделей, позволяющих проводить исследования на разном уровне детализации с применением междисциплинарного анализа, а также верификация и валидация построенных моделей. Процесс верификации и валидации осуществляется на основе экспериментальных данных и данных, собранных в ходе эксплуатации. Следует отметить, что в ходе решения задачи в рамках определенной физической дисциплины (теплопроводность, статическая



Рис. 3. Алгоритм построения цифрового двойника
Fig. 3. Algorithm for constructing a digital twin

прочность и т. д.) с привлечением конкретного численного инструмента (численный метод, программное обеспечение и т. д.) процесс верификации необходимо провести на начальной стадии разработки цифровой модели и всегда повторять в случае изменения численного инструмента (например, применение новой версии программного обеспечения). Процесс валидации должен осуществляться постоянно на протяжении всего жизненного цикла грузового вагона.

Эффективное применение технологии цифрового двойника возможно только при создании адекватной виртуальной модели окружающего этот физический объект пространства. Например, невозможно прогнозировать поведение конструкции при движении на основе высокоточной модели цифрового двойника физического объекта, не создав виртуальное пространство, в котором будет реализован виртуальный полигон, обеспечивающий возможность математического моделирования движения. В связи с этим необходимо создавать виртуальные стенды и полигоны, на которых можно будет проводить численные испытания. Создание качественного виртуального пространства позволяет резко снизить количество проводимых натурных испытаний, изучить влияние большего числа параметров на эксплуатационные характеристики физического объекта.

Построение цифрового двойника и его корректная эксплуатация не могут осуществляться без постоянного обмена данными с физическим пространством, в котором находится физический объект. Такими обязательными элементами обмена данными являются системы мониторинга, установленные на физическом объекте, позволяющие получать данные с натурных испытаний и из эксплуатации. На схеме эти элементы представлены за границами виртуального пространства (см. рис. 3).

Внедрение цифровых двойников в железнодорожном транспорте, в частности грузовом подвижном составе, позволит получить разные технические и экономические эффекты, а именно:

- правильно назначенные срок службы и сроки межремонтного пробега;
- повышение эффективности эксплуатации изделий;
- сбор информации о реальной нагруженности;
- предотвращение возникновения аварийных ситуаций и т. д.

Например, построение цифрового двойника, объединяющего в себе цифровые модели верхнего строения участков пути и грузового вагона, позволит реализовать виртуальный полигон, который может заменить дорогостоящие и достаточно продолжительные поездные испытания.

Получение вышеприведенных эффектов может быть реализовано с помощью планомерного внедрения систем мониторинга и обработки данных, полученных от этих систем, в рамках разработки новых или модернизации старых грузовых вагонов. На этом пути могут возникать разные технические сложности. Например, одной из больших задач, которую надо будет решить, является задача обеспечения электрического питания элементов системы мониторинга, установленной на грузовом вагоне. Технически она может быть решена двумя способами: с помощью генератора или аккумуляторных батарей. Оба эти способа в настоящее время уже реализованы в некоторых пилотных системах, разработанных для грузовых вагонов.

Создание и применение цифровых двойников согласуется с целями, задачами и планом мероприятий Стратегии развития транспортного машиностроения РФ на период до 2030 г. (далее – Стратегия) (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 августа 2017 г. № 1756-р). В Стратегии выделены три приоритетных направления развития отрасли транспортного машиностроения:

- развитие высокоскоростного движения;
- развитие тяжеловесного движения;
- внедрение интеллектуальных систем при эксплуатации грузового подвижного состава («умный вагон»).

Одним из пилотных проектов, в рамках которого можно применить новые виртуальные подходы, является разработка скоростного вагона-платформы с эксплуатационной скоростью 160 км/ч. Выбор именно этого типа грузового вагона связан с результатами исследований Института проблем естественных монополий, которые демонстрируют, что по итогам шести месяцев 2019 г. объем производства фитинговых вагонов-платформ превысил 5 тыс. ед., в то время как за аналогичный период 2018 г. их было произведено 3,9 тыс. [9]. Столь существенному росту объемов способствует значительное увеличение контейнерных грузоперевозок. В первом полугодии во всех видах сообщения было перевезено 2,38 млн контейнеров ДФЭ, что на 14,7% выше показаний за аналогичный период прошлого года. При этом отправки в контейнерах увеличиваются не первый год. В 2018 г. рост составил 14,3%, в 2017 г. — 18,9%.

Решение многих технических проблем, ожидаемых в ходе реализации этого проекта, может быть значительно упрощено с помощью внедрения цифровых двойников на ранних стадиях проектирования скоростного вагона-платформы. Например, имеющиеся тормозные системы, устанавливаемые на грузовых вагонах, обладают недостаточными характеристиками для обеспечения торможения со скоростью 160 км/ч в груженом и порожнем режимах.

Для обеспечения допускаемой скорости движения 160 км/ч необходимо уменьшить время подготовки тормозов к действию, на порожнем режиме не допустить возникновения юза при повышенном тормозном нажатии. Эти задачи решает электронный пневматический тормоз (ЭПТ), который представляет собой пневматическую тормозную систему вагона с интегрированными электронными датчиками (клапанами), управляемыми по определенным алгоритмам. Технические требования, предъявляемые к системе ЭПТ, должны полностью соответствовать техническим требованиям, предъявляемым к обычной пневматической тормозной системе вагона (требования климатического исполнения, материалы, прочность и т. д.). Разработка и дальнейшая эксплуатация такой тормозной системы была бы облегчена в случае создания ее цифрового двойника.

Перевозка дорогостоящих деликатных грузов требует дополнительного контроля, для обеспечения которого разрабатываются различные системы мониторинга, включающие в себя:

- GPS — отслеживание доставки груза в реальном времени (эффект для перевозчика);
- контроль сохранности запорных устройств контейнера/сменного кузова (эффект для перевозчика);
- контроль ускорений, действующих на контейнер/сменный кузов (эффект для перевозчика): воздействие на груз ударов, толчков, ускорений выше нормативного уровня;
- дополнительный контроль показателей безопасности движения вагона при повышенных скоростях (эффект для РЖД): сход с рельсов с последующим движением по шпалам, колебания виляния кузова или извилистого движения колесных пар, резонансные колебания подвешивания.

Однако внедрение таких систем без параллельной реализации цифрового двойника всего скоростного вагона-платформы приведет к развитию устаревшей технологии цифровой тени со всеми перечисленными ранее проблемами.

Заключение. Создание востребованной конкурентоспособной продукции в грузовом вагоностроении возможно только при наличии существенных экономических показателей, которые смогут подтолкнуть собственника к замене имеющегося у него подвижного состава на новый. Эти показатели могут быть связаны с сервисами, которые позволят снизить затраты на ремонт, или технологиями перевозки, способствующими повышению уровня контроля за движением и безопасностью груза.

Внедрение в жизненный цикл грузового вагона технологии цифровых двойников позволит повысить экономическую эффективность на всем его протяжении, по оценкам экспертов —

в некоторых случаях в 10 раз и более. Это может быть достигнуто за счет того, что уже на этапе проектирования учитываются различные особенности технологии производства, опыт использования аналогов на сети железных дорог, а на этапе эксплуатации за счет постоянного обмена данными между цифровой моделью и реальным грузовым вагоном можно обеспечить повышенный контроль за реализуемыми внешними воздействиями на конструкцию и благодаря этому снизить число текущих ремонтов.

Исследования компании MarketsandMarkets показывают, что рынок, основанный на технологиях цифровых двойников, должен вырасти более чем в девять раз к 2025 г. Такой рост обусловлен быстро развивающимися возможностями многоуровневого и междисциплинарного моделирования физических процессов и увеличением скорости взаимодействия с датчиками, установленными на физическом объекте. По оценкам аналитиков, уже в ближайшее время 30% компаний, входящих в список Forbes Global 2000, внедрят технологию цифровых двойников. Это говорит о том, что вагоностроительной отрасли, чтобы не потерять свои конкурентные преимущества перед другими видами транспорта, следует развиваться в сторону внедрения элементов четвертой промышленной революции, в том числе и цифровых двойников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большая российская энциклопедия: [в 35 т.]. Т. 27 / гл. ред. Ю. С. Осипов. М.: Большая российская энциклопедия, 2015. С. 585–586.

2. Sanfelice R. G. Analysis and Design of Cyber-Physical Systems. A Hybrid Control Systems Approach // Cyber-Physical Systems: From Theory to Practice / D. Rawat, J. Rodrigues, I. Stojmenovic (Eds.). Boca Raton, Florida: CRC Press, 2016.

3. Outcomes enabled by digital twins [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin> (дата обращения: 07.12.2020 г.).

4. Finite-Element Modeling and Thermal Analysis of the RT-70 Radio Telescope Main Reflector / A. I. Borovkov [et al.] // Proceedings IVth Int. conf. “Antenna Theory and Techniques” (Sevastopol, 9–12 September 2003). New York: IEEE, 2003. P. 651–654.

5. Орлова А. М. Иерархически-итерационный метод выбора параметров силовых характеристик и конструктивных решений подвешивания тележек грузовых вагонов // Транспорт Урала. 2008. № 2 (17). С. 35–42.

6. Gantz J., Reinsel D. The digital universe in 2020: Big data, bigger digital shadows, and biggest growth in the far east. [S. l.]: IDC Analyze the Future, 2013. P. 1–16.

7. Grieves M. Virtually Intelligent Product Systems. Digital and Physical Twins, in Complex Systems Engineering: Theory and Practice / S. Flumerfelt [et al.] (Eds.). New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019. P. 175–200.

8. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности. Экспертно-аналитический доклад [Электронный ресурс] // Инфраструктурный центр «Технет» НТИ. М., 2019. URL: <https://technet-nti.ru/article/ekspertno-analiticheskij-doklad-cifrovye-dvojniki-v-vysokotekhnologichnoj-promyshlennosti> (дата обращения: 07.12.2020 г.).

9. Грузовые вагоны на пике спроса [Электронный ресурс] // Институт проблем естественных монополий (ИПЕМ): [сайт]. URL: <http://ipem.ru/news/publications/1845.html> (дата обращения: 07.12.2020 г.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

ШЕВЧЕНКО Денис Владимирович,

канд. техн. наук, директор научно-исследовательской дирекции, ООО «ВНИЦТТ»

Статья поступила в редакцию 29.01.2021 г., принята к публикации 02.04.2021 г.

Для цитирования: Шевченко Д. В. Методология построения цифровых двойников на железнодорожном транспорте // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 2. С. 91–99. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99>.

Methodology for constructing digital twins in railway transport

D. V. SHEVCHENKO

Limited Liability Company “All-Union Research Center of Transport Technologies” (LLC “VNICTT”), St. Petersburg, 199106, Russia

Abstract. Fourth industrial revolution covers all areas of human economic activity, including areas related to the design and operation of various products (nuclear power plant building, freight car, MEMS devices, etc.) throughout their entire life cycle. One of the main tools for digital transformation of industry to meet new competitive requirements is the Digital Twin, which is always built for a specific physical object. The introduction of digital twins technology into the life cycle of a freight car will increase economic efficiency throughout its life cycle.

Effective use of the digital twin technology is possible only when an adequate virtual model of the space surrounding this physical object is created. In this regard, predicting the behavior of

a structure during motion on the basis of a high-precision model of a digital twin of a physical object requires the creation of a virtual space in which a virtual operation area will be implemented, which provides the possibility of mathematical modeling of motion. To do this, it is necessary to create virtual stands and operation areas, where it will be possible to carry out numerical tests. Creation of a high-quality virtual space will drastically reduce the number of field tests carried out, and study the effect of a larger number of parameters on the performance characteristics of a physical object.

Creation and use of digital twins is consistent with the goals, objectives and action plan of the Strategy for the development of transport engineering in the Russian Federation for the period up

to 2030. The introduction of digital twins in railway transport, in particular in freight rolling stock, will make it possible to correctly assign the service life, overhaul times, and increase operational efficiency, collect information about the real load, etc. To maintain competitive advantages over other modes of transport, the transport industry needs to develop towards the introduction of elements of the fourth industrial revolution, including digital twins.

Keywords: railway transport; freight car; digital twin; fourth industrial revolution; digital shadow; virtual stands and operation areas; digitalization of processes

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99>

REFERENCES

1. Osipov Yu. S. *Bol'shaya Rossiyskaya Entsiklopediya*: [v 35 t.]. T. 27 [Big Russian Encyclopedia: (in 35 volumes). Vol. 27]. Moscow, Bol'shaya Rossiyskaya Entsiklopediya [Big Russian Encyclopedia] Publ., 2015, pp. 585–586.
2. Sanfelice R. G., Rawat D., Rodrigues J., Stojmenovic I. *Analysis and Design of Cyber-Physical Systems. A Hybrid Control Systems Approach*. Cyber-Physical Systems: From Theory to Practice. Boca Raton, Florida, CRC Press, 2016.
3. *Outcomes enabled by digital twins*. URL: <https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin> (retrieved on 07.12.2020).
4. Borovkov A. I., Shevchenko D. V., Gimmelman V. G., Machuev Yu. I., Gaev A. V. *Finite-Element Modeling and Thermal Analysis of the RT-70 Radio Telescope Main Reflector*. Proceedings IVth Int. conf. "Antenna Theory and Techniques" (Sevastopol, September 9–12, 2003). New York, IEEE, 2003, pp. 651–654.

■ E-mail: dshevchenko@tt-center.ru (D. V. Shevchenko)

5. Orlova A. M. *Ierarkhicheski-iteratsionnyy metod vybora parametrov silovykh kharakteristik i konstruktivnykh resheniy podveshivaniya telezhek gruzovykh vagonov* [Hierarchical-iterative method for choosing parameters of power characteristics and design solutions for suspending freight car bogies]. *Transport of the Urals*, 2008, no. 2 (17), pp. 35–42.

6. Gantz J., Reinsel D. *The digital universe in 2020: Big data, bigger digital shadows, and biggest growth in the far east*. [S. l.], IDC Analyze the Future, 2013, pp. 1–16.

7. Grieves M. *Virtually Intelligent Product Systems. Digital and Physical Twins, in Complex Systems Engineering: Theory and Practice*. New York, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019, pp. 175–200.

8. *Tsifrovye dvoyniki v vysokotekhnologichnoy promyshlennosti. Ekspertno-analiticheskiy doklad* [Digital twins in the high-tech industry. Expert and analytical report]. Infrastrukturnyy tsentr "Tekhneta" NTI. Moscow, 2019. URL: <https://techneta-nti.ru/article/ekspertno-analiticheskiy-doklad-tsifrovye-dvoyniki-v-vysokotekhnologichnoy-promyshlennosti> (retrieved on 07.12.2020) (in Russ.).

9. *Gruzovye vagonny na pike sprosa* [Freight cars at the peak of demand]. Institut problem estestvennykh monopolii (IPEM). URL: <http://ipem.ru/news/publications/1845.html> (retrieved on 07.12.2020) (in Russ.).

ABOUT THE AUTHOR

Denis V. SHEVCHENKO,

Cand. Sci. (Eng.), Director of the Research Directorate, LLC "VNICTT"

Received 29.01.2021

Accepted 02.04.2021

For citation: Shevchenko D. V. Methodology for constructing digital twins in railway transport // VNIIZHT Scientific Journal. 2021. 80 (2): 91–99 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99>.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЕРСИИ СТАТЕЙ ЖУРНАЛА В ОТКРЫТОМ ДОСТУПЕ

На сайте www.elibrary.ru открыт доступ к электронным версиям статей, опубликованных в научно-техническом журнале «Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта».

Для работы с фондами библиотеки пользователю необходимо самостоятельно зарегистрироваться, заполнив регистрационную форму на главной странице eLibrary.ru. Доступ возможен по Вашему логину и паролю с любого компьютера, имеющего выход в интернет.

Материалы журнала, размещенные на сайте Научной электронной библиотеки для свободного использования, допускается использовать, копировать, цитировать исключительно в некоммерческих целях с соблюдением соответствующих положений действующего авторского законодательства (Гражданский кодекс РФ от 18.12.2006 № 230-ФЗ, Часть IV; Глава 70 «Авторское право») с обязательным указанием имени автора/ов произведения и источника заимствования.

На сайте журнала www.journal-vniizht.ru контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Критерии выбора железнодорожных станций для размещения грузовых терминалов по обработке контейнерных поездов «Холодный экспресс»

Д. Ю. РОМЕНСКИЙ¹, К. И. ШВЕДИН², А. М. НАСЫБУЛЛИН¹, М. В. РОМЕНСКАЯ¹

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)), Москва, 127055, Россия

² Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

Аннотация. Описан подход к выбору мест размещения компактных контейнерных площадок на железнодорожных станциях магистральных железнодорожных линий для выполнения грузовых операций с транзитными контейнерными поездами на примере инвестиционного проекта ОАО «РЖД» по организации перевозок поездами «Холодный экспресс». Для обеспечения возможности организации движения грузовых контейнерных поездов с приемом их на станции непосредственно на фронт погрузки-выгрузки должны быть выполнены определенные условия, перечисленные в статье. За основу подхода принят принцип минимизации затрат и сохранения эксплуатационных параметров реконструируемых железнодорожных станций при выполнении принципов логистики контейнерных перевозок. Сделан вывод о том, что эталонной железнодорожной станцией для размещения на ней контейнерного терминала, специализирующегося на обработке транспортных контейнерных поездов (в том числе «Холодных экспрессов»), должна быть станция, имеющая малоиспользуемый электрифицированный приемоотправочный путь длиной не менее 1050 м, на который есть возможность приема и отправления поездов во всех направлениях следования и вблизи которого существует открытая грузовая площадка с твердым покрытием с возможностью подъезда грузовых автомобилей. Также должны обеспечиваться условия беспрепятственной работы погрузочной техники, т. е. не должно быть препятствий в виде пешеходных мостов и опор контактной сети. На пилотном маршруте Владивосток — Москва — Санкт-Петербург было выбрано 18 станций, расположенных в крупных городах или тяготеющих к крупным городам. Проведенный анализ показал, что в реальных условиях отсутствуют станции, полностью удовлетворяющие данным критериям, из чего был сделан вывод о необходимости проведения капиталоемких мероприятий различного объема, связанных с достижением необходимых параметров станций, таких как электрификация или удлинение пути, реконструкция горловин станции, обустройство площадки и автоподъездов, а также другие мероприятия.

Ключевые слова: железнодорожная станция; контейнер; контейнерный терминал; логистика; интермодальность; контейнерные перевозки; перевозка; мультимодальные перевозки

Введение. Технология перевозки крупнотоннажных контейнеров в специализированных поездах «Холодный экспресс» (далее — поезда ХЭ) предполагает ввод в постоянное обращение поездов, загруженных преимущественно продовольственными и

сельскохозяйственными грузами и следующих по заранее сформированному маршруту с промежуточными остановками для выполнения грузовых технологических операций в крупнейших городах [1, 2, 3]. Ввод промежуточных остановок необходим для расширения географического рынка обслуживания одного маршрута поезда по аналогии с вводом промежуточных остановок пассажирским поездам в попутных населенных пунктах. В отличие от прямого ускоренного контейнерного поезда, поезд, следующий с остановками, может обеспечить высокую регулярность перевозок для большого числа терминалов на маршруте.

В соответствии с разработанной и утвержденной для инфраструктуры ОАО «РЖД» технологией перевозок [4] поезда ХЭ должны останавливаться на попутных станциях выполнения грузовых операций с такими поездами. Попутная станция — это железнодорожная станция, открытая для выполнения грузовых операций с крупнотоннажными контейнерами, на которой имеются соответствующие сооружения, устройства и технические средства для выполнения погрузочных и выгрузочных операций с транзитными поездами, в том числе поездами ХЭ. В условиях существующей железнодорожной сети попутными станциями могут стать станции любого типа и класса.

Новый вид логистического сервиса ориентирован главным образом на перевозку железнодорожным транспортом грузов, требующих температурного контроля, таких как продукты питания, сельскохозяйственное сырье, полуфабрикаты и особо ценные грузы. Под данные виды грузов предполагается задействование парка рефрижераторных контейнеров с необходимостью электрического подключения, т. е. с необходимостью включения в состав поезда дизель-генераторных установок. Однако по мере развития перевозок не исключается также возможность постановки в подобные поезда контейнеров с остальными видами грузов уже без необходимости электрического питания.

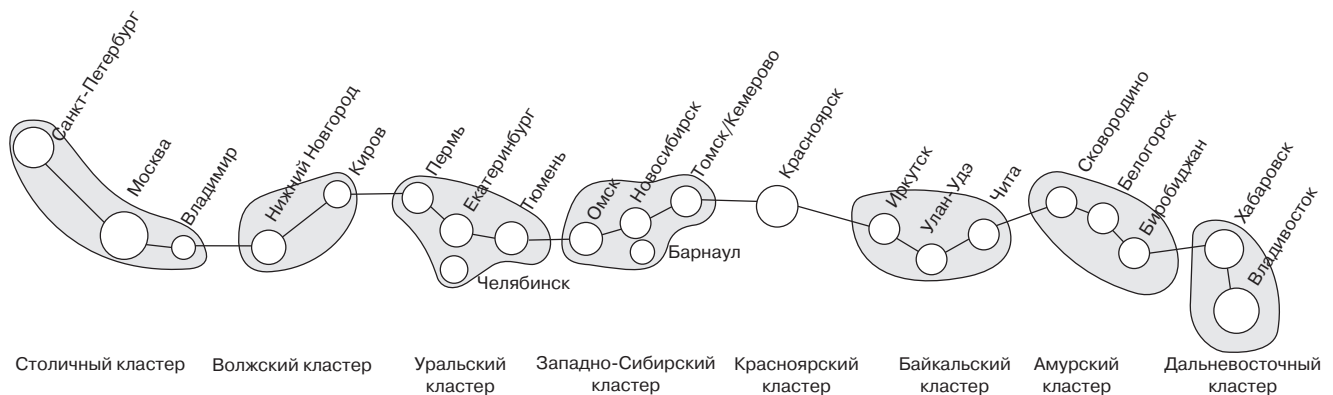


Рис. 1. Схема маршрута поездов ХЭ
Fig. 1. Scheme of the route of the “Cold Express” trains

В период 2018–2020 гг. был проанализирован маршрут для реализации инвестиционного проекта по обустройству контейнерных площадок для поездов ХЭ. Пилотным маршрутом выбрана главная транспортная артерия сети российских железных дорог — коридор Владивосток—Москва с перспективой продления до Санкт-Петербурга. На 18 остановках по маршруту поезда предполагается выполнение грузовых операций с грузеными и порожними контейнерами в таких городах, как Хабаровск, Биробиджан, Белогорск, Сковородино, Чита, Улан-Удэ, Иркутск, Красноярск, Анжеро-Судженск, Новосибирск, Омск, Тюмень, Екатеринбург, Пермь, Киров, Нижний Новгород и Владимир (рис. 1) [5, 6, 7]. Во время остановок предполагается выгрузка с поезда контейнеров, следующих в соответствующие регионы тяготения, а также погрузка контейнеров, следующих из этих регионов в любые другие пункты на маршруте следования поезда, в том числе в мультимодальном сообщении. Стоит отметить, что на загрузку подобного рода поездов положительно сказывается необходимость перевозки порожних контейнеров от мест выгрузки к местам погрузки.

Результаты анализа позволяют сделать вывод о том, что основой перевозок поездами ХЭ должны стать существующие в настоящее время объемы перевозок в рефрижераторных вагонах и контейнерах на сверхдальние расстояния. По мере развития сервиса будет расти доля перевозок на малые расстояния, а также увеличится доля грузов, привлеченных с автомобильного транспорта в дополнение к индуцированному грузопотоку. Расчетная модель перевозок предусматривает долю новых, привлеченных грузов в размере 60 % от общего грузопотока на горизонте планирования в 10 лет. На рис. 1 приведена группировка регионов проследования поездов ХЭ в восьми макрорегионах (кластерах), объединенных по схожести принципов генерации и потребления скоропортящихся грузов. Перевозки между терминалами внутри

кластеров ожидаются незначительными, и основной грузопоток будет формироваться в сообщении между кластерами. Для данных перевозок был составлен прогноз грузопотоков.

Величина грузопотока скоропортящихся грузов на рассматриваемом полигоне Владивосток—Москва—Санкт-Петербург складывается из грузопотоков, перевозимых в обоих направлениях движения поезда (табл. 1 и 2). В связи с этим доходная часть перевозок формируется из корреспонденций как в восточном, так и в западном направлениях. Эти корреспонденции складываются из трех ключевых видов грузопотоков: перевозки дальневосточной рыбы, перевозки продуктов питания, напитков и сельхозпродукции из регионов-производителей в регионы-потребители, а также товаров из экспортно-импортных грузопотоков через сухопутные и морские пограничные переходы.

Так как прогнозируемые объемы перевозок планируется обслуживать сквозными поездами, следующими с остановкой, то один и тот же поезд будет обслуживать все приведенные корреспонденции. Это позволит уменьшить порожние пробеги подвижного состава и обеспечить перевозку меньшими объемами поездов. Исходя из прогнозируемых цифр и планируемой этапности обустройства попутных станций оптимальным будет запуск поездов в круглогодичное обращение на регулярной основе с частотой отправления от двух раз в неделю в первые два года и до семи раз в неделю к моменту ввода в строй всех терминалов на попутных станциях (табл. 3).

Начальные и конечные станции маршрута следования поездов ХЭ не имеют особых требований к своей работе и техническому оснащению. Так как процесс формирования и расформирования поезда ХЭ не отличается от работы с другими контейнерными (рефконтейнерными) поездами, то в качестве начальной и конечной станции может быть выбрана любая станция, к которой примыкает путь необщего

Таблица 1

Прогноз объемов перевозок поездами ХЭ в направлении Восток—Запад

Table 1

Forecast of the traffic volume by “Cold Express” trains in the East—West direction

№ п/п	Направление	Пункты отправления	Пункты прибытия	Виды грузов	Объемы перевозок, тыс.т/год							
					Текущие всеми видами отправок	На расчетные годы поездами ХЭ						
						1-й год	2-й год	3-й год	4-й год	5-й год	6-й год	7-й год и далее
1	Приморье—Центр	Владивосток	Владимир, Москва, Санкт-Петербург	Рыба, импорт фруктов	343	120	150	180	205	235	250	255
2	Приморье—Урал Приморье—Поволжье	Владивосток	Тюмень, Екатеринбург, Пермь, Киров, Нижний Новгород	Рыба, импорт фруктов	144	50	60	75	78	83	87	96
3	Приморье—Сибирь	Владивосток	Красноярск, Томск, Кемерово, Новосибирск, Омск	Рыба, импорт фруктов	76	30	48	55	64	75	80	85
4	Приморье—Забайкалье	Владивосток	Иркутск, Улан-Удэ, Чита, Сковородино (Якутск), Белогорск	Рыба, импорт фруктов	90	20	35	55	85	105	118	125
5	Китай—Центр	Улан-Удэ, Чита	Владимир, Москва, Санкт-Петербург	Импорт фруктов	10,7	15	25	37	46	55	65	70
6	Китай—Урал, Китай—Поволжье	Улан-Удэ, Чита	Тюмень, Екатеринбург, Пермь, Киров, Нижний Новгород	Импорт фруктов	0,7	9	18	29	41	50	60	65
7	Китай—Сибирь	Улан-Удэ, Чита	Красноярск, Томск, Кемерово, Новосибирск, Омск	Импорт фруктов	0,2	12	20	35	46	65	70	75
8	Сибирь—Центр	Красноярск, Томск, Кемерово, Новосибирск, Омск	Владимир, Москва, Санкт-Петербург	Продукты питания, напитки, сельхозпродукция	10	15	25	35	48	63	68	75
9	Сибирь—Поволжье, Сибирь—Урал	Красноярск, Томск, Кемерово, Новосибирск, Омск	Тюмень, Екатеринбург, Пермь, Киров, Нижний Новгород	Продукты питания, напитки, сельхозпродукция	58	5	10	13	20	25	30	35
10	Урал—Центр, Урал—Поволжье	Тюмень, Екатеринбург, Пермь	Владимир, Москва, Санкт-Петербург, Нижний Новгород	Продукты питания, напитки, сельхозпродукция	0	15	35	60	82	100	115	125
Итого					733	291	426	574	715	856	943	1006

пользования с контейнерным терминалом, имеющим соответствующее оснащение, или станция, на которой расположены места общего пользования, также имеющие соответствующее оснащение для работы с крупнотоннажными контейнерами.

При проектировании новых высокопроизводительных специализированных грузовых станций

наиболее рационально планировать их путевое развитие по сквозному типу, что позволяет принимать и отправлять составы поездным порядком, т. е. при следовании по поездным сигналам на перегонах в пределах станции, без смены кабины управления, перецепки локомотива и дополнительных передвижений в пределах станций. Данное решение более

Таблица 2

Прогноз объемов перевозок поездами ХЭ в направлении Запад—Восток

Table 2

Forecast of the traffic volume by “Cold Express” trains in the West—East direction

№ п/п	Направление	Пункты отправления	Пункты прибытия	Виды грузов	Объемы перевозок, тыс. т/год							
					Текущие всеми видами отправок	На расчетные годы поездами ХЭ						
						1-й год	2-й год	3-й год	4-й год	5-й год	6-й год	7-й год и далее
1	Балтия—Сибирь	Санкт-Петербург	Омск, Новосибирск, Томск, Кемерово, Красноярск	Импорт фруктов, продукты питания, напитки	131	47	60	65	72	80	86	90
2	Балтия—Урал	Санкт-Петербург	Киров, Пермь, Екатеринбург, Тюмень	Импорт фруктов, продукты питания, напитки	67	48	70	93	113	127	146	150
3	Центр—Урал	Москва, Владимир, Нижний Новгород	Киров, Пермь, Екатеринбург, Тюмень	Продукты питания, напитки	134	5	10	26	44	58	72	75
4	Центр—Сибирь	Москва, Владимир, Нижний Новгород	Омск, Новосибирск, Томск, Кемерово, Красноярск	Продукты питания, напитки	167	28	35	46	57	73	81	85
5	Центр—Забайкалье (в том числе Китай)	Санкт-Петербург, Москва, Владимир, Нижний Новгород	Иркутск, Улан-Удэ, Чита, Сковородино	Продукты питания, напитки, экспорт продуктов, отечественные овощи и фрукты	136	34	42	58	70	82	87	90
6	Центр—Приморье	Санкт-Петербург, Москва, Владимир, Нижний Новгород	Биробиджан, Хабаровск, Владивосток	Продукты питания, напитки, экспорт продуктов, отечественные овощи и фрукты	378	38	55	67	76	90	96	100
7	Урал—Сибирь	Киров, Пермь, Екатеринбург, Тюмень	Омск, Новосибирск, Томск, Кемерово, Красноярск	Продукты питания, напитки, отечественные овощи и фрукты	30	10	20	38	55	73	82	85
8	Урал—Забайкалье (в том числе Китай)	Киров, Пермь, Екатеринбург, Тюмень	Иркутск, Улан-Удэ, Чита, Сковородино	Продукты питания, напитки, экспорт продуктов, отечественные овощи и фрукты	46	12	25	36	48	58	62	65
9	Урал—Приморье	Киров, Пермь, Екатеринбург, Тюмень	Биробиджан, Хабаровск, Владивосток	Продукты питания, напитки, экспорт продуктов, отечественные овощи и фрукты	22	15	20	26	33	37	42	45
10	Сибирь—Забайкалье	Омск, Новосибирск, Томск, Кемерово, Красноярск	Иркутск, Улан-Удэ, Чита, Сковородино	Продукты питания, напитки, экспорт продуктов, отечественные овощи и фрукты	291	25	38	50	65	77	87	90
11	Сибирь—Приморье	Омск, Новосибирск, Томск, Кемерово, Красноярск	Биробиджан, Хабаровск, Владивосток	Продукты питания, напитки, экспорт продуктов, отечественные овощи и фрукты	164	25	45	62	76	95	115	120
Итого					1566	287	420	567	709	850	956	995

капиталоемкое и требует наличия свободной для застройки площадки большего размера, но позволяет минимизировать эксплуатационные затраты, связанные с движением составов маневровым порядком, т. е. при организации движения на путях по маневровым сигналам в пределах станции, а также повышает производительность самой станции.

Специализированные контейнерные площадки на попутных станциях должны быть определенным образом скомпонованы с целью обеспечения приема и отправления составов поездным порядком. Учитывая относительно невысокие объемы перевозок, строительство терминалов на новых площадках за пределами существующих станций экономически

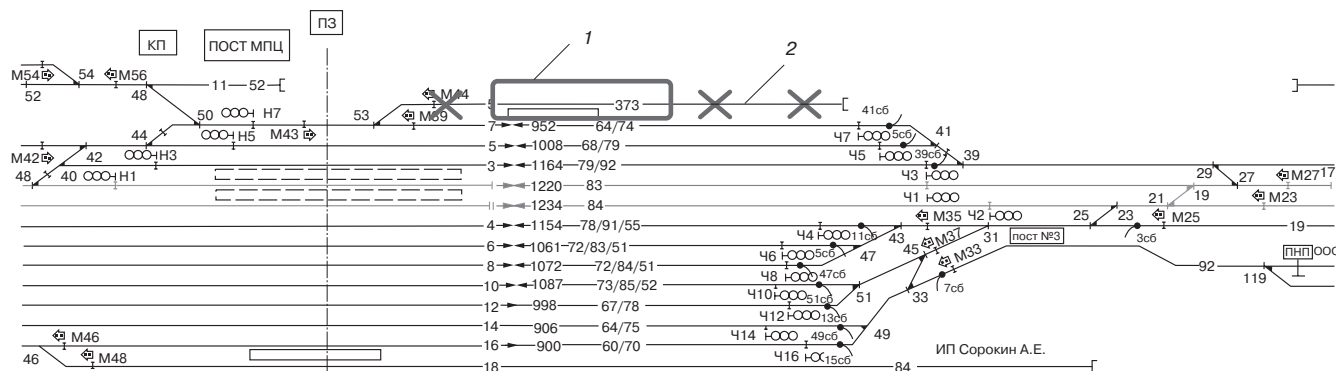


Рис. 2. Фрагмент схемы путевого развития грузовой станции Кадала с расположенной на ней контейнерной площадкой:

1 — контейнерная площадка; 2 — разбираемый тупиковый путь, мешающий подъезду автотранспорта

Fig. 2. Fragment of the track layout scheme of the Kadala freight station with a container platform located on it:

1 — container site; 2 — disassembled dead-end track that interferes with the access of vehicles

нецелесообразно. Возможность окупаемости [3] появляется при задействовании существующих путей на станциях или контейнерных терминалов. Можно предложить два основных варианта обустройства попутных станций для поездов ХЭ:

1) обустройство компактных площадок длиной 300 м вдоль крайних приемоотправочных путей грузовых или технических станций;

2) обустройство новых или реконструкция существующих грузовых фронтов на контейнерных терминалах при условии обеспечения возможности приема и отправления поездов, ведомых электровозами.

Таблица 3

График наращивания частоты отправления
с вводом новых терминалов на попутных станциях

Table 3

Schedule for increasing the frequency of departure with the introduction of new terminals at passing stations		
Расчет- ный год	Частота отпра- влений в неделю	Вводимые в строй площадки на попутных станциях
1-й год	0	—
2-й год	Пилотные отправки	Благовещенск, Белогорск, Чита
3-й год	Пилотные отправки	Нижний Новгород, Пермь, Тюмень, Омск, Новосибирск, Красноярск, Иркутск, Чита, Сковородино/Якутск, Белогорск/Благовещенск, Москва, Екатеринбург, Улан-Удэ, Хабаровск
4-й год	2	Киров, Анжеро-Судженск/ Томск/Кемерово, Биробиджан
5-й год	3	—
6-й год	4	Владимир
7-й год	5	—
8-й год и далее	6	—

Попутная станция должна быть расположена по маршруту следования поезда вблизи крупного города и технической станции. Для минимизации объема потребных инвестиций на организацию работы с контейнерами рассматриваются следующие параметры станций в соответствующих транспортных узлах:

- конфигурация путевого развития станции, в том числе наличие возможности приема и отправления полносоставных поездов на боковой путь со всех направлений (подходов), по которым предполагается обращение поездов ХЭ;
- степень загруженности станции и ее крайних путей;
- полезная длина крайних путей;
- наличие ровной площадки вдоль крайних путей или неиспользуемой грузовой площадки;
- наличие/отсутствие опор контактной сети, стоящих с внешней стороны от крайнего пути, и тип контактной подвески;
- наличие электрификации на крайних путях;
- наличие пешеходных мостов, пассажирских обустройств и прочих капитальных сооружений в полосе отвода железной дороги около крайних путей;
- удаленность от основных транспортных узлов и крупнейших населенных пунктов или промышленных зон.

Например, на Забайкальской железной дороге определены для снабжения продуктами питания таких городов, как Чита и Благовещенск, станции Кадала (20 км от Читы) и Украина (141 км от Благовещенска, 10 км от Белогорска и 109 км от Свободного) соответственно, расположенные на главном ходу Транссибирской магистрали в благоприятных с точки зрения топологии местности условиях, где есть возможность устройства с минимальными затратами погрузочно-выгрузочной площадки и подъезда авто-

Таблица 4

Сравнение попутных станций для обустройства на них контейнерных терминалов (фрагмент)

Table 4

Comparison of passing stations for the arrangement of container terminals on them (fragment)

№ п/п	Город	На-селение агломе-рации, тыс. чел.	Станция	Располо-жение бокового пути отно-сительно станции	Длина пути	Ровная площад-ка	Наличие кон-такт-ной сети	Наличие опор кон-тактной сети в месте вы-полнения предпо-лагаемых грузовых операций	Пеше-ходный мост	Наличие работаю-щих рич-стакеров или кранов и возмоз-ность их подъезда	На-личие возмоз-ности приема поезда с пере-гона с обоих направ-лений	Приме-чание	Этап		
													1 (пу-ско-вой)	2 (раз-витие)	Пер-спек-тива
1	Владивосток	800	Угольная	Существующий контейнерный терминал									Да	Да	Да
			Уссурийск	20 км от Уссурийска, строительство по титулу нового транспортно-логистического центра											
2	Хабаровск	618	Корфов-ский	Восточ-нее	1250	Нет	Да	Да	Нет	Нет	Да	25 км от Хабаров-ска	Да	Да	Да
			Хаба-ровск II	Западнее	820	Да	Да	Да	Нет	Да	Да				
3	Биробиджан	73	Биробид-жан I	Нет возможности разместить контейнерный терминал											Да
			Икура	Южнее	820	Да	Да	Да	Нет	Нет	Да	20 км до Биробид-жана			
4	Благове-щенск/Белогорск	225	Возжаевка	Южнее	820	Да	Да	Да	Нет	Нет	Да	146 км до Благове-щенска	Да	Да	Да
			Украина	Западнее	1050	Да	Да	Да	Нет	Нет	Да	146 км до Благове-щенска			
5	Сковородино	9+до-ставка в Якутск	Сковоро-дино	Севернее	1050	Да	Да	Да	Нет	Нет	Да	Исполь-зование инфра-структу-ры базы путевой машин-ной станции		Да	Да
			Бамовская	Севернее	950	Да	Да	Да	Нет	Нет	Да				

транспорта. На станции Кадала для работы определен электрифицированный путь № 7 (рис. 2), на станции Украина — путь № 9.

При использовании существующего терминала или при его реконструкции выбираются грузовые станции, обеспечивающие следующие условия:

- возможность прибытия и отправления поездным порядком контейнерного поезда с двух основных подходов под магистральным электровозом без смены направления движения и непосредственно с перегона;
- наличие электрической изоляции рельсовых цепей соответствующего пути для обеспечения безопасности движения и безопасности труда при выполнении грузовых операций;

- возможность обеспечения остановки контейнерного поезда в пределах полезной длины одного или нескольких последовательно расположенных путей без создания помех другим технологическим операциям, выполняемым на станции;

- обслуживание максимально полной длины состава при использовании существующих открытых площадок с твердым покрытием;

- возможность подъезда к поезду контейнерного погрузчика, применяемого на соответствующем терминале [8, 9, 10];

- возможность подъезда большегрузных автомобилей с полуприцепами к грузовой площадке для выполнения прямой перевалки.

Эталонной станцией для обустройства контейнерного терминала, специализирующегося на обработке транзитных поездов (в том числе поездов ХЭ), должна стать станция с малозагруженным (недоиспользуемым) электрифицированным приемоотправочным путем длиной не менее 71 условного вагона, к которому примыкает автомобильный подъезд, обеспечивающий кратчайший маршрут до мест потребления грузов. Для пилотного маршрута был проведен анализ всех агломераций и транспортных узлов по маршруту следования поездов. Для всех 18 остановочных пунктов были выбраны наиболее оптимальные попутные станции, для которых проведена оценка потребных инвестиционных затрат. В табл. 4 приведен фрагмент сравнения таких станций в крупных агломерациях на маршруте от Владивостока до Санкт-Петербурга. Выбранные станции выделены полужирным шрифтом.

Заключение. Результаты проведенной работы по выбору станций для обустройства на них терминалов по обработке транзитных контейнерных поездов показали, что:

- отсутствуют станции, идеально подходящие для обустройства на них попутных терминалов;
- каждая из станций на маршруте требует различного объема переустройства от электрификации, удлинения пути или переукладки стрелочных переводов более пологих марок крестовины до полноценного строительства терминала с новым приемоотправочным путем за пределами границ станции;
- обустройство компактных площадок оправданно при небольших объемах грузовой работы, эквивалентных примерно 1–2 парам поездов в сутки;
- при необходимости обслуживания большого числа транзитных контейнерных поездов приоритет стоит отдавать новому строительству специализированных высокопроизводительных терминалов, обеспечивающих поточность выполнения основных технологических операций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скачков А.А., Мехедов М.И., Петров В.В. Перевозка скоропортящихся грузов по технологии «Холодный экспресс» // Железнодорожный транспорт. 2018. № 9. С. 51–54.
2. Технология «Холодный экспресс» — основа будущих технологий перевозочного процесса / С.П. Вакуленко [и др.] // Логистический аудит транспорта и цепей поставок: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. (Тюмень, 28 апреля 2020 г.). Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2020. С. 44–49.

3. Экономические параметры перевозок поездами «Холодный экспресс» на примере маршрута Владивосток—Москва—Санкт-Петербург / С.П. Вакуленко [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 6. С. 319–326. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-319-326>.

4. Типовая технология перевозки грузов поездами «Холодный экспресс»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 5 марта 2020 г. № 493/р. Екатеринбург: УралЮрИздат, 2020. 24 с.

5. Мамонтов И.Ю. Совершенствование организации перевозок грузов в контейнерах с применением опорной сети контейнерных накопительно-распределительных центров: дис. ...канд. техн. наук: 05.22.08. М., 2013. 187 с.

6. Кипарисов П.О. Разработка критериев оценки для оптимального размещения логистических центров в России // Актуальные вопросы экономики и социологии: материалы XII осенней конф. (Новосибирск, 10–13 октября 2016 г.) / Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН. Новосибирск, 2016. С. 231–237.

7. Елисеев С.Ю., Волкова С.Г. Оптимальное размещение грузовых терминалов в системе организации транспортных грузопотоков // Наука и техника транспорта. 2015. № 3. С. 39–47.

8. Вакуленко С.П., Насыбуллин А.М. Техничко-технологические решения для погрузо-выгрузочных работ с грузовыми поездами на электрифицированном пути логистического терминала // Т-Comm: телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 4. С. 66–72.

9. Насыбуллин А.М., Айсина Л.Р., Роменский Д.Ю. Сравнение сфер применения инновационных технических решений для погрузочно-выгрузочных работ на контейнерных терминалах // Вестник транспорта Поволжья. 2020. № 5 (83). С. 40–51.

10. Логистика перевозок крупнотоннажных контейнеров в универсальном и специализированном подвижном составе / С.П. Вакуленко [и др.] // Логистика. 2020. № 7 (164). С. 14–17.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

РОМЕНСКИЙ Дмитрий Юрьевич,
старший преподаватель, кафедра «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы», ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)

ШВЕДИН Константин Иванович,
заместитель начальника отдела научного центра «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения» (НЦ «ЦМПЭ»), АО «ВНИИЖТ»

НАСЫБУЛЛИН Айрат Марсович,
старший преподаватель, кафедра «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы», ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)

РОМЕНСКАЯ Мария Владимировна,
ассистент, кафедра «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы», ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)

Статья поступила в редакцию 02.02.2021 г., принята к публикации 20.02.2021 г.

Для цитирования: Критерии выбора железнодорожных станций для размещения грузовых терминалов по обработке контейнерных поездов «Холодный экспресс» / Д. Ю. Роменский [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 2. С. 100–107. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-100-107>.

Criteria for the selection of railway stations for the placement of freight terminals for handling “Cold Express” container trains

D. Yu. ROMENSKIY¹, K. I. SHVEDIN², A. M. NASYBULLIN¹, M. V. ROMENSKAYA¹

¹Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Russian University of Transport” (FGAOU VO “RUT” (MIIT)), Moscow, 127055, Russia

²Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC “VNIIZHT”), Moscow, 129626, Russia

Abstract. An approach to the selection of locations for compact container sites at railway stations of main railway lines for carrying out freight operations with transit container trains is described on the example of an investment project of the JSC “Russian Railways” for organizing transportation by “Cold Express” trains. To ensure the possibility of organizing the motion of container freight trains with its reception at the station directly to the loading and unloading front, certain conditions listed in the article must be met. The approach is based on the principle of minimizing costs and maintaining the operational parameters of the reconstructed railway stations while implementing the principles of container logistics. It was concluded that the reference railway station for placing on it a container terminal specializing in handling container transport trains (including “Cold Express” trains) should be a station that has a little-used electrified receiving-departure track with a length of at least 1050 m, for which there is the possibility of receiving and departure trains in all directions and near which there is an open freight area with a hard surface with the possibility of approaching trucks. Also, conditions for the unimpeded operation of loading equipment should be ensured, i. e. there should be no obstacles in the form of pedestrian bridges and overhead catenary supports. On the pilot route Vladivostok—Moscow—St. Petersburg, 18 stations were selected, located in large cities or tend towards large cities. The analysis showed that in real conditions there are no stations that fully meet these criteria, from which it was concluded that it was necessary to carry out capital-intensive measures of various volumes associated with the achievement of the necessary parameters of the stations, such as electrification or lengthening of the track, reconstruction of the station necks, arrangement of the site, car entrances, as well as other measures.

Keywords: railway station; container; container terminal; logistics; intermodality; container transport; transportation; multi-modal transportation

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-100-107>

REFERENCES

1. Skachkov A. A., Mekhedov M. I., Petrov V. V. *Transportation of perishable goods using the “Cold Express” technology*. Zheleznodorozhnyy transport, 2018, no. 9, pp. 51–54.
2. Vakulenko S. P., Romenskiy D. Yu., Mekhedov M. I., Gavrilin A. A. *“Cold Express” technology — the basis of future technologies of the transportation process*. Logistic audit of transport and supply chains: materials of the III Int. scientific-practical conf. (Tyumen', April 28, 2020). Tyumen', Tyumen Industrial University Publ., 2020, pp. 44–49.
3. Vakulenko S. P., Romenskiy D. Yu., Mekhedov M. I., Gavrilin A. A., Nasybullin A. M., Solov'ev V. V. *Economic parameters of transportation by “Cold Express” trains on the example of the route Vladivostok—Moscow—St. Petersburg*. VNIIZHT Scientific Journal, 2020, Vol. 79, no. 6, pp. 319–326. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-319-326>.

4. *Typical technology for the freight transportation by “Cold Express” trains*. Approved by order of JSC “Russian Railways” dated March 5, 2020 No. 493/r. Yekaterinburg, UralYurlzdat Publ., 2020, 24 p. (in Russ.).

5. Mamontov I. Yu. *Improving the organization of freight transportation in containers using the backbone network of container storage and distribution centers*. Cand. tech. sci. diss. Moscow, 2013, 187 p.

6. Kiparisov P. O. *Development of evaluation criteria for optimal placement of logistics centers in Russia*. Actual problems of economics and sociology: materials of the XII autumn conf. (Novosibirsk, October 10–13, 2016). Novosibirsk, Institute of Economics and Organization of Industrial Production SB RAS Publ., 2016, pp. 231–237.

7. Eliseev S. Yu., Volkova S. G. *Optimal placement of freight terminals in the system of organizing transport freight flows*. Science and technology in transport, 2015, no. 3, pp. 39–47.

8. Vakulenko S. P., Nasybullin A. M. *Technical and technological solutions for loading and unloading operations with freight trains on the electrified track of the logistics terminal*. T-Comm: telecommunications and transport, 2020, Vol. 14, no. 4, pp. 66–72.

9. Nasybullin A. M., Aysina L. R., Romenskiy D. Yu. *Comparison of the spheres of application of innovative technical solutions for loading and unloading operations at container terminals*. Vestnik transporta Povolzhya, 2020, no. 5 (83), pp. 40–51.

10. Vakulenko S. P., Kurenkov P. V., Romenskiy D. Yu., Kalinin K. A. *Logistics of transportation of large-capacity containers in universal and specialized rolling stock*. Logistika, 2020, no. 7 (164), pp. 14–17.

ABOUT THE AUTHORS

Dmitriy Yu. ROMENSKIY,

Senior Lecturer, Department of Transport Business Management and Intelligent Systems, FGAOU VO “RUT” (MIIT)

Konstantin I. SHVEDIN,

Deputy Head of the Department of the Scientific Center “Digital Transportation Models and Energy Saving Technologies” (NTs “TsMPE”), JSC “VNIIZHT”

Ayrat M. NASYBULLIN,

Senior Lecturer, Department of Transport Business Management and Intelligent Systems, FGAOU VO “RUT” (MIIT)

Mariya V. ROMENSKAYA,

Assistant, Department of Transport Business Management and Intelligent Systems, FGAOU VO “RUT” (MIIT)

Received 02.02.2021

Accepted 20.02.2021

■ E-mail: romenskiy@miit.ru (D. Yu. Romenskiy)

For citation: Romenskiy D. Yu., Shvedin K. I., Nasybullin A. M., Romenskaya M. V. Criteria for the selection of railway stations for the placement of freight terminals for handling “Cold Express” container trains // VNIIZHT Scientific Journal. 2021. 80 (2): 100–107 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-100-107>.

Принципы определения эффективных параметров организации движения поездов в пригородно-городском сообщении с учетом дифференциации классов транспортного обслуживания

А. Ф. БОРОДИН, И. Ф. МУСТАФИН, К. Ю. НИКОЛАЕВ

Акционерное общество «Институт экономики и развития транспорта» (АО «ИЭРТ»), Москва, 105066, Россия

Аннотация. Ввод нового транспортного продукта в городских агломерациях способствует привлечению дополнительного пассажиропотока путем изменения параметров организации движения пригородных поездов. Рассмотрена задача по определению эффективных параметров маршрутной сети пригородно-городского железнодорожного сообщения для достижения приемлемых финансовых результатов владельцев инфраструктуры и перевозчиков. Определены управляемые переменные, характеризующие маршрутную сеть пригородно-городского сообщения и включающие в себя тип графика движения поездов, интервал движения, маршруты следования, размеры движения, станции отправления и прибытия, класс транспортного обслуживания. Определено также, что распределение корреспонденций пассажиропотока по сети транспортных продуктов зависит как от набора управляемых переменных, так и от времени поездки железнодорожным транспортом при использовании транспортного продукта с учетом выполнения терминальных операций в пунктах отправления, назначения, пересадок, ожидания поездов, следования в поездах. Рассмотрена целевая функция для перевозчика и владельца инфраструктуры, которая является идентичной для обоих участников перевозок, при этом составляющие инвестиционных затрат и прямых производственных расходов по перевозочной деятельности и доходных поступлений, обеспечивающих безубыточность данной деятельности, различны для каждого участника транспортного обслуживания. Определены соответствующие ограничения для поставленной задачи, обусловленные ресурсами железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава. Разработаны принципы решения этой многокритериальной задачи путем отыскания группы лучших вариантов направленным перебором альтернатив с последующим выбором результирующего решения методами компромиссного управления. Результаты исследования предназначены для использования в проектах развития пригородно-городского движения в крупных городских агломерациях.

Ключевые слова: пригородно-городское движение; классы транспортного обслуживания; пассажиропоток; график движения поездов; топология сети; размеры движения поездов

Состояние вопроса. В настоящее время во многих городских агломерациях происходит интеграция пригородного железнодорожного транспорта в транспортную систему города, что позволяет привлечь до-

полнительный пассажиропоток путем изменения схемы организации движения пригородных поездов. При расчете эффективных параметров организации движения в пригородно-городском сообщении необходимо учитывать пассажиропоток, который будет возрастать (или убывать) в зависимости от технологии транспортного обслуживания. Различные классы транспортного обслуживания позволяют привлечь пассажиров с других видов транспорта и ранее имобильных пассажиров.

Например, ввод скорых пригородных поездов (типа «Спутник» и «Экспресс») на Октябрьском направлении Центрального транспортного узла (ЦТУ) показал, как дифференциация транспортного обслуживания влияет на пассажиропоток при прочих равных условиях организации движения поездов и привлекает пассажиров с других видов транспорта.

В соответствии с графиком движения поездов 2014–2015 гг. максимальные размеры движения поездов на участке Москва—Октябрьская—Крюково составили 83 пары поездов в сутки (порядка 57 824 отправленных поездов в год в обоих направлениях), при этом в 2015 г. на данном направлении ЦТУ было перевезено 40 млн пасс. (объемные показатели отправления пассажиров в пригородном железнодорожном сообщении приведены по данным Главного вычислительного центра ОАО «РЖД»).

В 2016 г. введены в эксплуатацию поезда типа «Спутник» в сообщении Москва—Крюково, а также поезда типа «Экспресс» в сообщении Москва—Тверь. Максимальные размеры движения на направлении составили 127 пар поездов в сутки (порядка 85 722 отправленных поездов в год в обоих направлениях), при этом пассажиропоток составил более 46 млн пасс., а в 2017 г. — 49 млн пасс. (см. таблицу).

Расчет густоты пассажиропотока в 2015 и 2017 гг. на данном направлении показал прирост более чем на 20 % по максимальному срезу направления (рис. 1, 2).

Таким образом, ввод в эксплуатацию нового транспортного продукта, который позволил сокра-

тить время в пути [1], послужил одним из факторов увеличения пассажиропотока на Октябрьском направлении и, соответственно, роста доходов компании-перевозчика.

В ранее выполненных исследованиях решены задачи по разработке методов прогнозирования пассажиропотоков в условиях крупных городов с использованием методов корреляционно-регрессионного анализа [2], рассмотрены вопросы зонного движения пригородных поездов, определены методы расчета размеров движения пригородных поездов в зависимости от густоты пассажиропотока и обоснован выбор оптимального графика движения поездов [3, 4, 5]. Кроме того, проведены исследования в области влияния интервала и очередности отправления пригородных поездов на населенность вагонов, разработки метода расчета среднесуточных пассажиропотоков [6], взаимодействия железнодорожного транспорта и метрополитена в системе транспортного обслуживания крупных городов и их пригородных зон [7], оценки возможности использования пригородных электропоездов как городского вида транспорта [8] и др.

В предшествующих исследованиях решалась задача — при заданной топологии транспортной сети G и заданных прогнозируемых пассажиропотоках A выбрать вариант организации пассажирского движения, характеризуемый набором управляемых переменных X и обеспечивающий при заданных ограничениях наилучший финансовый результат Z :

$$Z(X, G, A) \rightarrow \max. \quad (1)$$

Существенная часть пассажиропотоков зависит от организации движения поездов и уровня предоставляемых сервисов. При этом исходные данные задачи в постановке (1) являются функцией решения задачи, что требует ее изменения. Поскольку структура пассажиропотока содержит компоненты, не зависящие от организации движения ($A_{нз}$) и зависящие ($A_{зав}$), постановку (1) следует переписать в следующем виде:

$$Z(X, G, A_{нз}, A_{зав}(X)) \rightarrow \max. \quad (2)$$

Формализованное описание постановки задачи. Топология транспортной сети (рис. 3) описывается связным графом G , ребрами которого являются элементы железнодорожной инфраструктуры, используемые для пригородно-городского движения: главные пути перегонов, соединительные ветви, стрелочные горловины, пути станционных парков (приемоотправочных, отстойно-экипировочных).

Каждое ребро 1–11 (рис. 3, б) характеризуется набором параметров:

$$\{n_{н.αβ(τ)}, W_{α(τ)}, ε_{αβ}^{εγ}, t_{αβ}^{εγ}\}, \quad (3)$$

Основные показатели работы пригородных железнодорожных перевозок в 2015 и 2017 гг. на Октябрьском направлении ЦТУ

Main performance indicators of commuter rail services in 2015 and 2017 on the Oktyabrskaya direction of the Central Transport Hub (CTH)

Показатель	2015 г.	2017 г.	Прирост 2017 г. к 2015 г.
Размеры движения, пар поездов в сутки	83	127	53 %
Количество отправленных поездов в год, поездов	57 824	85 722	48 %
Пассажиропоток, млн пасс.	40	49	23 %

где $n_{н.αβ(τ)}$ — наличная пропускная способность элемента $α$ в направлении следования $β$ на внутрисуточном периоде $τ$, поездов/ч; $W_{α(τ)}$ — вместимость элемента $α$ на внутрисуточном периоде $τ$, составов; $ε_{αβ}^{εγ}$ — коэффициент съема пропускной способности элемента $α$ в направлении следования $β$ для поездов

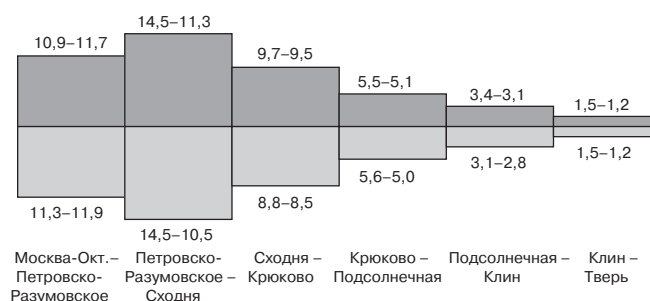


Рис. 1. Густота пассажиропотока на Октябрьском направлении ЦТУ в 2015 г., млн пасс.: к Москве от Москвы

Fig. 1. Density of passenger traffic on the Oktyabrskaya direction of the CTH in 2015, million passengers: to Moscow from Moscow

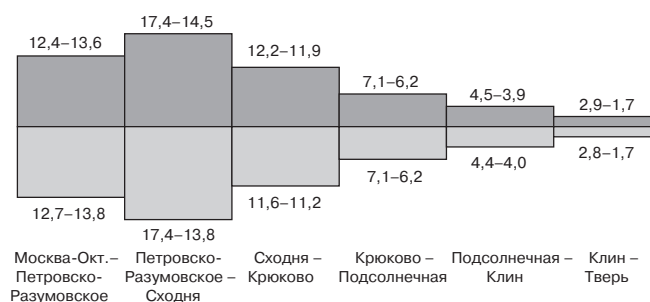


Рис. 2. Густота пассажиропотока на Октябрьском направлении ЦТУ в 2017 г., млн пасс.: к Москве от Москвы

Fig. 2. Density of passenger traffic on the Oktyabrskaya direction of the CTH in 2017, million passengers: to Moscow from Moscow

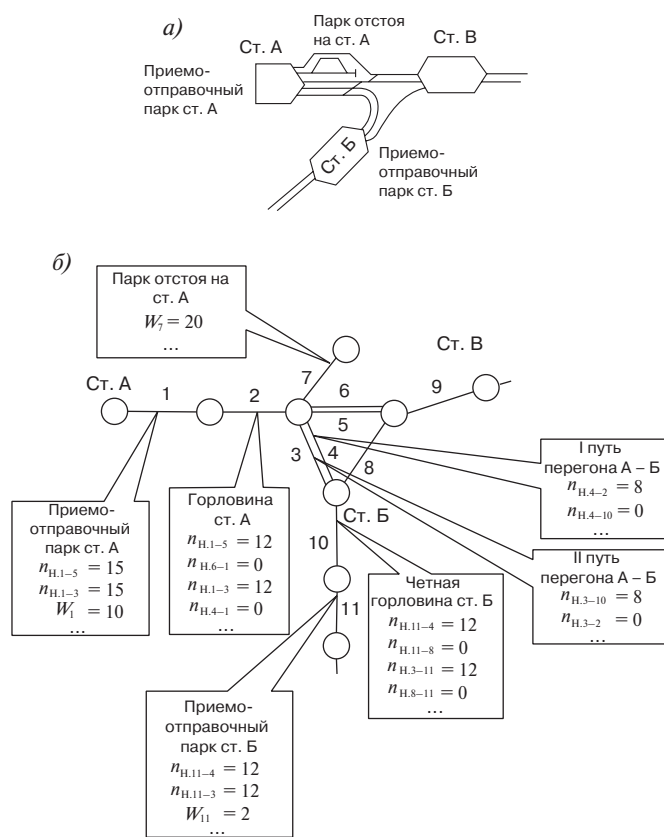


Рис. 3. Топология транспортной сети:

а — фрагмент схемы железнодорожного узла; б — связный граф, моделирующий этот фрагмент узла; $n_{\alpha, \beta}$ — наличная пропускная способность элемента α в направлении следования β ; W_{α} — вместимость элемента α , составов; 1–11 — номера ребер графа

Fig. 3. Transport network topology:

а — fragment of a railway hub diagram; б — connected graph modeling this fragment of the hub; $n_{\alpha, \beta}$ — available capacity of the element α in the direction of motion β ; W_{α} — capacity of the element α , compositions; 1–11 — numbers of the edges of the graph

скоростной категории ξ и типа графика движения γ [9]; $t_{\alpha\beta}^{\xi\gamma}$ — время следования (нахождения) поезда скоростной категории ξ и типа графика движения γ на элементе α в направлении следования β , ч.

Величина $n_{\alpha, \beta(\tau)}$ задается в поездах параллельного графика, следующих со всеми остановками («тихоход за тихоходом»), и характеризует часть пропускной способности элемента α для пригородно-городского движения (условия организации других видов движения на совмещенной инфраструктуре в рассматриваемой постановке приняты заданными). Индекс β характеризует для главных и соединительных путей четное и нечетное направления (например, для двухпутного перегона с односторонней автоблокировкой на четном главном пути в четном направлении $n_{\alpha, \beta(\tau)} > 0$, а в нечетном направлении $n_{\alpha, \beta(\tau)} = 0$), для станционных элементов — примыкающее направление следования. Значения $W_{\alpha(\tau)} > 0$ для зонных (оборотных) и

отстойно-экипировочных путей, для остальных элементов $W_{\alpha(\tau)} = 0$.

Управляемые переменные характеризуют маршрутную сеть пригородно-городского сообщения, каждое поездное назначение $x = 1, \dots, X$ которой состоит из набора следующих параметров:

$$\{S_x^o, S_x^h, L_x, n_x^p, n_x^{\text{пик}}, n_x^b, \xi_x, a_x^{\xi}, \gamma_x\}, \quad (4)$$

где S_x^o — станция отправления; S_x^h — станция назначения; L_x — путь следования по элементам транспортной сети G (в узлах с развитой топологией до одной точки можно доехать разными железнодорожными маршрутами); $n_x^p, n_x^{\text{пик}}, n_x^b$ — размеры движения соответственно в рабочие дни (поездов/сут), в час пик рабочих дней (поездов/ч), в выходные дни (поездов/сут); ξ_x — характеристика класса транспортного обслуживания, скоростной категории; a_x^{ξ} — расчетная пассажироместимость состава поезда при классе транспортного обслуживания ξ_x ; γ_x — тип графика движения.

Классы транспортного обслуживания в пригородном сообщении с учетом длины маршрута l , км, и маршрутной скорости v_m , км/ч, подразделяются сегодня на следующие категории [10, 11]:

- 1) пригородные, пригранично-пригородные (региональные) поезда ($l \leq 200$ км, $v_m < 50$ км/ч);
- 2) скорые пригородные ($l \leq 200$ км, $50 \leq v_m \leq 90$ км/ч);
- 3) городские поезда;
- 4) скоростные пригородные поезда ($l \leq 200$ км, $v_m > 90$ км/ч).

Пригородные и внутригородские пассажиропотоки в крупных городских агломерациях неоднородны. Общая корреспонденция пассажиропотока из пункта отправления i в пункт назначения j определяется по формуле

$$A_{ij}^{\text{общ}} = A_{ij}^{\text{нз}} + A_{ij}^{\text{зав}}, \quad (5)$$

где $A_{ij}^{\text{нз}}, A_{ij}^{\text{зав}}$ — корреспонденции пассажиропотока соответственно независимого и зависящего от технологии организации движения, пасс./сут (в среднем за год; в отдельных случаях — за месяц).

Кроме того, слагаемые корреспонденции $A_{ij}^{\text{нз}}$ и $A_{ij}^{\text{зав}}$ исходя из предпочтений пассажиров в условиях предлагаемой ценовой политики, сопутствующих сервисов и конкурирующих способов перевозок подразделяются на нераспределяемые по сети транспортных продуктов (пассажиры, пользующиеся поездами только определенных категорий и назначений, при отсутствии которых они не совершают поездки железнодорожным транспортом) и распределяемые — следующие в поездах разных назначений (тарифных зон) одной

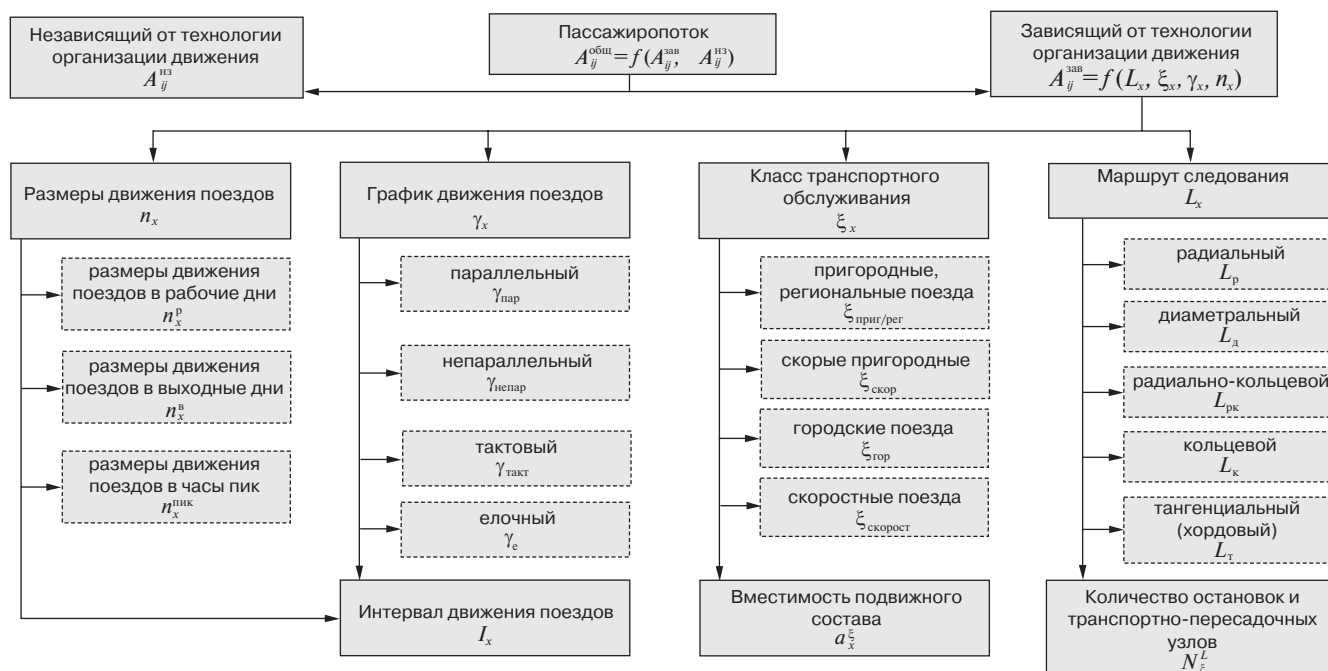


Рис. 4. Дифференциация пассажиропотока в зависимости от технологии организации движения

Fig. 4. Differentiation of passenger traffic depending on traffic management technology

категории ξ_x (в общем случае — также и с пересадками) либо в поездах различных категорий в зависимости от удобства графика движения (рис. 4).

Распределение корреспонденций пассажиропотока по сети транспортных продуктов зависит как от набора управляемых переменных (4), так и от результирующего показателя — времени поездки железнодорожным транспортом из пункта i в пункт j при использовании транспортного продукта ξ_x :

$$t_{ij}^{\xi} = \sum t_{ij(\text{терм})}^{\xi} + \sum t_{ij(\text{ож})}^{\xi} + \sum t_{ij(\text{след})}^{\xi} = f_{(\text{терм})}(S_x^o, S_x^h) + f_{(\text{ож})}(S_x^o, S_x^h, n_x^p, n_x^в, n_x^пик, \xi_x, a_x^{\xi}, \gamma_x) + f_{(\text{след})}(S_x^o, S_x^h, L_x, \xi_x, \gamma_x), \quad (6)$$

где $\sum t_{ij(\text{терм})}^{\xi}$, $\sum t_{ij(\text{ож})}^{\xi}$, $\sum t_{ij(\text{след})}^{\xi}$ — суммарное за поездку время соответственно выполнения терминальных операций в пунктах отправления, назначения и возможных пересадок; ожидания поездов; следования в поездах, ч.

Целевая функция. Цели для перевозчика и владельца инфраструктуры идентичны — это максимизация удельного финансового результата (в социально значимом проекте — минимизация отрицательного финансового результата), приходящегося на 1 пассажиро-км (Al):

$$\frac{\sum D - \sum R}{\sum Al} \rightarrow \max, \quad (7)$$

где $\sum D$ — составляющие доходных поступлений, обеспечивающих безубыточность данной деятельности; $\sum R$ — составляющие инвестиционных затрат и прямых производственных расходов по перевозочной деятельности.

При этом $\sum R$ и $\sum D$ различны для каждого участника транспортного обслуживания. Расходы перевозчика определяются по формулам

$$\sum R^{\text{пер}} = R_{\text{и}} + R_{\text{а}} + R_{\text{пс}} + R_{\text{об}} + R_{\text{си}} + R_{\text{п}}; \quad (8)$$

$$R_{\text{и}} = f(n_x, \xi_x), \quad (9)$$

где $R_{\text{и}}$ — расходы на оплату услуг предоставления инфраструктуры; $R_{\text{а}}$ — расходы на аренду подвижного состава; $R_{\text{пс}}$ — удельные инвестиции на приобретение собственного подвижного состава; $R_{\text{об}}$ — операционные расходы на эксплуатацию, обслуживание и амортизацию собственного подвижного состава; $R_{\text{си}}$ — расходы на обслуживание собственной инфраструктуры; $R_{\text{п}}$ — прочие расходы.

Доходы перевозчика рассчитываются по формулам

$$\sum D^{\text{пер}} = D_6 + D_{\text{к}} + D_{\text{к2}} + D_{\text{п}}; \quad (10)$$

$$D_6 = f(\sum Al); \quad (11)$$

$$D_{\text{к}} = f(\sum Al); \quad (12)$$

$$D_{\text{к2}} = f(n_x), \quad (13)$$

где D_6 — доходы от реализации проездных документов на поезд; D_k — компенсация выпадающих доходов перевозчика от разницы между экономически обоснованным тарифом и регулируемым субъектом РФ; D_{k2} — компенсация расходов от субъекта РФ на получение услуг инфраструктуры; D_n — доходы от прочих видов деятельности.

В общем виде расходы владельцев железнодорожных инфраструктур определяются по следующему выражению:

$$R^B = R_{от} + R_{ос} + R_{рп}, \quad (14)$$

где $R_{от}$ — операционные расходы, связанные с продвижением транспортных потоков (путевое хозяйство, энергетика, диспетчерское управление); $R_{ос}$ — удельные инвестиции, связанные с мощностью объекта инфраструктуры; $R_{рп}$ — операционные расходы, связанные с обслуживанием инфраструктуры для организации пассажирского и других видов сообщения.

Доходы владельцев инфраструктур рассчитываются по формуле

$$D^B = D_d + D_y, \quad (15)$$

где D_d — доход от оказания услуг предоставления инфраструктуры перевозчикам для организации пассажирского и других видов сообщения; D_y — доход от оказания прочих услуг.

Ограничения на решение задачи по определению эффективных параметров маршрутной сети обуславливаются доступными ресурсами инфраструктуры и привлекаемого подвижного состава. Допустимые размеры движения поездов для элемента инфраструктуры α в направлении следования β на внутрисуточном периоде τ определяются по формуле

$$\sum_x n_{x(\tau)}^{\alpha\beta} \varepsilon_{\alpha\beta(x)}^{\xi\gamma} \leq n_{n,\alpha\beta(\tau)}, \quad (16)$$

где $n_{x(\tau)}^{\alpha\beta}$ — размеры движения поездов назначения x , проходящих через элемент инфраструктуры α в направлении следования β на внутрисуточном периоде τ , поездов/ч; $\varepsilon_{\alpha\beta(x)}^{\xi\gamma}$ — коэффициент съема пропускной способности данного элемента поездом назначения x .

Число составов $M_{\alpha(\tau)}$, размещаемых на зонных (оборотных) и отстойно-экипировочных путях элемента инфраструктуры α на внутрисуточном периоде τ , имеет ограничение:

$$M_{\alpha(\tau)} \leq W_{\alpha(\tau)}. \quad (17)$$

Ограничения (16) и (17) в определенных условиях могут быть не выполнены. При их нарушении возможны технологические мероприятия (перераспреде-

ление пропускной способности элементов и путевой емкости [12] с изменением составляющих операционных расходов в целевой функции) либо реконструктивные мероприятия с учетом в целевой функции дополнительных инвестиций. При этом вычисляются новые значения $n_{x(\tau)}^{\alpha\beta}$ и $W_{\alpha(\tau)}$ для другой группы вариантов решения.

Привлекаемый для перевозок парк подвижного состава не должен превышать его доступные ресурсы:

$$n_{x(\tau)}^{\alpha\beta} k_{\text{потр.}x(\tau)} \leq M_{\xi}^{\xi} \forall \xi_x, \quad (18)$$

где $k_{\text{потр.}x(\tau)}$ — коэффициент потребности составов для обслуживания поездов назначения x на внутрисуточном периоде τ ; M_{ξ}^{ξ} — эксплуатируемый парк составов для обслуживания поездов категории ξ_x .

Кроме того, он должен обеспечивать освоение планируемого пассажиропотока:

$$\sum_{i,j} A_{ij}^{x(\alpha\beta)} \leq n_{x(\tau)}^{\alpha\beta} a_x^{\xi}, \quad (19)$$

где $A_{ij}^{x(\alpha\beta)}$ — поток пассажиров корреспонденции (i, j) , следующих в поездах назначения x через элемент инфраструктуры α в направлении β .

При невыполнении ограничений (18) или (19) возможны действия, аналогичные действиям при нарушении ограничений (16) или (17), с созданием другой группы вариантов решения.

Для привлекательности транспортного продукта ξ_x как новой услуги по перевозке пассажиров необходимо обеспечить регулярность движения поездов по тактовому расписанию при условии достаточного перспективного пассажиропотока и получения положительного финансового результата для перевозчика (7). Минимальной периодичностью возможно считать значение 1 поезд в час (при тактовом графике движения) в период с 6 до 23 ч. На направлениях с ярко выраженной маятниковой миграцией населения рекомендуется в часы пик увеличивать интенсивность следования поездов до 2 раз в час.

Например, при организации движения поездов транспортного продукта ξ_x с 6 до 23 ч с интервалом 1 ч:

$$n_{x(\tau)} \geq 18 \text{ пар поездов/сут.} \quad (20)$$

При освоении концентрированного потока только в часы пик назначаются тактовые поезда каждый час в период с 6 до 11 ч и с 15 до 20 ч:

$$n_{x(\tau)} \geq 12 \text{ пар поездов/сут.} \quad (21)$$

При невыполнении ограничений (20) и (21), прежде всего из-за отсутствия пассажиропотока, технология тактового движения не применяется.

Принципы решения. Нелинейность целевой функции задачи (2) и целочисленность управляемых переменных (4) не позволяют непосредственно применить классические методы математического программирования [13] и найти вариант решения, имеющий математическое доказательство оптимальности для участников процесса транспортного обслуживания. Для решения задачи применен поиск приближенного решения путем улучшения показателей базового варианта. Задача решается в следующем порядке.

Этап 0 (подготовительный). Базовый вариант технологии организации движения поездов пригородно-городского сообщения характеризуется:

- существующим технико-технологическим развитием транспортной сети G_0 ;
- маршрутной сетью и ее характеристиками в действующем нормативном графике движения поездов X_0 ;

- матрицей исполненных пассажиропотоков $\|A_{ij}^0\|$.

При построении модели базового варианта сначала прикрепляют назначения маршрутной сети X_0 к ребрам графа G_0 в соответствии с данными о станциях отправления, назначения и пути следования $\{S_x^o, S_x^n, L_x\}$, рассчитывают натуральные технологические показатели и расходные составляющие целевых функций. Затем распределяют компоненты матрицы пассажиропотоков $\|A_{ij}^0\|$ по назначениям поездов маршрутной сети X_0 [4, 5], рассчитывают доходные составляющие целевых функций.

Этап 1. Генерируется набор матриц пассажиропотоков

$$\|A_{ij}^1\|, \|A_{ij}^2\|, \|A_{ij}^3\|, \dots, \|A_{ij}^k\|, \dots, \|A_{ij}^K\| \quad (22)$$

в границах диапазона оценок их прогнозируемого изменения [2].

Этап 2. Генерируется упорядоченное множество вариантов параметров технологии освоения расчетных пассажиропотоков (рис. 5):

- с пошаговым увеличением размеров движения поездов по назначениям вновь вводимых классов транспортного обслуживания (варианты $X_0 + \{\xi_x\}$, см. рис. 5);
- с заменой части поездов базового варианта поездами вновь вводимых классов транспортного обслуживания (варианты $X_0' + \{\xi_x\}$, $X_0'' + \{\xi_x\}$, см. рис. 5).

В примере на рис. 5 численной оценке подлежат ввод новых транспортных продуктов по назначениям ξ_1 , либо ξ_2 , либо совместно $\xi_1 + \xi_2$.

Этап 3. На этом этапе предусматривается направленный перебор упорядоченных альтернатив. По каждому вводимому назначению ξ_x либо сочетанию вводимых назначений задаются размеры движения поездов от начального значения $n_{\min, x}$ с пошаговым увеличением на Δn_x поездов, проверкой ограничений

(16)–(21), распределением пассажиропотоков и вычислением натуральных и стоимостных показателей. Пошаговый расчет по каждой ветви графа с увеличением числа поездов прекращается, как только перестают выполняться ограничения и (или) прекращается улучшение значений целевой функции.

Этап 3 выполняется для каждой из матриц пассажиропотоков, сгенерированных на этапе 1.

Этап 4. Группу лучших вариантов образуют решения с выполнением ограничений и значениями целевых функций в диапазоне от наилучших из значений Z^* из рассчитанных на шаге 3 до $Z^* + \Delta Z$, где ΔZ — задаваемая технологическая величина.

Выбор решения из группы лучших вариантов производится с учетом экспертно оцениваемых неформализованных факторов и интересов участников перевозочного процесса, систематизируемых известными методами компромиссного управления ([14] и др.).

Рассмотренный принцип решения может быть применен и к более общей постановке — с изменением вариантов организации других видов движения на совмещенной инфраструктуре.

Модифицированная постановка и порядок решения требуются в случае необходимости рассмотрения задачи с изменением пунктов отправления и (или) назначения следования железнодорожным транспортом. Такая задача имеет место, например, при строительстве в узле нового терминала для пригородно-городского движения и распределении поездной работы между ним и действующей пассажирской станцией. С учетом того что пункты отправления и прибытия пассажиров по железной дороге не являются пунктами зарождения и погашения пассажиропотоков, для оценки перспективного пассажиропотока будет логичным учесть время следования пассажира по городу до терминала железной дороги.

Оценить перспективный пассажиропоток, проходящий через терминал, при закреплённом распределении поездов разных категорий на терминалы возможно исходя из результирующих затрат времени пассажиров на поездку по рассматриваемым вариантам специализации и привлекательности того или иного маршрута.

Установить перспективный пассажиропоток возможно функцией, зависящей от составляющих комфорта и стоимости поездки E_{ij} и затрат времени на поездку T_{ij} (рис. 6):

$$A_{ij} = f(E_{ij}, T_{ij}); \quad (23)$$

$$T_{ij} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4, \quad (24)$$

где t_1 — затраты времени пассажира на следование от точки начала поездки до входа в терминал пешком или на городском транспорте (включая проход

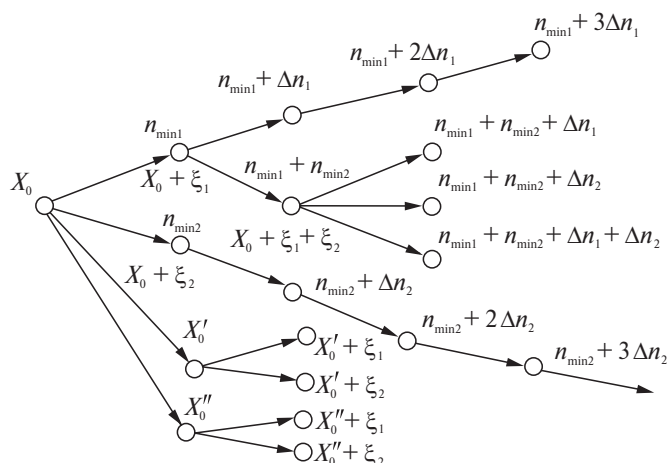


Рис. 5. Граф упорядоченного множества вариантов параметров технологии освоения расчетных пассажиропотоков:
 X_0 — маршрутная сеть и ее характеристики в действующем нормативном графике движения поездов; X'_0, X''_0 — варианты маршрутной сети и ее характеристики с заменой части поездов базового варианта поездами вновь вводимых классов транспортного обслуживания; ξ_x — характеристика класса транспортного обслуживания, скоростной категории с учетом типа графика движения; $n_{\min, x}$ — начальные размеры движения поездов; Δn_x — шаг увеличения размеров движения поездов

Fig. 5. Graph of an ordered set of options for the technology parameters for the development of estimated passenger flows:
 X_0 — route network and its characteristics in the current normative train schedule; X'_0, X''_0 — variants of the route network and its characteristics with the replacement of some of the trains of the basic variant with trains of the newly introduced classes of transport service; ξ_x — characteristics of the class of transport service, speed category considering the type of traffic schedule; $n_{\min, x}$ — initial dimensions of train motion; Δn_x — step of increasing the size of train traffic

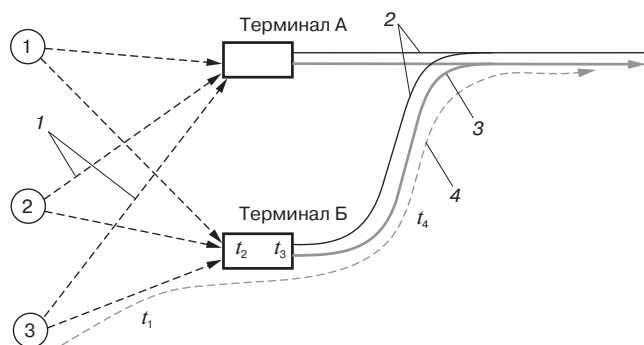


Рис. 6. Распределение пассажиропотоков между железнодорожными терминалами:

1 — городские транспортные коммуникации; 2 — железнодорожные линии; 3 — варианты маршруты пригородного железнодорожного транспорта; 4 — маршрут бимодальной транспортной системы «трамвай—поезд»; (1–3) — пункты образования пассажиропотоков

Fig. 6. Distribution of passenger traffic between railway terminals:
 1 — city transport communications; 2 — railway lines; 3 — alternative routes of suburban railway transport; 4 — route of the bimodal transport system “tram—train”; (1–3) — points of formation of passenger flows;
 t_1, t_2, t_3, t_4 — time spent by the passenger to follow from the point of the beginning of the trip to the terminal, terminal operations, waiting for the desired train, following the train to the final point of the route, respectively

до остановки городского транспорта, ожидание транспортного средства, следование от места посадки до остановки около терминала, проход от остановки высадки из городского транспорта до входа в терминал); t_2 — затраты времени пассажира на терминальные операции (проход от входа в терминал до места посадки в поезд, включая приобретение билета, прохождение турникетов и процедур транспортной безопасности); t_3 — затраты времени пассажира на ожидание поезда требуемого направления; t_4 — затраты времени пассажира на следование в поезде до конечной точки своего маршрута.

Пассажиропоток и надежность работы транспортной системы в каждом случае следует установить отдельно с учетом следующих факторов.

В первом случае (наличие только терминала А) — отсутствие вариативности и отсутствие «вилочного» движения поездов является фактором, положительно влияющим на надежность работы железнодорожной части маршрута. Однако у пассажира отсутствуют альтернативные точки пересадки на железнодорожный транспорт. При прочих равных условиях концентрация прибытия и отправления пассажиров на один терминал приводит к снижению составляющей t_3 внутри общего времени поездки пассажира, но это снижение произойдет, если рассматриваемый терминал может принять и обработать требуемые размеры движения пассажирских поездов в наиболее благоприятные для пассажира периоды суток.

Для обеспечения приема заданного количества поездов возможно организовать реконструкцию терминала А или строительство терминала Б. Капитальные и эксплуатационные затраты следует определять отдельно для каждого случая.

Во втором случае (наличие терминалов А и Б) — у пассажира появляются альтернативные варианты при выборе места пересадки с/на железнодорожный транспорт (либо терминал А, либо терминал Б) для следования к конечной точке маршрута. Выбор более близко расположенного терминала приводит к уменьшению составляющей t_1 , но увеличивает составляющую t_3 ввиду распределения поездов до требуемой конечной точки маршрута между терминалами.

В третьем случае (наличие терминала А — поезд по железной дороге следуют только к нему, а через терминал Б проходит маршрут бимодальной транспортной системы) у пассажира сохраняется возможность следования по железной дороге с вариативным использованием терминалов. Маршрут бимодальной транспортной системы «трамвай—поезд» прокладывается через основные точки зарождения и погашения пассажиропотоков, недоступные для обслужи-

вания железнодорожным транспортом [15]. Таким образом, для пассажиров уменьшается составляющая t_1 и исключаются составляющие t_2 и t_3 , так как пассажир уже произвел посадку в транспортное средство.

Результаты исследования для отечественных транспортных узлов. Вышеуказанные принципы нашли свое применение в проектах развития пригородно-городских перевозок в крупных железнодорожных узлах.

В Санкт-Петербургском железнодорожном узле в целях обеспечения максимальной интеграции железнодорожной инфраструктуры в сеть городского транспорта, эффективного использования потенциала железных дорог для транспортного обслуживания населения проработана организация нового транспортного продукта для освоения перспективного пассажиропотока — создание двух маршрутов пригородно-городского сообщения с тактовым графиком движения:

Д-1 «Ораниенбаум—Аэропорт Пулково—Белоостров». Организация данного маршрута позволит обеспечить транспортную железнодорожную связь с международным аэропортом Пулково, пассажиропоток которого в 2018 г. составил более 18 млн пасс., а также организовать сообщение на Сестрорецком направлении с учетом Концепции комплексного развития города Сестрорецк и формирования новой точки притяжения бизнес-активности «Лахта Центр». Необходимость строительства новой линии, проходящей через аэропорт, обусловлена ростом его пассажиропотока.

Д-2 «Гатчина Варшавская—Броневая—Волковская—Токсово». Организация данного маршрута позволит обеспечить пассажирскую железнодорожную транспортную доступность к историческим достопримечательностям, а также создать новые корреспонденции с Всеволожским и Гатчинским муниципальными районами, которые являются наиболее густонаселенными в пределах Ленинградской области.

С целью развития пассажирского сообщения в г. Уфе предусматривается организация внутригородского ускоренного пассажирского движения в сообщении Иглино—Дема—Уфа—Аэропорт Уфа со строительством железнодорожной ветки в аэропорт. Размеры движения внутригородских поездов в данном сообщении составят до 24 пар поездов в сутки, что позволит освоить перспективный пассажиропоток в интермодальном сообщении аэропорт—город, а также увеличить транспортную доступность районов города.

Выводы. 1. Сформулирована задача определения эффективных параметров маршрутной сети пригородно-городского железнодорожного сообщения, учитывающая влияние дифференциации

классов транспортного обслуживания и технологии организации движения на структуру и распределение пассажиропотоков в условиях инфраструктурных и ресурсных ограничений и взаимодействия самостоятельных участников перевозочного процесса.

2. Разработаны принципы решения указанной задачи путем определения группы лучших вариантов направленным перебором альтернатив с последующим выбором результирующего решения методами компромиссного управления для достижения приемлемых финансовых результатов.

3. Исследованы возможности модификации задачи для случаев с изменением пунктов отправления и (или) назначения следования пассажиров железнодорожным транспортом и изменением вариантов организации других видов движения на совмещенной инфраструктуре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов А.П., Морчиладзе И.Г., Соколов М.М. Пути решения транспортных проблем мегаполисов. М.: ВНИИТ РАН, 2011. 228 с.
2. Правдин Н.В., Негрей В.Я. Прогнозирование пассажирских потоков: методика, расчеты, примеры. М.: Транспорт, 1980. 222 с.
3. Кочнев Ф.П. Оптимальные параметры пригородных пассажирских перевозок. М.: Транспорт, 1975. 304 с.
4. Пазойский Ю.О. Оптимизация параметров системы освоения пригородных пассажиропотоков в условиях мегаполиса: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.08. М.: МИИТ, 2000. 339 с.
5. Пазойский Ю.О., Вакуленко В.П., Колин А.В. Организация пригородных железнодорожных перевозок. М.: ФГБУ ДПО «УМЦ ЖДТ», 2015. 272 с.
6. Терзи В.И. Совершенствование организации пригородных железнодорожных перевозок мегаполиса в условиях формирования мультимодальных систем (на примере Новосибирского транспортного узла): дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01. Новосибирск: СГУПС, 2001. 150 с.
7. Голубев П.В. Выбор параметров пассажирских устройств при организации пригородно-городских перевозок в узле: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.08. М.: МИИТ, 2005. 223 с.
8. Самарцев П.В. Совершенствование организации перевозок пассажиров в крупных городах Сибири и Дальнего Востока: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.08. Новосибирск: СГУПС, 2005. 233 с.
9. Кириллова С.Ю., Николаев К.Ю. К определению коэффициентов съема пропускной способности участков железных дорог // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2020. Т. 79. № 4. С. 230–238. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-4-230-238>.
10. О критериях определения категорий поездов для перевозки пассажиров в зависимости от скорости их движения и расстояния следования [Электронный ресурс]: приказ Минтранса России от 18 июля 2007 г. № 99. URL: <https://base.garant.ru/191631> (дата обращения: 14.01.2021 г.).
11. О нумерации поездов для графика движения [Электронный ресурс]: распоряжение ОАО «РЖД» от 5 апреля 2014 г.

№ 859p. URL: <https://base.garant.ru/70638506> (дата обращения: 14.01.2021 г.).

12. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог: утв. ОАО «РЖД» 10 ноября 2010 г. М.: Техинформ, 2011. 289 с.

13. Ржевский С. В. Математическое программирование [Электронный ресурс]: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2019. 608 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/123692> (дата обращения: 14.01.2021 г.).

14. Михалевиц В. С., Волкович В. Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. М.: Наука, 1982. 288 с.

15. Николаев К. Ю. Выбор полигона и параметров применения технологии «трамвай—поезд» в России // Транспорт Российской Федерации. 2020. Т. 90. № 5. С. 40–44.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

БОРОДИН Андрей Федорович,

д-р техн. наук, профессор, заведующий отделением, АО «ИЭРТ»; заведующий кафедрой, ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)

МУСТАФИН Ильдар Фавилович,

ведущий инженер, АО «ИЭРТ»; аспирант, АО «ВНИИЖТ»

НИКОЛАЕВ Константин Юрьевич,

инженер I-й категории, АО «ИЭРТ»; аспирант, ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)

Статья поступила в редакцию 25.01.2021 г., принята к публикации 17.03.2021 г.

Для цитирования: Бородин А.Ф., Мустафин И.Ф., Николаев К.Ю. Принципы определения эффективных параметров организации движения поездов в пригородно-городском сообщении с учетом дифференциации классов транспортного обслуживания // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 2. С. 108–117. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-108-117>.

Principles for determining effective parameters for organizing train traffic in suburban-urban traffic, taking into account the differentiation of service classes

A. F. BORODIN, I. F. MUSTAFIN, K. Yu. NIKOLAEV

Joint Stock Company "Institute for Transport Economics and Development" (JSC "IERT"), Moscow, 105066, Russia

Abstract. Introduction of a new transport product in urban agglomerations helps to attract additional passenger traffic by changing parameters of organizing the operation of suburban trains. Problem of determining the effective parameters of the route network of suburban-urban railway communication in order to achieve acceptable financial results for the owners of infrastructure and carriers is considered. Controlled variables are determined that characterize the route network of suburban-urban traffic and include the type of train schedule, the operation interval, the routes, the traffic volume of suburban-urban trains, the station of departure and arrival, the service class. It was also determined that the distribution of passenger traffic correspondence over the network of transport products depends both on a set of controllable variables and on the time of travel by rail when using a transport product, taking into account the execution of terminal operations at points of departure, destination, transfers, waiting for trains, and travel on trains. The objective function for the carrier and the owner of the infrastructure, which is identical for both participants of transportation, is considered, while the components of investment costs and direct production costs for transportation activities and income receipts that ensure the break-even of this activity are different for each participant in transport services. Relevant constraints for the task, due to the resources of the railway infrastructure and rolling stock, have been determined. Authors provides the principles of solving this multicriteria problem by finding a group of the best options by a directed enumeration of alternatives with the subsequent selection of the resulting solution by the methods of compromise control. The research results are intended for use in projects for the development of suburban-urban traffic in large urban agglomerations.

Keywords: suburban-urban traffic; classes of transport services; passenger traffic; train schedule; network topology; train traffic volume

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-108-117>

REFERENCES

1. Kuznetsov A. P., Morchiladze I. G., Sokolov M. M. *Puti resheniya transportnykh problem megapolisov* [Ways of solving transport problems of megacities]. Moscow, VINITI RAN Publ., 2011, 228 p.
2. Pravdin N. V., Negrey V. Ya. *Prognozirovanie passazhirskikh potokov: metodika, raschety, primery* [Predicting passenger flows: Methods, calculations, examples]. Moscow, Transport Publ., 1980, 222 p.
3. Kochnev F. P. *Optimal'nye parametry prigorodnykh passazhirskikh perevozok* [Optimal parameters of suburban passenger transportation]. Moscow, Transport Publ., 1975, 304 p.
4. Pazoyskiy Yu. O. *Optimizatsiya parametrov sistemy osvoeniya prigorodnykh passazhiropotokov v usloviyakh megapolisa. Dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Optimization of the parameters of the system for the development of suburban passenger traffic in a megapolis. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, MIIT Publ., 2000, 339 p.
5. Pazoyskiy Yu. O., Vakulenko V. P., Kolin A. V. *Organizatsiya prigorodnykh zheleznodorozhnykh perevozok* [Organization of suburban railway transportation]. Moscow, FGBU DPO "UMTs ZhDT" Publ., 2015, 272 p.
6. Terzi V. I. *Sovershenstvovanie organizatsii prigorodnykh zheleznodorozhnykh perevozok megapolisa v usloviyakh formirovaniya mul'timodal'nykh sistem (na primere Novosibirskogo transportnogo uzla). Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improvement of the organization of suburban railway transportation of the megapolis in the conditions of the formation of multimodal systems (on the example of the Novosibirsk transport hub). Cand. tech. sci. diss.]. Novosibirsk, SGUPS Publ., 2001, 150 p.
7. Golubev P. V. *Vybor parametrov passazhirskikh ustroystv pri organizatsii prigorodno-gorodskikh perevozok v uzle. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Choice of parameters of passenger devices in the organization of suburban-urban traffic in the hub. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, MIIT Publ., 2005, 223 p.

8. Samartsev P.V. *Sovershenstvovanie organizatsii perevozok passazhirov v krupnykh gorodakh Sibiri i Dal'nego Vostoka. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improving the organization of passenger transportation in large cities of Siberia and the Far East. Cand. tech. sci. diss.]. Novosibirsk, SGUPS Publ., 2005, 233 p.

9. Kirillova S.Yu., Nikolaev K.Yu. *K opredeleniyu koeffitsientov s"ema propusknoy sposobnosti uchastkov zheleznykh dorog* [To the determination of the capacity descheduling coefficients of railway sections]. VNIIZHT Scientific Journal, 2020, Vol. 79, no. 4, pp. 230–238. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-4-230-238>.

10. *On the criteria for determining the categories of trains for the transport of passengers depending on their speed and distance of travel*. Order of the Ministry of Transport of Russia dated July 18, 2007 No. 99. URL: <https://base.garant.ru/191631> (retrieved on 14.01.2021) (in Russ.).

11. *On the numbering of trains for the timetable*. Order of the JSC "Russian Railways" dated April 5, 2014 No. 859r. URL: <https://base.garant.ru/70638506> (retrieved on 14.01.2021) (in Russ.).

12. *Instructions for calculating the available capacity of railways*. Approved by the JSC "Russian Railways" November 10, 2010. Moscow, Tekhinform Publ., 2011, 289 p. (in Russ.).

13. Rzhnevskiy S.V. *Matematicheskoe programmirovaniye: ucheb. posobie* [Mathematical programming: Textbook]. St. Petersburg,

Lan' Publ., 2019, 608 p. URL: <https://e.lanbook.com/book/123692> (retrieved on 14.01.2021).

14. Mikhalevich V.S., Volkovich V.L. *Vychislitel'nye metody issledovaniya i proektirovaniya slozhnykh sistem* [Computational methods of research and design of complex systems]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 288 p.

15. Nikolaev K.Yu. *Vybor poligona i parametrov primeneniya tekhnologii "tramvay—poezd" v Rossii* [Choice of the operation area and the parameters of the application of the technology "tram—train" in Russia]. Transport of the Russian Federation, 2020, Vol. 90, no. 5, pp. 40–44.

ABOUT THE AUTHORS

Andrey F. BORODIN,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, JSC "IERT"; Head of the Department, FGAOU VO "RUT" (MIIT)

Il'dar F. MUSTAFIN,

Leading Engineer, JSC "IERT"; Post-Graduate, JSC "VNIIZHT"

Konstantin Yu. NIKOLAEV,

1st Category Engineer, JSC "IERT"; Post-Graduate, FGAOU VO "RUT" (MIIT)

Received 25.01.2021

Accepted 17.03.2021

■ E-mail: constantsurety@gmail.com (K. Yu. Nikolaev)

For citation: Borodin A. F., Mustafin I. F., Nikolaev K. Yu. Principles for determining effective parameters for organizing train traffic in suburban-urban traffic, taking into account the differentiation of service classes // VNIIZHT Scientific Journal. 2021. 80 (2): 108–117 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-108-117>.

ПОДПИСКА

«Вестник ВНИИЖТ» ГДЕ подписаться?

Подписку на научно-технический журнал «Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» («Вестник ВНИИЖТ») можно оформить в любом почтовом отделении связи по Объединенному каталогу «Пресса России», том 1 или агентствах по распространению печатных изданий «Урал-Пресс», АРЗИ и др.

Подписной индекс журнала — 70116.

Также можно оформить подписку (годовую и полугодовую) на договорных условиях в редакции. Адрес редакции журнала: 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, тел.: +7 (495) 602-84-56, e-mail: journal@vniizht.ru. Информация о подписке размещена на сайте журнала www.journal-vniizht.ru.

Подписчики стран ближнего и дальнего зарубежья могут оформить подписку на журнал «Вестник ВНИИЖТ» в агентстве «Урал-Пресс» (Ural-Press, export@ural-press.ru).

Применение европейского опыта при замене гидрофторуглеродов в климатических установках на отечественном железнодорожном транспорте

И. М. МАЗУРИН¹, С. Н. НАУМЕНКО²

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет "МЭИ"» (ФГБОУ ВО «НИУ "МЭИ"»), Москва, 111250, Россия

² Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

Аннотация. Принятие Россией Кигалийской поправки к Монреальскому протоколу по веществам, разрушающим озоновый слой, поставило перед потребителями искусственного холода, в том числе и перед железнодорожным транспортом, очень непростую задачу — поиск приемлемой альтернативы выводимому из употребления хладону R134a и смесей на его основе. Учитывая, что на рынке отсутствуют равнозначные альтернативы этим веществам, предложено рассмотреть вопрос о применении широко известных и ранее используемых в климатической технике рабочих тел, опираясь на положительный опыт стран Европейского союза (ЕС). В статье выполнен анализ причин введенных запретов на использование гидрофторуглеродов, представлены механизм разрешенного законом применения в ЕС безопасных для человека и природы хладагентов и вариант дорожной карты по переводу климатических установок холдинга «РЖД» на хладон R22 и иные типы фторуглеродов в рамках действия Кигалийской поправки.

Ключевые слова: климатическая техника; хладагенты; гидрофторуглероды; Кигалийская поправка; Монреальский протокол; декарбонизация

Введение. Климатические установки — активно развивающийся инновационный сегмент инженерных систем зданий, сооружений и транспортных средств. Объем российского рынка климатической техники, по данным Ассоциации предприятий индустрии климата, за последние десять лет увеличился более чем в 10 раз и ежегодно растет с темпом 12–15% [1]. Значительный рост объясняется рядом причин. Во-первых, это возрастание требований к качеству жизни. Здоровый образ жизни становится не только личным выбором, но и во многих случаях частью «корпоративной культуры» работодателя. Во-вторых, это ухудшение качества окружающей среды вследствие урбанизации, автомобилизации и глобальных климатических изменений. Железнодорожный транспорт не является исключением. За последние годы в этой области существенно возросло оснащение как подвижного состава, так и зданий и сооружений климатическими установками, прежде всего установками кондиционирования воздуха (УКВ).

Положение на железнодорожном транспорте. Сегодня на железнодорожном транспорте эксплуатируется

более 500 тыс. УКВ и иных видов холодильных машин пароконденсационного типа, к которым относятся:

- УКВ пассажирских вагонов дальнего следования, моторвагонного и скоростного подвижного состава;
- УКВ кабин машинистов тягового подвижного состава;
- малые холодильные установки вагонов-ресторанов и кухонь скоростных поездов;
- климатические установки, размещенные в офисных зданиях и в помещениях железнодорожных вокзалов, а также прочих стационарных объектах холдинга.

Следует выделить пароконденсационные теплонасосные установки, множественное использование которых в технологических процессах ряда субъектов холдинга «РЖД» обозначено в Энергетической стратегии компании [2].

По экспертным оценкам, затраты электроэнергии, необходимые для работы климатических установок холдинга «РЖД», достигают одного млрд кВт·ч. Взятый страной курс на декарбонизацию, означающий снижение выбросов углекислого газа (CO₂) [3, 4], ставит перед необходимостью обеспечения эффективного использования климатической техники, которое главным образом зависит от термодинамических и эксплуатационных свойств применяемых в ней хладагентов [5].

Присоединение Российской Федерации к международным соглашениям в области климата (Монреальский протокол по веществам, разрушающим озоновый слой, Киотский протокол, Парижское соглашение и пр.) привели к последовательной замене традиционно используемых в транспортных установках энергетически эффективных рабочих тел, таких как R12 (группа хлорфторуглероды — ХФУ), а позднее R22 (группа гидрохлорфторуглероды — ГХФУ), хладагентами менее эффективными — гидрофторуглеродами (ГФУ). Последние используются в качестве альтернативы озоноразрушающим веществам, однако, не являясь озоноразрушающими веществами, ГФУ относятся к парниковым газам, которые

имеют высокий потенциал глобального потепления в диапазоне 121–14 800. Сегодня хладагенты именно этой группы применяются в климатической технике подвижного состава и стационарных объектах. К ним относятся R134a, R404a, R407c, R410a. В указанном тренде следует отметить и рассмотрение в АО «Федеральная пассажирская компания» (АО «ФПК») актуального вопроса о замене еще использующегося в значительной части парка УКВ хладагона R22 гидрофторуглеродами R417a, MCOOL22.

Кигалийская поправка. 15 октября 2016 г. в г. Кигали (Руанда) на 28-ом Совещании Сторон Монреальского протокола по веществам, разрушающим озоновый слой (Монреальский протокол), достигнуто соглашение о поэтапном сокращении потребления ГФУ. На сегодняшний день к поправке присоединилось 92 страны. Принятие Россией Кигалийской поправки к Монреальскому протоколу поставило перед потребителями искусственного холода, в том числе и перед железнодорожным транспортом, очень непростую задачу — поиск приемлемой альтернативы выводимому из употребления хладону R134a и смесей на его основе. Главным аргументом вводимого запрета на применение ГФУ, как следует из докладов Международной группы экспертов по изменению климата, является слишком долгая их жизнь в атмосфере, а потому и большое значение парникового эффекта. Следовательно, принятие указанной поправки должно способствовать снижению антропогенного воздействия на климат Земли и выполнению обязательств Российской Федерации, вытекающих из Рамочной конвенции ООН об изменении климата, Киотского протокола и Парижского соглашения. В соответствии с ней Российская Федерация обязана сократить объемы потребления ГФУ с 2020 г. на 5 %, с 2025 г. на 35 %, с 2029 г. на 70 %, с 2034 г. на 80 %, с 2036 г. на 85 %, в дальнейшем с неограниченной возможностью использовать ГФУ в объеме 15 % от базового уровня. Предполагается, что переходный период по отказу в будущем от применения ГФУ в Российской Федерации будет составлять около 20 лет, что позволит потребителям перейти на использование альтернативных хладагентов, в том числе природного происхождения.

Сложности при эксплуатации УКВ с ГФУ. Следует отметить, что в России практически отсутствует собственное производство ГФУ, а основным их экспортером является Китай. Кроме того, для всей группы ГФУ так и не созданы устройства для утилизации и рецикла, необходимые для повторного применения в климатических установках. Причиной этого является нестабильность ГФУ. Поскольку молекулы этой группы соединений состоят из фтора, углерода и водорода, а энергия связи водорода с углеродом (413 кДж/моль) меньше, чем энергия связи водорода с фтором (567 кДж/моль), то

водород при незначительных внешних воздействиях в компрессоре холодильного агрегата переходит от слабой связи с углеродом к более прочной связи с фтором [6, 7]. При этом образуются новые токсичные и агрессивные соединения, отличающиеся от первоначального состава по свойствам. После сбора из холодильных агрегатов при ревизии или ремонте вернуть эту группу соединений к первоначальному состоянию для повторного использования можно только теоретически.

Анализ причин запретов ХФУ, ГХФУ, ГФУ и поиск решения. В условиях реальной эксплуатации при ремонтах или ревизии холодильных агрегатов R134a, как и смеси на его основе с номерами выше 400, просто выпускают в атмосферу, в лучшем случае через фильтры для активных фторидов, чтобы не отравлять персонал. Зная, что в R134a фтора по массе 75 %, подобное расточительство на самом деле — главная причина запрета, поскольку фтор является исчезающим видом стратегического сырья. При его исчерпании мир останется без урана и алюминия, получать которые без фтора пока еще не научились. Надо отметить, что появление запретов на использование ХФУ было вызвано нарастающим количеством безотчетно используемых спреев с ХФУ в США и Европе в 70-е гг. прошлого века [8].

Кроме ХФУ под запрет попал и элегаз (SF₆), в котором содержится 78 % фтора. При этом оказалось, что в отличие от хладонов у элегаза нет альтернативы и заменить его в высоковольтных выключателях большей мощности нечем. Воздушные и маслonaполненные выключатели уже полвека назад прекратили выпускать в мире из-за низкой надежности и опасности пожаров, а вакуумные выключатели пригодны лишь для небольших мощностей. Поэтому на основании закона о защите прав потребителей элегаз сохранили в качестве разрешенного к применению вещества из-за отсутствия альтернативы, но при этом ввели обязательное условие по высокой герметичности газонаполненных высоковольтных аппаратов. Уровень потерь от негерметичности для них ограничен 1 % в год от начальной массы элегаза, заправленного в аппараты. При ревизии и ремонтах элегаз должен собираться с оговоренным уровнем потерь и подвергаться рециклу для повторного использования. Отметим, что элегазовые выключатели сегодня успешно применяются в филиале ОАО «РЖД» — компании Трансэнерго.

Это техническое решение в Европе и явилось условием использования фторсодержащих озоноопасных и парниковых газов в бытовых и торговых агрегатах, для которых на рынке не нашлось полных альтернатив запрещенным к применению веществам. Юридической основой такого решения является закон о защите прав потребителей.

Для холодильных агрегатов довольно сложно обеспечить условия по герметичности, сохранению

вещества и проведению последующего рецикла для повторного использования. Потери на уровне 1 % возможны только на агрегатах с герметичными компрессорами. Для полугерметичных компрессоров такой уровень потерь без доработки конструкции недостижим, поскольку изначально потери эмиссии хладагентов составляют не менее 15 % в год. Кроме того, необходимо иметь в распоряжении еще и оборудование для сбора и рецикла фторсодержащего хладагента, гарантирующее отсутствие выбросов в атмосферу. Это обязательное условие применения фторидов по санитарным нормам.

С другой стороны, отсутствие технологии, позволяющей работать с фторсодержащими хладагентами в оговоренных условиях, равно как и отсутствие герметичных машин, неизбежно заставляет потребителя искусственного холода переходить на безфторные природные хладагенты. Пока это аммиак и углеводороды. Возможны еще CO_2 , а также диоксид серы. Использование природных хладагентов в УКВ пассажирских вагонов дальнего следования ранее прогнозировалось как перспективное направление [9]. Накопленный в этой области опыт показывает, что такого рода хладагенты применялись в начале прошлого века, но при условии отсутствия человека рядом с работающей холодильной машиной, которая иногда взрывалась без видимых причин. Особенно часто взрывы случались с аммиачными установками. Сегодня для применения безфторных технологий сначала необходимо обучить и подготовить к работе обслуживающий персонал. Однако гарантии безопасной эксплуатации машин при их использовании пока нет. Последнее обстоятельство особенно важно для условий эксплуатации железнодорожного подвижного состава.

Для решения возникшей проблемы обратимся к зарубежному опыту. В 2014 г. опубликован Регламент ЕС № 517/2014 по использованию фторсодержащих парниковых газов [10], в котором представлена схема выхода из технического тупика, неизбежно возникающего из-за отсутствия альтернативы при каждом очередном запрете на фторсодержащие вещества по Монреальскому протоколу. Предложенная схема мало отличается от той, что в 90-е гг. прошлого века уже обсуждалась в качестве приемлемой для вводимых в обиход запретов по использованию ХФУ. На европейском рынке в свободной продаже имелось оборудование для утилизации и рецикла R12, но одновременно появился и хладон R134a от фирмы Дюпон, который ни в публикациях, ни в рекламе альтернативой R12 не назывался. Он действительно альтернативой и не был. Его называли заменителем, но не альтернативой! Он уступал R12 по цене, стабильности и коррозионным свойствам, энергопотреблению.

Не менее серьезные проблемы возникли и с пожаротушащими веществами. Пламягасящие бромфреоны,

которые запретили вообще без всяких оснований, также не имеют альтернатив, хотя на их замену предложили не только ГФУ (R23 и R125), но и фторуглеродные соединения, такие как C3F8 (R218), C4F10 (R31-10), и фторированный йод C3F7I. Однако реальное применение перечисленных веществ показало полную непригодность ГФУ из-за их нестабильности и начала разложения уже при 100 °C в контакте с малоуглеродистой сталью. Это отмечено одним из авторов при испытаниях R125 [11]. Фторуглероды, хотя и термически стабильны вплоть до 550 °C и безопасны для человека, требуют большого количества пламягасящего вещества при тушении из-за более высоких значений огнегасящих концентраций [12]. Йодосодержащие фторированные соединения слишком дороги для использования в пожаротушащих системах. Таким образом, в пожаротушении полной альтернативы бромфреонам на рынке пока нет, а использование суррогатов для защиты жизни человека при пожаре принципиально недопустимо.

Кигалийская поправка к Монреальскому протоколу серьезно ускорила процесс поиска решения для застарелой проблемы выбора рабочих тел для энергетических циклов в холодильных машинах, равно как и гарантии безопасности человека в экстремальных условиях техногенных катастроф, связанных с пожарами. Важным подспорьем в технически грамотном решении этих задач является новый текст Конституции Российской Федерации, в котором восстановлен приоритет жизни человека, отсутствующий в обязательствах России по выполнению требований Монреальского протокола.

Восстановив приоритет человека, Россия пока еще выполняет обязательства по запретам на использование ХФУ и постепенный вывод из обращения ГХФУ и ГФУ.

Предлагаемое решение. Проблему замены ГФУ предлагается решить по-европейски: за счет освоения технологии полного сбора и рецикла фторсодержащих рабочих тел, которые использовались ранее. Среди них есть досрочно запрещенный к использованию R22, производство которого сохранилось в России, а право на использование этого хладагента по Монреальскому протоколу прекратится только в 2030 г. В этом случае в соответствии с законом о защите прав потребителей использование R22 при отсутствии альтернативы вполне законно и оправдано заботой о безопасности человека.

Дорожная карта. В реальном исполнении этой задачи для железнодорожного транспорта в первую очередь необходимо решить вопрос по возвращению R22 в климатические установки. При этом, помимо основной, будут решены как минимум три важные эксплуатационные задачи:

- снижено потребление энергии;

- увеличен межремонтный срок при работе агрегата;
- уменьшены эксплуатационные затраты.

Для достижения поставленных целей необходимо обеспечить полный сбор и рецикл R22 для повторного использования.

Учитывая тот факт, что малые и средние агрегаты для холодильных машин и УКВ комплектуются герметичными компрессорами, можно утверждать о принципиальной возможности решения задачи перехода с использования R134a и смесей на его основе на R22 с учетом европейского опыта [10].

Здесь за базу анонсируемого решения задачи по замене R134a предлагается использовать логическую схему ЕС, по которой Регламент разработан Комиссией ЕС, после чего утвержден Советом ЕС. При этом действие документа ограничено рамками ЕС.

Для условий России в Федеральном агентстве железнодорожного транспорта (ФАЖТ) вполне реально создание своей Комиссии и выпуск внутреннего документа, аналогичного указанному Регламенту, который необходимо будет направить для ознакомления в Минприроды и Минюст. Документ не будет противоречить ни Конституции Российской Федерации, ни законодательству стран — участниц Монреальского протокола, ни самому тексту Протокола.

Останется осуществить разработку и создание системы сбора и хранения, рецикла и аттестации качества фторсодержащих хладонов с учетом требований [10], которые следует ввести в техническое задание на разработку технологии и аппаратов для системы сбора и рецикла фторсодержащих газов, в том числе и для R22.

В итоге у железнодорожников появляется возможность самостоятельно выбирать фторсодержащие рабочие тела для заправки УКВ и иных холодильных установок исходя из приоритета их безопасности для человека. Данная возможность будет сохраняться до момента появления на рынке настоящих альтернатив запрещенным к применению хладагентам, указанным в приложении к Монреальскому протоколу.

Учитывая опыт поиска альтернатив R12 и R22, насчитывающий практически 35-летний период, надежд на появление веществ с аналогичным перечнем свойств практически нет. По этой причине из недорогих и пока еще выпускающихся в России хладонов остается R22, который хорошо изучен и подходит для использования в климатической технике, применяемой на железнодорожном транспорте.

Техническая сторона вопроса предельно проста. После оценки ФАЖТ актуальности вопроса и принятия решения о разработке системы сбора и хранения, рецикла и аттестации качества фторсодержащих хладонов поставленная задача решается в течение года.

В 70–80-е гг. прошлого века утилизацию и рецикл хладонов и элегаза выполняли на нескольких предприятиях Минэнерго, Минэлектротехпрома и Минлегпищепрома. Единственное отличие достигнутых в те времена результатов от норм Регламента ЕС заключается в полноте извлечения фторсодержащих веществ из аппаратов и в герметичности самих аппаратов и машин (потери были на порядок выше от требуемых сегодня по Регламенту ЕС). Но эта задача решается на основе российских комплектующих.

Выводы. 1. Принятие Российской Федерацией Кигалийской поправки к Монреальскому протоколу по веществам, разрушающим озоновый слой, поставило перед структурами холдинга «РЖД», использующими климатическую технику, задачу по замене применяемых в ней хладагента R134a и смесей на его основе, относящихся к группе ГФУ, альтернативным рабочим телом.

2. Ввиду отсутствия на рынке альтернатив применяемым ГФУ предлагается рассмотреть вопрос об организации целенаправленной работы по самостоятельному выбору приемлемых для климатической техники, используемой на железнодорожном транспорте, фторсодержащих хладонов на основе имеющегося европейского опыта.

3. На основе анализа отечественного законодательства и международных обязательств Российской Федерации по природоохранным проектам научно обоснована возможность перевода климатических установок, используемых в России, на прежние хладагенты, но при условии отсутствия на рынке альтернатив запрещаемым к применению веществам и обязательном условии полного сбора и рецикла фторсодержащих хладагентов. При этом наиболее подходящим по перечню физических свойств, цене и наличию на рынке предлагается хладон R22.

4. Техническая задача по разработке системы сбора и хранения, рецикла и аттестации качества R22 и некоторых других фторсодержащих хладонов может быть решена на базе отечественных технологий 80-х гг. прошлого века с незначительной модернизацией основных элементов оборудования в приемлемые сроки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Состояние и перспективы развития систем кондиционирования воздуха [Электронный ресурс]. URL: <https://www.unep.org/ozonaction> (дата обращения: 10.03.2021 г.).
2. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. № 2537р. М., 2016. 76 с. URL: http://www.rzd-expo.ru/innovation/resource_saving/energeticheskay_efektivnost/enstrat2030.pdf (дата обращения: 10.03.2021 г.).

3. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации до 2030 года [Электронный ресурс]: утв. Указом Президента Российской Федерации от 31 декабря 2015 г. № 683. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/40391> (дата обращения: 10.03.2021 г.).

4. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации до 2024 года [Электронный ресурс]: Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. № 204. URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/57425> (дата обращения: 10.03.2021 г.).

5. Науменко С. Н., Белова Н. В., Савельев К. О. Решение энергоэкологических проблем в сфере железнодорожной холодильной техники // Железнодорожный транспорт. 2012. № 3. С. 46–48.

6. Браун Т. Л., Лемей Г. Ю. Химия — в центре наук. В 2-х ч. Ч. 1 / пер. с англ. Е. Л. Розенберга. М.: Мир, 1983. 448 с.

7. Научные приоритеты использования альтернативных источников энергии на железнодорожном транспорте / А. Б. Косарев [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2020. Т. 79. № 5. С. 293–300. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-5-293-300>.

8. Мизун Ю. Г. Озонные дыры: мифы и реальность. М.: Мысль, 1993. 285 с.

9. Киселев И. Г., Кудрин М. Ю., Приймин В. П. О выборе хладагента для климатических установок пассажирского подвижного состава // Известия ПГУПС. 2014. № 3. С. 85–90.

10. О фторсодержащих парниковых газах и аннулировании Регламента (ЕС) № 842/2006 [Электронный ресурс]: Регламент (ЕС) от 16 апреля 2014 г. № 517/2014. URL: http://www.ozoneprogram.ru/upload/files/r/regulation_517_2014_rus.pdf (дата обращения: 10.03.2021 г.).

11. Герасимов Р. Л., Мазурин И. М. Термическая стабильность R218 (C3F8) и R31-10 (C4F10) при температурном воздействии // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53. № 6. С. 957.

12. Озонабезопасные альтернативы и заменители. Пропеллен-ты, хладагенты, вспениватели, растворители, огнегасящие средства / В. Г. Барабанов [и др.]. СПб.: Химиздат, 2003. 304 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

МАЗУРИН Игорь Михайлович,

д-р техн. наук, профессор, кафедра теоретических основ теплотехники, ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

НАУМЕНКО Сергей Николаевич,

д-р техн. наук, начальник отдела Центра электрификации и теплоэнергетики, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 15.03.2021 г., принята к публикации 20.04.2021 г.

Для цитирования: Мазурин И. М., Науменко С. Н. Применение европейского опыта при замене гидрофторуглеродов в климатических установках на отечественном железнодорожном транспорте // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 2. С. 118–123. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-118-123>.

European experience application in replacing hydrofluorocarbons in air conditioning units in domestic railway transport

I. M. MAZURIN¹, S. N. NAUMENKO²

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "MEI" (FGBOU VO "NIU "MEI"), Moscow, 111250, Russia

²Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC "VNIIZHT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. Adoption by Russia of the Kigali Amendment to the Montreal Protocol on substances that deplete the ozone layer posed a very difficult task for consumers of artificial cold, including rail transport, to find an acceptable alternative to the R134a freon and mixtures based on it, which is being phased out. Considering that there are no equivalent alternatives to these substances on the market, it was proposed to consider the use of widely known and previously used working fluids in climate technology, based on the positive experience of the European Union (EU) countries. The article analyzes the reasons for the bans on the use of hydrofluorocarbons, presents the mechanism for the legal use of refrigerants that are safe for humans and nature in the EU and a version of the roadmap for converting the climatic units of the Russian Railways holding to R22 freon and other types of fluorocarbons within the framework of the Kigali Amendment.

Keywords: air conditioning equipment; refrigerants; hydrofluorocarbons; Kigali Amendment; Montreal Protocol; decarbonization

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-118-123>

REFERENCES

1. *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya sistem konditsionirovaniya vozdukh* [Condition and prospects of development of air conditioning systems]. URL: <https://www.unep.org/ozonaction> (retrieved on 10.03.2021) (in Russ.).

2. *Energy strategy of the JSC "Russian Railways" for the period until 2020 and for the future until 2030*. Approved by order of the JSC "Russian Railways" dated December 14, 2016 No. 2537r. Moscow, 2016, 76 p. URL: http://www.rzd-expo.ru/innovation/resource_saving/energeticheskay_efektivnost/enstrat2030.pdf (retrieved on 10.03.2021) (in Russ.).

3. *Strategy of national security of the Russian Federation until 2030*. Approved by Decree of the President of the Russian Federation dated December 31, 2015 No. 683. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/40391> (retrieved on 10.03.2021) (in Russ.).

4. *On the national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation until 2024*. Decree of the President of the Russian Federation dated May 7, 2018 No. 204. URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/57425> (retrieved on 10.03.2021) (in Russ.).

5. Naumenko S. N., Belova N. V., Savel'ev K. O. *Reshenie energo-ekologicheskikh problem v sfere zheleznodorozhnoy kholodil'noy tekhniki* [Solution of energy-ecological problems in the field of railway refrigeration technology]. *Zheleznodorozhnyy transport*, 2012, no. 3, pp. 46–48.

6. Brown T. L., Lemay G. Yu. Chemistry — in the center of the sciences. In 2 parts, part 1. Translated from English by E. L. Rosenberg. Moscow, Mir Publ., 1983, 448 p.

7. Kosarev A. B., Rebrov I. A., Naumenko S. N., Barch A. V. *Nauchnye priority ispol'zovaniya al'ternativnykh istochnikov energii na*

zheleznodorozhnom transporte [Scientific priorities for the use of alternative energy sources in railway transport]. VNIIZHT Scientific Journal, 2020, Vol. 79, no. 5, pp. 293–300. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-5-293-300>.

8. Mizun Yu. G. *Ozonnye dyry: mify i real'nost'* [Ozone holes: myths and reality]. Moscow, Mysl' Publ., 1993, 285 p.

9. Kiselev I. G., Kudrin M. Yu., Priymin V. P. *O vybore khladagenta dlya klimaticheskikh ustanovok passazhirskogo podvizhnogo sostava* [On the choice of a refrigerant for climatic installations of passenger rolling stock]. Proceedings of Petersburg Transport University, 2014, no 3, pp. 85–90.

10. *O ftorsoderzhashchikh parnikovykh gazakh i annulirovanii Reglamenta (ES) № 842/2006. Reglament (ES) ot 16 aprelya 2014 g. № 517/2014* [On fluorinated greenhouse gases and cancellation of Regulation (EU) No. 842/2006. Regulation (EU) dated April 16, 2014 No. 517/2014]. URL: http://www.ozoneprogram.ru/upload/files/r/regulation_517_2014_rus.pdf (retrieved on 10.03.2021) (in Russ.).

11. Gerasimov R. L., Mazurin I. M. *Termicheskaya stabil'nost' R218 (C3F8) i R31-10 (C4F10) pri temperaturnom vozdeystvii* [Ther-

mal stability of R218 (C3F8) and R31-10 (C4F10) under temperature influence]. *Teplofizika vysokikh temperatur* [High temperature], 2015, Vol. 53, no. 6, p. 957.

12. Barabanov V. G., Blinova O. V., Zotikov V. S., Lizgunov S. A., Orlov A. P., Orlov G. D., Rusanov V. B., Samoylenko V. I., Trukshin I. G., Tselikov V. N. *Ozone-safe alternatives and substitutes. Ropellants, refrigerants, foaming agents, solvents, extinguishing agents*. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2003, 304 p.

ABOUT THE AUTHORS

Igor' M. MAZURIN,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Theoretical Foundations of Heat Engineering, FGBOU VO "NIU "MEI""

Sergey N. NAUMENKO,

Dr. Sci. (Eng.), Head of Department of the Center for Electrification and Heat Power Engineering, JSC "VNIIZHT"

Received 15.03.2021

Accepted 20.04.2021

■ E-mail: naumenko.sergey@vniizht.ru (S. N. Naumenko)

For citation: Mazurin I. M., Naumenko S. N. European experience application in replacing hydrofluorocarbons in air conditioning units in domestic railway transport // VNIIZHT Scientific Journal. 2021. 80 (2): 118–123 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-118-123>.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В АО «ВНИИЖТ»

Центр дополнительного образования (ЦДО) (лиц. № 2329 от 11.08.2016 г.) проводит повышение квалификации и профессиональную переподготовку слушателей по следующим направлениям:

- Анализ, моделирование бизнес-архитектуры и бизнес-процессов, использование процессного подхода в управлении организацией (для руководителей и специалистов)
- Проектирование, изготовление и приемка сварных конструкций железнодорожного подвижного состава, управление качеством в сварке рельсов, проведение аудита сварочного производства
- Построение энергосберегающих графиков движения поездов с использованием автоматизированной системы АПК ЭЛЬБРУС
- Изучение технологии транспортных процессов
- Транспортная логистика
- Изучения принципов построения и функционирования автоматизированной системы контроля за работой специального подвижного состава
- Изучение устройств, диагностики и средств контроля состояния железнодорожного пути
- Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт подвижного состава и устройств электроснабжения

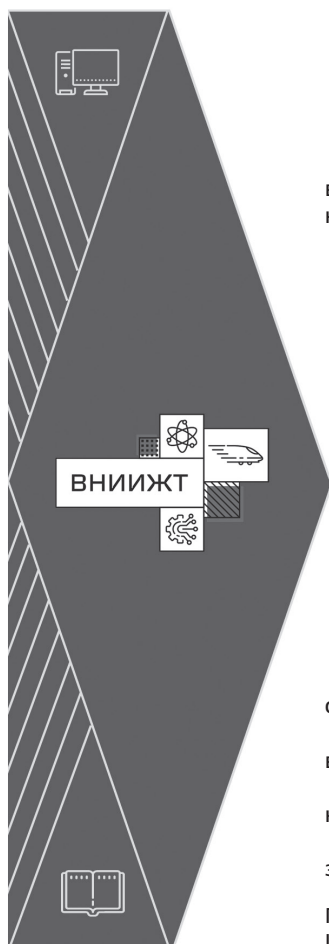
Программы обучения могут быть разработаны по инициативе заказчика с учетом профессиональной деятельности АО «ВНИИЖТ».

Обучение проводится как в очной форме, так и с применением дистанционных образовательных технологий.

По итогам освоения образовательных программ слушателям выдается документ о квалификации государственного образца.

Куратор ЦДО — Пархаев Алексей Александрович, кандидат социологических наук, заместитель Генерального директора по управлению персоналом и социальным вопросам.

По вопросам обучения обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская улица, д.10
Центр дополнительного образования. Тел.: +7 (495) 602-81-74, e-mail: shiryaeva.oksana@vniizht.ru



Правила оформления статей, публикуемых в журнале «Вестник ВНИИЖТ»

Статьи, направляемые в редакцию журнала «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта», должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Редакция журнала «Вестник ВНИИЖТ» принимает только ранее не публиковавшиеся авторские материалы — научные (практические) статьи, обзоры (обзорные статьи), соответствующие тематике нашего журнала.

2. Авторские материалы принимаются в распечатанном виде с пронумерованными страницами, в объеме 10–25 тыс. знаков, включая пробелы, на русском языке (набор через 1,5–2 интервала, размер шрифта (кегль) 14), а также в электронном виде (по электронной почте в формате текстового редактора MS Word for Windows 6.0/95/97/2000/XP/) и через сайт журнала. Для направления статьи через сайт необходимо пройти по ссылке <https://vestnik.vniizht.ru/jour/author/submit/1> и заполнить все поля формы «Отправить статью».

Текст статьи набирается с использованием минимального форматирования. Формулы следует набирать в формульном редакторе MS Word (Equation Editor) или MathType без принудительного увеличения или уменьшения размера символов. Простые формулы (или обозначения математических величин в тексте) необходимо набирать следующим образом: латинские символы — курсивом, русские буквы и функции, например $\sin$, — обычным шрифтом (прямое начертание), греческие — шрифтом Symbol (прямое начертание).

Все текстовые материалы, относящиеся к статье (кроме рисунков), желательно предоставлять в виде одного файла.

3. Наряду с текстом статьи авторы должны предоставлять в редакцию структурированную аннотацию (не менее 250 слов), ключевые слова (5–7), пристатейные библиографические списки (при этом автор отвечает за достоверность сведений, точность цитирований и ссылок на официальные документы и другие источники), оформленные в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5–2008. Пристатейные библиографические списки (список литературы) должны быть приведены в конце статьи, состоять не менее чем из 15 источников для научной статьи и не менее чем из 30 источников для обзора и содержать полные библиографические данные. Ссылки даются в оригинальной транслитерации в порядке упоминания ссылок в тексте. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Также необходимо указать номер УДК в строгом соответствии с Универсальной десятичной классификацией.

4. Рисунки и графики предоставляются на отдельных листах. Они должны быть выполнены в специализированных программах (Excel и т. п.) либо в виде сканированных изображений разрешением не менее 300 точек на дюйм (dpi) с учетом их конечного размера. В последнем случае к распечатке следует прикладывать оригиналы рисунков.

Обязательно предоставление иллюстративного материала в электронном виде (форматы tif, psx, bmp, jpg, cdr, ai, eps, wmf).

5. Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь заголовок. В таблицах обязательно указываются единицы измерения величин.

Ссылки в тексте на рисунки и таблицы обязательны. В конце статьи (после списка литературы) прилагается список подрисуночных подписей, в котором должны быть раскрыты все обозначения, использованные на рисунках.

6. Обозначения, принятые в статье, расшифровываются непосредственно в тексте и, кроме того, должны быть вынесены на отдельную страницу.

7. При упоминании иностранных фамилий в тексте необходимо давать их на языке оригинала в скобках после русского написания (за исключением общеизвестных фамилий, встречающихся в энциклопедии, и фамилий, на которые даются ссылки в списке литературы). При упоминании иностранных учреждений, фирм, фирменных продуктов и т. д. в русской транслитерации в скобках должно быть дано их оригинальное написание.

8. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (например — т. е., и т. д., и т. п.).

9. Статья должна быть подписана автором(-ами). Автору(-ам) необходимо на отдельной странице сообщить о себе на русском и английском языках следующие сведения: фамилия, имя, отчество, полный рабочий почтовый адрес, телефон, факс, адрес электронной почты, а также место работы, должность, ученое звание, ученую степень. Обязательно указать автора, с которым следует вести переписку. Вместе со статьей в редакцию направляется официальное разрешение на бланке организации о возможности опубликования научных результатов исследования в открытой печати.

10. Все статьи проходят рецензирование.

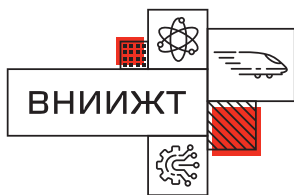
11. Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения и сокращения, не искажающие основного содержания статьи.

12. Требования к рекламным материалам: фото; текст на 1–2 стр; почтовый адрес, название организации, телефон/факс, электронный адрес (для дополнительной информации об использовании предлагаемого устройства, прибора, оборудования и др.) или готовый макет рекламного модуля в формате pdf (после предварительного согласования).

13. Плата с авторов за публикацию рукописей не взимается.

14. Материалы, присланные в редакцию, обратно не высылаются.

Справки по телефонам: (495) 602-81-10, 602-80-37, e-mail: journal@vniizht.ru



Аспирантура АО «ВНИИЖТ»

объявляет приём на обучение по программам подготовки научно-педагогических кадров:

- Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог;
- Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация;
- Управление процессами перевозок;
- Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (на железнодорожном транспорте);
- Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов;
- Материаловедение (на железнодорожном транспорте);
- Трение и износ в машинах;
- Экономика и управление народным хозяйством.

Прием документов с 1 по 21 сентября

Вступительные испытания:
иностранный язык; специальная дисциплина,
соответствующая направленности (профилю) программы

Период проведения вступительных испытаний
с 4 по 22 октября

Подробная информация на сайте АО «ВНИИЖТ»
www.vniizht.ru.



Адрес аспирантуры:
г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, каб. 304.
Тел. +7(495) 602-82-30

2 Great Shows 1 Exciting Rail Event

Book Your Stand Now

**Joining forces
to shape the future of UK rail**

In 2021 Railtex will play host to Infrarail.

The UK's most important events in the rail calendar will come together to form the ultimate show for the rail industry.

To be part of the most comprehensive rail exhibition of 2021 contact the team on **+44 (0)1727 814 400** or via email **uk-railhub@mackbrooks.co.uk**

**7-9 Sept 2021
NEC, Birmingham**

www.uk-railhub.com



RAILTEX

**15th International Exhibition of
Railway Equipment, Systems & Services**



INFRARAIL

**13th International Railway
Infrastructure Exhibition**