

Разработка лабораторного стенда для исследования нагруженности буксового узла

И.В. Ковригина¹, Р.С. Большаков²✉

¹Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита, Российская Федерация

²Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉bolshakov_rs@mail.ru

Резюме

В статье представлены результаты исследования изменения температуры буксовых узлов с подшипниками различного типа с учетом колеи железной дороги при движении по заданному участку с помощью разработанного лабораторного стенда. Произведено моделирование скорости движения на предполагаемом участке согласно единой режимной карте в соответствии с расположением прямых, кривых малого радиуса и возвышением наружного рельса. Применение заявленной лабораторной установки будет способствовать повышению достоверности результатов стендовых испытаний и обеспечит более точное воспроизведение эксплуатационных условий работы буксовых узлов колесных пар тележек грузовых вагонов. Используемая установка позволит задавать вертикальную и боковую нагрузки, а также моделировать скорость движения поездов в зависимости от нормативных показателей расположения и радиуса кривых, возвышения наружного рельса и скорости движения. Оценивается возможность анализа работоспособности буксовых узлов с помощью установления критических параметров для роликов и воздействия радиальных и осевых нагрузок. В работе приведены результаты сравнительных испытаний двух комплектов роликовых букс с цилиндрическими роликовыми и коническими подшипниками. Применяемый лабораторный стенд может быть использован при проектировании и модернизации испытательных установок, предназначенных для оценки температуры нагрева подшипников с комбинированным нагружением, а также при тестировании подшипников качения в условиях, максимально приближенных к реальным.

Ключевые слова

испытательная установка, буксовый узел, изменение температуры нагрева, грузовой вагон, роликовые и конические подшипники

Для цитирования

Ковригина И.В. Разработка лабораторного стенда для исследования нагруженности буксового узла / И.В. Ковригина, Р.С. Большаков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 2 (86). С. 24–34. DOI 10.26731/1813-9108.2025.2(86).24-34.

Информация о статье

поступила в редакцию: 23.05.2025 г.; поступила после рецензирования: 03.06.2025 г.; принята к публикации: 04.06.2025 г.

Designing of the laboratory stand for the research of axle box loading

I.V. Kovrigina¹, R.S. Bol'shakov²✉

¹Trans-Baikal Institute of Railway Transport – branch of the Irkutsk State Transport University, Chita, the Russian Federation

²Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉bolshakov_rs@mail.ru

Abstract

The article presents the results of studying the temperature change during the interaction of the axle box unit and bearings of various types, taking into account the track gauge of the railway when moving along a given section using the developed laboratory bench. The objective of the study is to determine the dependence of the heating temperature of the axle box units on the specified vertical and lateral loads. The speed of movement on the studied section was simulated according to a single mode map, taking into account the location of straight lines, small-radius curves and the elevation of the outer rail. The use of the declared laboratory setup will increase the reliability of the bench tests and ensure a more accurate reproduction of the operating conditions of the axle box units of wheelsets of freight car bogies. The used test setup will allow to set vertical and lateral loads, as well as to simulate the speed of trains taking into account the location and radius of curves, the elevation of the outer rail, the established speed of movement in accordance with the current instructions. The possibility of analyzing the operability of the axle box units by setting critical parameters for rollers and the impact of radial and axial loads is assessed. The results of comparative tests of two sets of roller boxes with cylindrical roller and tapered bearings are presented. The laboratory stand used can be utilized in designing and upgrading test instal-

lations intended for evaluating the heating temperature of bearings with combined loading, as well as in testing rolling bearings when simulating conditions close to real ones.

Keywords

test rig, axle box assembly, change in heating temperature, freight wagon, roller and tapered bearings

For citation

Kovrigina I.V., Bol'shakov R.S. Razrabotka laboratornogo stenda dlya issledovaniya nagruzhennosti buksovogo uzla [Designing of the laboratory stand for the research of axle box loading]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. No. 2 (86). Pp. 24–34. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.2(86).24-34.

Article info

Received: May 23, 2025; Revised: June 3, 2025; Accepted: June 4, 2025.

Введение

Железнодорожному транспорту в современных условиях требуется сохранить поступательное движение, в том числе с учетом возрастающих нагрузок на инфраструктурные элементы [1–3]. В этой связи необходимо повышенное внимание к существующим техническим объектам, характерным для железнодорожного транспорта.

При проектировании различных конструкций обязательно нужно производить инженерные расчеты [4–8]. Надежность конструкции обеспечивается тем, что она сохраняет прочность, жесткость и устойчивость при гарантированной долговечности. Ее экономичность в значительной мере определяется расходом материала, применением менее дефицитных конструкционных материалов, возможностью изготовления деталей по наиболее прогрессивным технологиям [9–13].

Необходимо учитывать, что эксперименты на реальных технических объектах достаточно затратны, что требует поиска и разработки подходов по проектированию и созданию испытательных установок [14–18].

При проведении испытаний на лабораторном стенде прикладываются как постоянные, так и временные внешние нагрузки (силы). Собственный вес вагона – постоянно действующая нагрузка, продольная нагрузка при прохождении имитируемого объекта в кривых малого радиуса – временная.

По характеру изменения силы во времени различают нагрузки статического и динамического характера. Статические (постоянные) нагрузки изменяют свою величину или точку приложения (направление) с очень небольшой скоростью, так что возникающими при этом ускорениями (силами инерции) можно пренебречь.

Взаимодействие между частями рассматриваемого тела характеризуется внутренними силами, которые возникают в теле под действием внешних нагрузок и определяются силами межмолекулярного воздействия. Эти силы сопротивляются стремлению внешних сил разрушить элемент конструкции, изменить его форму, отделить одну часть от другой. Учет всех факторов, действующих на узлы и агрегаты технических объектов различного назначения, является одним из важнейших направлений исследований в технических науках [17–20].

Цель работы заключается в определении зависимости температуры нагрева буксовых узлов от заданных вертикальных и боковых нагрузок с использованием лабораторного стенда.

Материалы и методы

Стенд для испытания подшипников букс колесных пар состоит из рамы, упорных стоек с упорной плитой, оси с буксами и испытуемыми подшипниками, устройства для статического радиального и осевого нагружений подшипников, двигателя, механизмов передачи и регулирования скорости вращательного j движения оси. Стенд позволит исследовать два типа букс с роликовыми подшипниками – коническими и касетного типа (рис. 1).

Стенд (см. рис. 1) имеет основание 1, приваренные к нему тумбу электродвигателя 2 и тумбу 3 крепления опорной буксы 4. Места сварных швов на стенде обозначены сочетанием «СШ». Также к основанию приварены четыре фланца с резьбой 5 для крепления четырех упорных стоек 6. Сверху к упорным стойкам 6 прикручена упорная плита 7. Для создания радиальной нагрузки на испытуемую буксу 17 сверху установлен домкрат 16. В спорную буксу вставлена ось 8 для установки испытуемой буксы. На две передние упорные стойки уста-

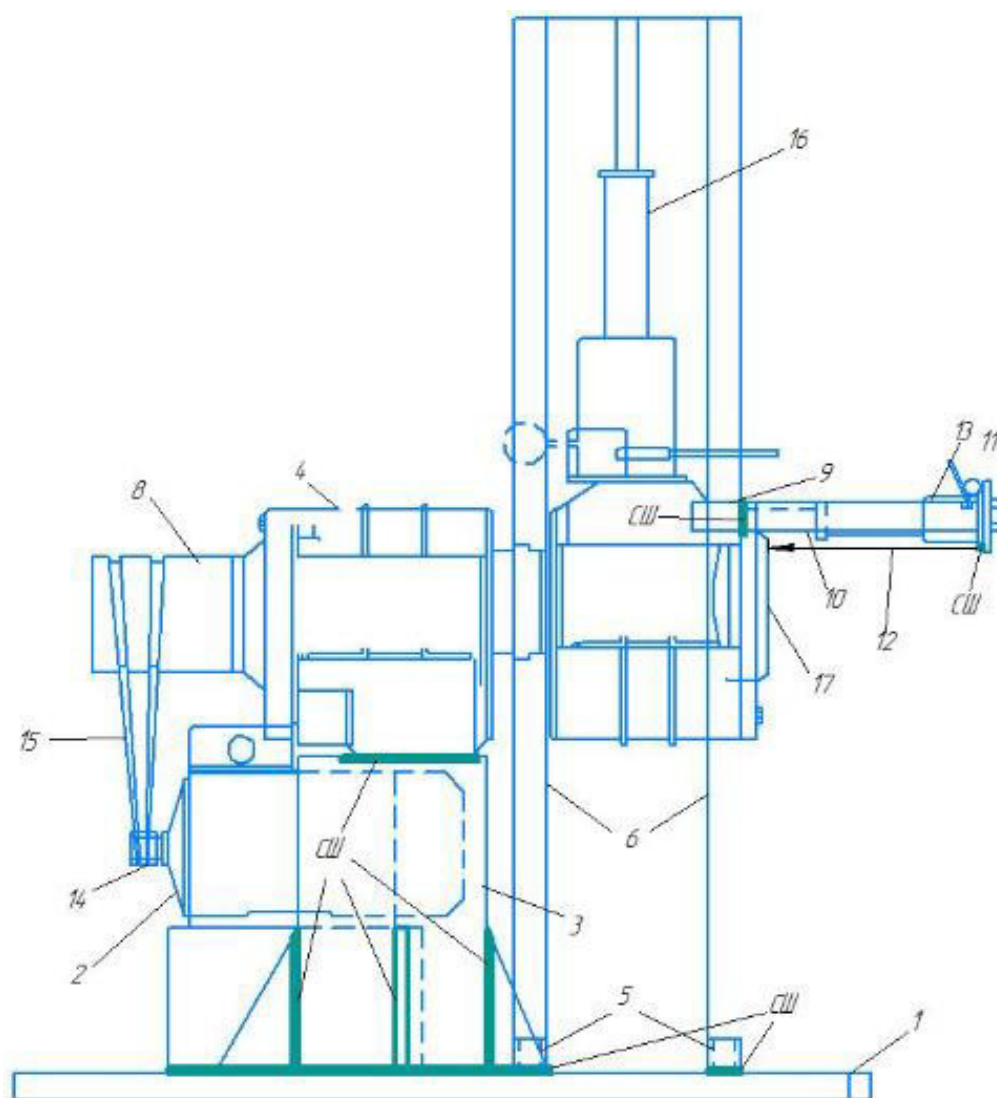


Рис. 1. Детализовка лабораторного стенда
Fig. 1. Detailed view of the laboratory stand

новлены регулируемые по высоте крепления 9. К креплениям приварены стержни 10 с прикрученной упорной плитой 11 и полочкой 12. Для создания осевой нагрузки на испытуемую буксу в горизонтальном положении на полочку устанавливается второй домкрат 13, который упирается одной стороной в упорную плиту, а другой стороной в испытуемую буксу для создания осевой нагрузки. На вал электродвигателя установлен шкив 14 для клиновидного ременного привода 15, который обеспечивает передачу крутящего момента от электродвигателя к оси стенда.

При включении тумблера электропитания напряжение 720 В с частотой 50 Гц через автомат защиты сети (45А) подается на входные

клеммы универсального частотного преобразователя (УЧП). Затем включается сам УЧП. В зависимости от показания заданных параметров на дисплее УЧП переменный трехфазный ток напряжением 380 В с определенной частотой поступает на входные клеммы электродвигателя. Электродвигатель в свою очередь раскручивает ось стенда с заданной скоростью через ременную передачу. Ось, расположенная в опорной буксе, раскручивается до установленной скорости в исследуемой буксе, чем имитирует работу испытуемых подшипников. Домкрат, находящийся опорной частью на исследуемой буксе и своим штоком упирающийся в упорную плиту, имитирует радиальную нагрузку на ось. Второй домкрат, находящийся на полочке

в горизонтальном положении и упирающийся в верхнюю или нижнюю зону передней торцевой части корпуса буксы, имитирует своим давлением прохождение кривых участков пути.

Объектом испытаний является один буксовый узел колесной пары РУ 1-950-Г (черт. 100.10.000-8 СБ) с роликовыми цилиндрическими подшипниками с торцевым креплением гайкой М110 типа ТВU 130×250, изготовлен-

ные по ТУ ВНИПТ048-1-00 (рис. 2), установленный на ось лабораторного стенда.

Другой буксовый узел колесной пары РУ 1-957-Г (черт. 100.10.900-0 СБ) кассетного типа марки SKF размером 130×250×160 мм, изготовленный по ТУ SKF.СТВU.001-2010, установлен также на ось лабораторного стенда. Подшипник марки SKF размером 130×250×160 мм устанавливается в серийный корпус буксы грузовых

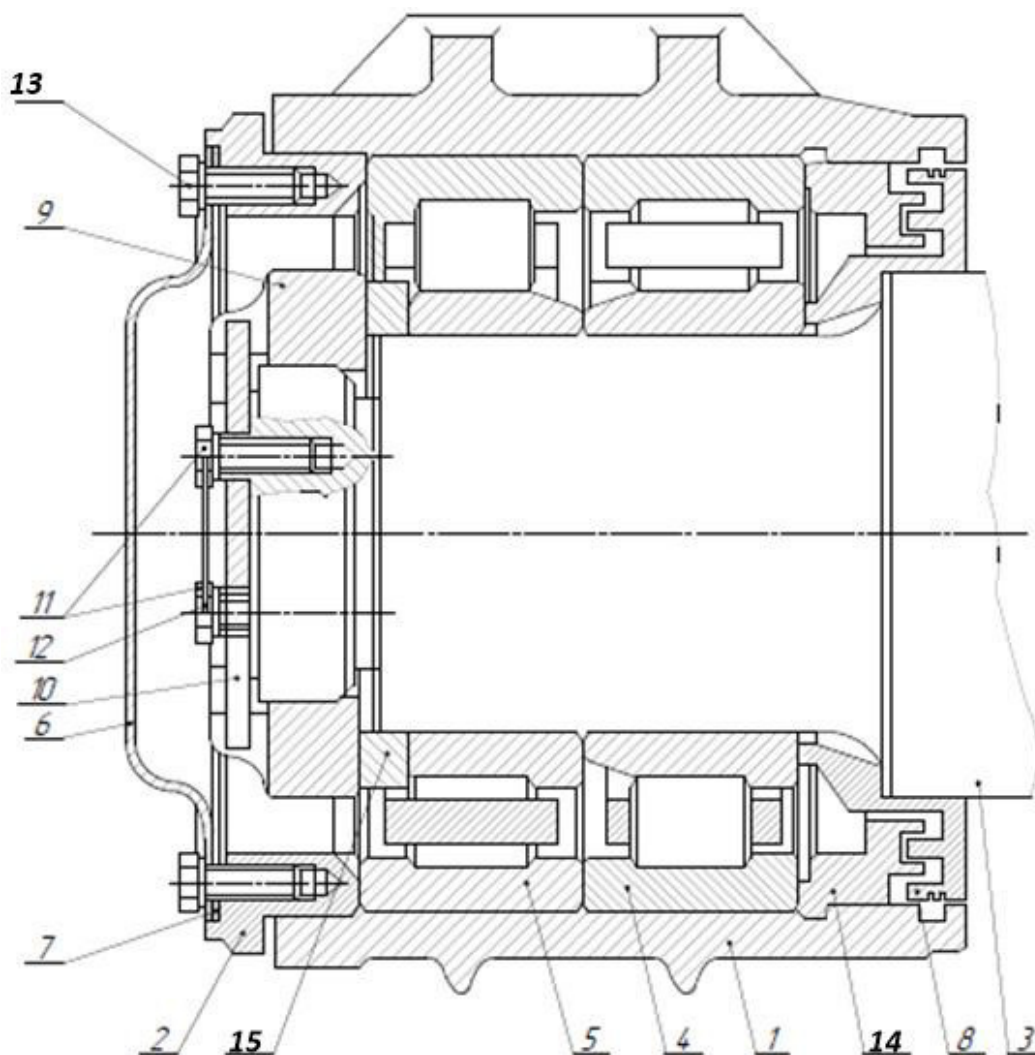


Рис. 2. Буксовый узел с двумя роликовыми цилиндрическими подшипниками с торцевым креплением гайкой М110:

- 1 – корпус буксы; 2 – крепительная крышка отъемного лабиринта корпуса буксы; 3 – колесная пара;
 4 – задний подшипник; 5 – передний подшипник; 6 – смотровая крышка; 7 – резиновое уплотнение; 8 – лабиринтное кольцо; 9 – торцевая гайка; 10 – стопорная планка; 11 – болт М12 стопорной планки; 12 – увязочная проволока; 13 – болт М12 смотровой крышки;
 14 – лабиринтное уплотнение; 15 – упорное кольцо переднего подшипника
- Fig. 2.** Axlebox unit with two cylindrical roller bearings with end screw M110:
 1 – axle box housing; 2 – fastening cover of the detachable labyrinth of the axle box housing; 3 – wheel-set;
 4 – rear bearing; 5 – front bearing; 6 – inspection cover; 7 – rubber seal;
 8 – labyrinth ring; 9 – end screw; 10 – locking strip; 11 – M12 bolt of the locking strip; 12 – tie-down wire;
 13 – M12 bolt of the inspection cover; 14 – labyrinth seal; 15 – thrust ring of the front bearing

вагонов. В соответствии с рис. 2 крепление с торца подшипника осуществляется шайбой и вместе с корпусом буксы и дополнительным лабиринтным кольцом (далее лабиринтом) напрессовывается на шейку и предподступичную часть оси. Корпус буксы закрывается крепительной и смотровой крышками (рис. 3).

Исследование проводилось на одном из маршрутов Забайкальской железной дороги.

Радиальная нагрузка прикладывается в трех точках поочередно (рис. 4) и является постоянной – равной 98 кН.

Осевая нагрузка является временной и в среднем равна 14 кН. В точке *A* осевая нагрузка прикладывается в четном направлении, имитируя осевую нагрузку при движении тележки грузового вагона в правом повороте. В точке *B* осевая нагрузка прикладывается в нечетном

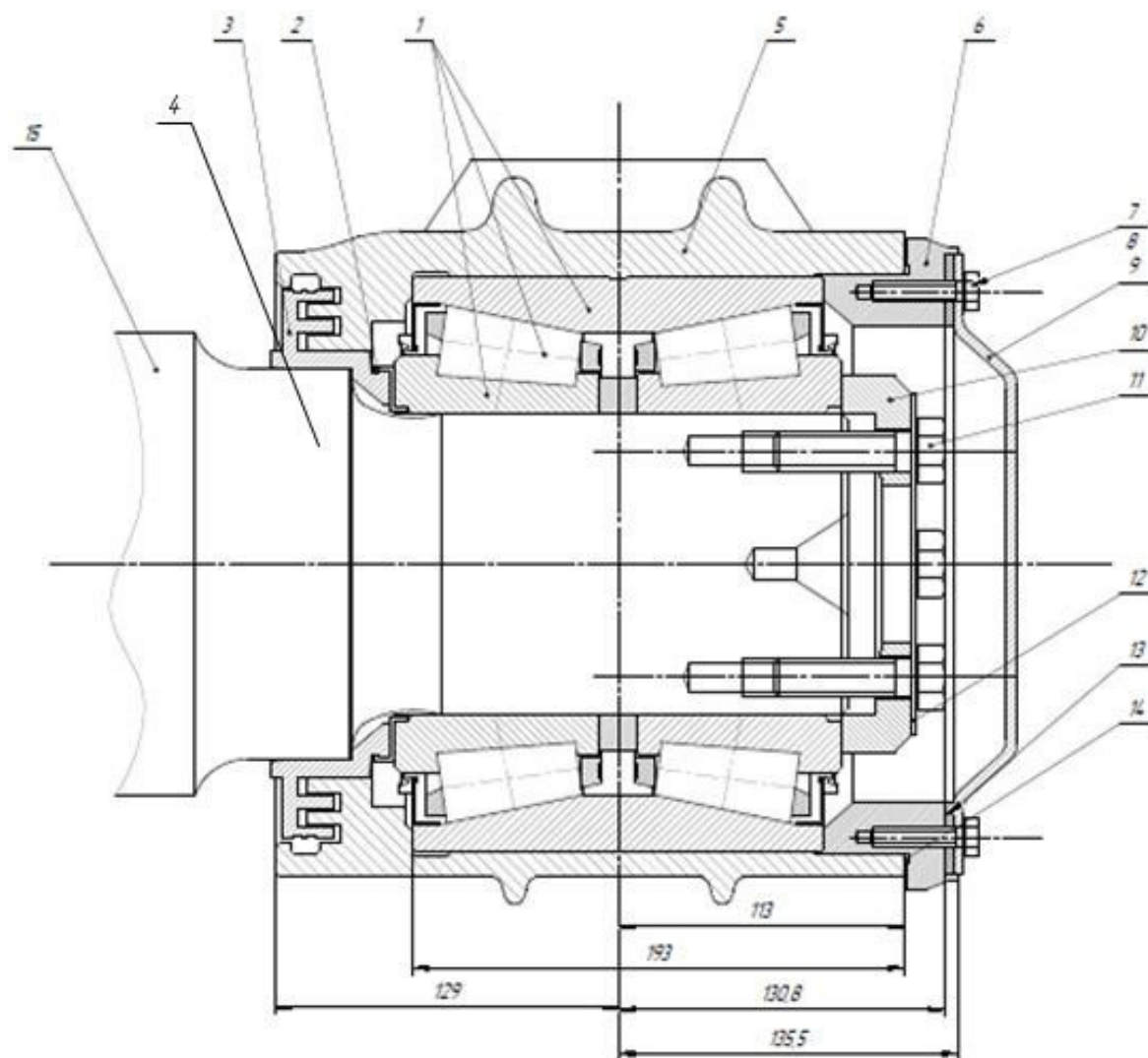


Рис. 3. Буксовый узел грузового вагона с коническими роликовыми подшипниками кассетного типа:

- 1 – подшипник TBU 130×250; 2 – прокладка полимерная; 3 – кольцо лабиринтное; 4 – ось РУ1Ш;
- 5 – корпус буксы; 6 – крепительная крышка; 7 – болт М12 для крепления смотровой крышки;
- 8 – болт М12 стопорной планки с пружинной шайбой (шайба наружная); 9 – крышка смотровая;
- 10 – болт М12 стопорной планки с пружинной шайбой шайба тарельчатая; 11 – болт М20 для крепления торцевой шайбы; 12 – стопорная шайба; 13 – прокладка; 14 – кольцо уплотнительное

Fig. 3. Axlebox unit of a freight car with tapered roller bearings of the cassette type:

- 1 – TBU 130×250 bearing; 2 – polymer gasket; 3 – labyrinth ring; 4 – RU1Sh axle; 5 – axle box housing;
- 6 – mounting cover; 7 – M12 bolt for fastening the inspection cover;
- 8 – M12 bolt of the locking plate with a spring washer (outer washer); 9 – inspection cover;
- 10 – M12 bolt of the locking plate with a spring washer, disc washer; 11 – M20 bolt for fastening the end washer;
- 12 – lock washer; 13 – gasket; 14 – sealing ring

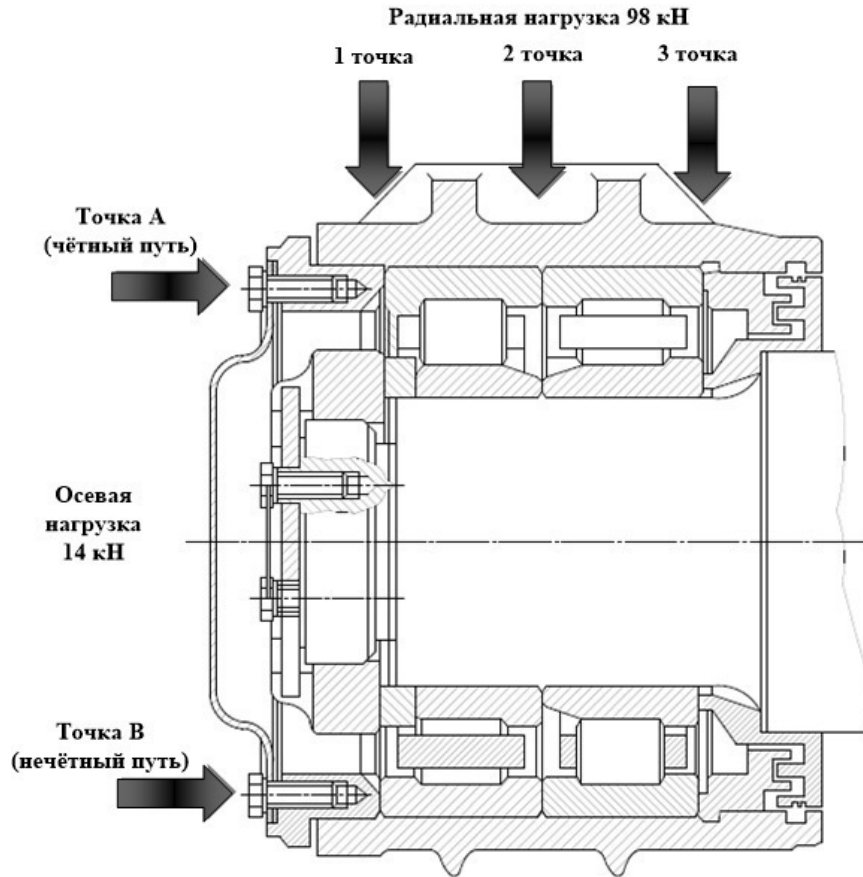


Рис. 4. Точки приложения нагрузки на буксовый узел
Fig. 4. Points of application of load on the axle box assembly

Таблица 1. Порядок нагружения подшипника
Table 1. Bearing loading order

Тип нагрузки Load type	Точки приложения нагрузки при моделировании движения тележки грузового вагона в повороте Load application points when simulating the motion of a freight wagon bogie in a turn					
Радialная Radial	1		2		3	
Осевая Axial	А	Б	А	Б	А	Б

направлении, имитируя осевую нагрузку при движении тележки рулевого вагона в левом повороте (рис. 4).

Порядок нагружения подшипников осуществляется по данным табл. 1.

Методика проведения исследований основана на использовании возможностей лабораторного стенда. Моделирование применяется в тех случаях, когда проведение реального эксперимента сопряжено с опасностью, высокими экономическими и временными затратами или если он неудобен в масштабе пространства и времени [1].

Принцип, на котором основывалось моделирование, базируется на последовательной обработке процессов, которые в реальном времени происходят параллельно [1]. В связи с этим алгоритмы моделирования имеют свои особенности:

- продвижение системы во времени и отслеживание временной координаты;
- обеспечение синхронной работы объектов, из которых состоит моделируемая система.

В настоящий момент имеются четыре основных принципа: регламентации событий (принцип dt); особых состояний; последова-

тельной проводки заявок; параллельной работой объектов.

Принцип dt состоит в том, что алгоритмом моделирования имитируется движение, т.е. изменение состояния системы в фиксированные моменты времени согласно (1):

$$t, t + dt, t + 2dt. \quad (1)$$

Для измерения температуры применялись два контактных цифровых термометра digital termo WT-2. Один определял температуру в верхней части корпуса буксового узла в заданных точках (1–3), а другой – температуру окружающей среды. Считывание информации о тепловом мониторинге производилось параллельно в режиме реального времени после прохождения каждого километра. Для измерения времени применялся секундомер с функцией записи общего времени и функцией записи одного отрезка времени поочередно до 100 отрезков.

Результаты исследований

Чтобы вычислить заданную скорость движения поезда на соответствующем участке пути и смоделировать ее на лабораторном стенде, необходимо:

– рассчитать обороты оси стенда в минуту для заданной скорости.

– найти опытным путем соответствующую частоту УЧП для заданных оборотов оси в минуту.

Рассчитаем обороты оси стенда в минуту ω для скоростей от 40 до 80 км/ч по формуле (2). Для этого за основу взято колесо с толщиной обода 55 мм и длиной окружности по кругу катания колеса 2 880 мм:

$$\omega = V \frac{S/t}{l_{\text{окр}}}, \quad (2)$$

где S – расстояние равное 1 км или 1 000 000 мм; t – время равное 1 ч или 60 мин; V – скорость, км/ч, $l_{\text{окр}}$ – длина окружности по кругу катания колеса 2 880 мм.

Опытным путем установлена соответствующая частота УЧП для заданных оборотов оси в минуту, для этого контактный тахометр ТА-1 прикладывали к центру оси стенда и достигали нужных оборотов, параллельно снимая показания с индикатора УЧП.

Для достоверного моделирования прохождения поездом 1 км на разных скоростях, найдем время его движения на 1 км в секундах dt по (3):

$$dt = \frac{t}{v'}, \quad (3)$$

где t – время (1 ч = 3 600 с); v – скорость, км/ч.

Результаты расчетов оборотов оси стенда в минуту с учетом времени прохождения поезда на 1 км пути приведены в табл. 2.

Таким образом, можно моделировать и имитировать движение по заданному маршруту прохождения кривых, регулировать скорость движения в пути, а также прилагать постоянную среднюю статическую радиальную нагрузку на испытуемый подшипник, соответствующую 98 кН, на шейку оси груженого вагона и временную осевую нагрузку 14 кН, что обеспечивает повышение достоверности стендовых испытаний подшипников.

Исследование роликовых подшипников

В целях исследования цилиндрические подшипники подобраны со следующими характеристиками:

1. На одну шейку оси подобраны подшипники с разницей радиальных зазоров подшипни-

Таблица 2. Основные параметры моделирования скорости

Table 2. Basic parameters of speed modeling

Скорость, км/ч Speed, km/h	Число оборотов оси стенда в минуту Number of revolutions of the stand axis per mi- nute	Частота универсального частотного преобразователя, % Frequency of the universal frequency converter, %	Время на 1 км пути, мин Time per 1 km of the track, min
40	231	15,00	1:30
50	290	18,27	1:12
60	347	20,84	1:00
65	375	22,60	0:55
70	405	24,26	0:51
75	434	25,86	0:48
80	463	27,45	0:45

ков 0,10 мм при допустимой не более 0,03 мм [2]. Увеличение этой разницы приводит к перекосу корпуса буксы и вызывает неравномерное распределение нагрузок по длине роликов.

2. Смазка из подшипника удалена (смазочный материал нужен, чтобы отделить тела качения от дорожек для предотвращения повреждений из-за микропоскальзывания).

3. Приложение нагрузки в точке *A*: *a* – радиальная постоянная в точке 2 – 98 кН; *b* – осевая постоянная – 14 кН; *v* – скорость – 80 км/ч.

С целью исследования подшипника созданы наихудшие условия для роликов и симулирована ситуация, когда смазка достигла температуры каплепадения (пластичная смазка начинает свободно стекать с образованием капель) и дальнейшая работа происходит без смазки. В подшипнике происходит процесс сухого трения.

При достижении слоев жидкости менее 0,1 мкм начинается процесс микропоскальзывания роликов, что ведет к неравномерному распределению нагрузок и подшипник переходит в режим заклинивания. В результате исследования сделан вывод, что температура буксы растет в 2 раза быстрее, чем в случае, когда используется смазка. Подшипники теряют свои механические свойства, что ведет к их **преждевременному** износу и разрушению. В связи резким увеличением температуры до 98 °С дальнейшие испытания были прекращены (рис. 5).

Исследование конических подшипников

Исследование конических подшипников без смазки не проводилось, так как формирование кассетного подшипника производится только на заводе-изготовителе, следовательно, в лабораторных условиях его переформирование

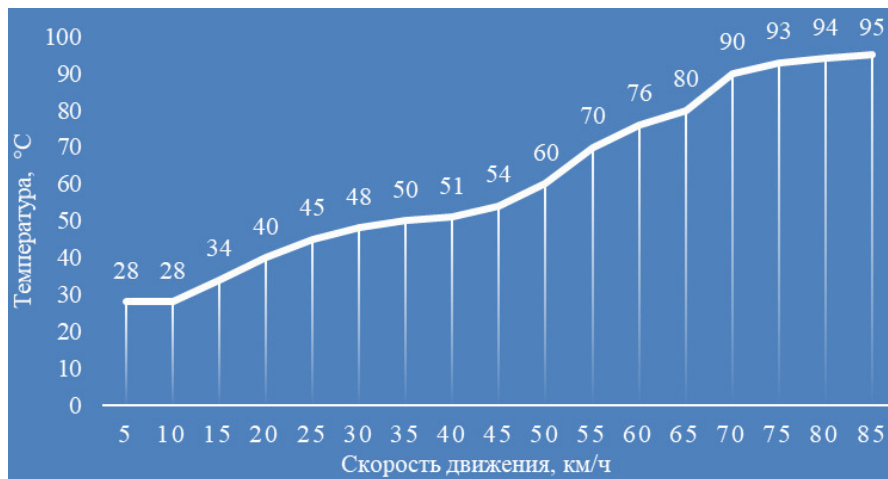


Рис. 5. Данные результатов исследования температуры роликовых подшипников без смазки
Fig. 5. Data from the results of the study of roller bearings temperature without lubrication

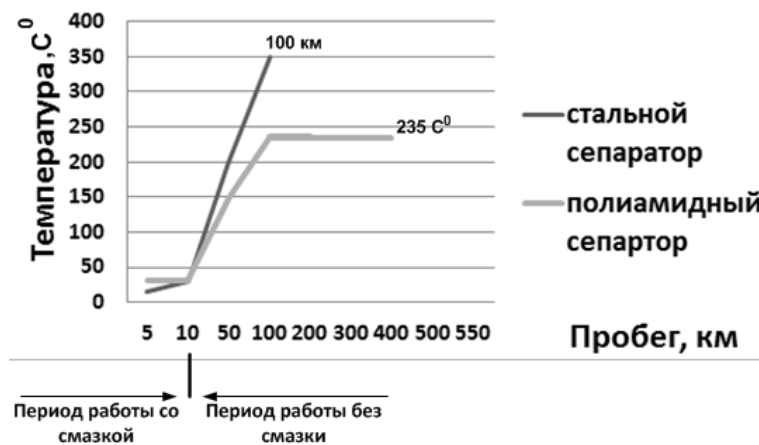


Рис. 6. Результаты проведения тестирования полиамидных и стальных сепараторов без смазки
Fig. 6. Results of testing polyamide and steel separators without lubrication

Таблица 3. Пример моделирования такта и сбора полученных результатов исследования
Table 3. Example of tact modeling and collection of obtained research results

Время t (ч/мин/с) Time t (h/min/sec)	Время dt (ч/мин/с) Time dt (h/min/sec)	Время Dt (ч/мин/с) Time Dt (h/min/sec)	Скорость v , км/ч Speed v , km/h	Путь h , км Distance h , km	Радиусы кривых r , м Curve radii r , m	Температура буксы T_b , °C Axle box temperature T_b , °C	Температура окружающей среды T_0 , °C Ambient temperature T_0 , °C	Температура, dT_b , °C Temperature, dT_b , °C
00:00:25	00:00:45	00:01:10	80	7 154	0	46,5	20	26,5
00:01:10	00:00:48	00:01:58	75	7 155	549	46,7	20	26,7
00:01:58	00:00:51	00:02:49	70	7 156	0	46,9	20	26,9
00:02:49	00:00:55	00:03:44	65	7 157	0	46,9	20	26,9
00:03:44	00:01:00	00:04:44	60	7 158	392	47	20	27
00:04:44	00:01:12	00:05:56	50	7 159	0	47,3	20	27,3
00:05:56	00:01:30	00:06:26	40	7 160	0	47,3	20	27,3

невозможно. В железнодорожном испытательном центре на территории завода в Нидерландах в 1995 г. проводилось тестирование полиамидных и стальных сепараторов, когда смазка из подшипника была удалена, при этом температура подшипника возросла очень резко, пока не достигла установившегося температурного режима. На этом уровне подшипник продолжал функционировать на протяжении 500 км, после чего тестирование завершилось (рис. 6).

Для испытания конических подшипников необходим счетчик времени (секундомер). На каждом цикле увеличиваем значение на величину шага во времени dt . Таким образом, изменения системы отслеживаются такт за тактом в заданные моменты: t , $t + dt$, $t + 2dt$ (табл. 3).

Заносим данные по времени t в режиме «часы, минуты, секунды» (ч/мин/с), скорости движения подвижного состава v (км/ч), пути h (км), радиусам кривых r (м) в зависимости от скорости движения dt .

Принцип dt является наиболее универсальным, так как применяется для очень широкого класса систем. Он прост в реализации, поскольку совпадает с пониманием человека о времени как о последовательном явлении, текущем с постоянным темпом и позволяет рассмотреть систему в динамике.

Испытания проводятся на стенде (см. рис. 1), который позволяет подать на исследуемый буксовый узел вертикальную нагрузку от веса вагона и осевую нагрузку в направлении оси колесной пары, появляющиеся в эксплуатационных условиях. Испытания основывались на единой режимной карте участка Забайкальской железной дороги с имитацией прохождения кривых различных радиусов, скорости движения по участку и уклонов пути (см. табл. 3).

Заключение

Таким образом, анализ полученных результатов исследований показывает достаточное совпадение значений температуры с реальными показателями с учетом используемой режимной карты. Также необходимо отметить правильность выбора методики моделирования.

Разработка лабораторного стенда позволит исследовать взаимодействие буксового узла с подшипниками различного типа и колеи железной дороги в лабораторных условиях, что при условии точной имитации эксплуатационных условий работы буксовых узлов колесных пар тележек грузовых вагонов обеспечит достоверность результатов стендовых испытаний.

Список литературы

1. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р. Доступ из справ.-прав. системы КонсультантПлюс в локал. сети.
2. Лapidус Б.М. Задачи опережающего развития российских железных дорог // Железнодорожный транспорт. 2023. № 2. С. 4–14.
3. Задачи и перспективы развития научных исследований в рамках сотрудничества между ОАО «РЖД» и Российской академией наук / Н.А. Махутов, Б.М. Лapidус, М.М. Гаденин и др. // Железнодорожный транспорт. 2023. № 7. С. 6–11.
4. Вериго М.Ф. Динамика вагонов. М. : ВЗИИЖТ, 1971. 175 с.

5. Коган А.Я., Никитин Д.А., Поleshchuk И.В. Колебания пути при высоких скоростях движения экипажей и ударном взаимодействии колеса и рельса. М. : Интекст, 2007. 168 с.
6. Вершинский С.А., Данилов В.Н., Хусидов В.Д. Динамика вагона. М. : Транспорт, 1991. 360 с.
7. Влияние структуры и механических характеристик колесных сталеи на изнашивание и режимы восстановления профиля колесных пар / В.С. Кушнер, А.А. Крутько, А.А. Воробьев и др. Омск : ОмГТУ, 2015. 224 с.
8. Митин Э.В., Сульдин С.П. Расчет прочности боковой рамы тележки грузового вагона при наложении вертикальной нагрузки // СТИН. 2024. № 10. С. 3–6.
9. Шаньгин Р.В. Надежность рельсов в различных условиях эксплуатации // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 2. С. 2–3.
10. Певзнер В.О., Гринь Е.Н. Совершенствование системы управления техническим обслуживанием пути // Железнодорожный транспорт. 2021. № 2. С. 54–59.
11. Голубев О.В. Повышение эффективности мониторинга рельсовой колеи // Путь и путевое хозяйство. 2023. № 10. С. 24–28.
12. Конон А.А. Определение собственных частот колебаний элементов железнодорожного пути под поездной нагрузкой и выбор упругих амортизаторов // Бюллетень результатов научных исследований. 2021. № 4. С. 57–64.
13. Ермоленко И.Ю., Рогозинская А.Л. Определение динамической нагрузки от колеса на рельс при извилистом движении // Тр. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2020. № 4 (53). С. 40–44.
14. О методике определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта : распоряжение ОАО «РЖД» от 27.12.2007 № 2459р. Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локал. сети.
15. Болотин М.М., Воротников В.Г. Отказы и срок службы грузового вагона // Мир транспорта. 2012. Т. 10. № 2. С. 152–161.
16. Петровых В.А., Иванова Т.В., Налабордин Д.Г. Оптимизация назначенного срока службы полувагона по критерию безубыточности эксплуатации // Вагоны и вагонное хозяйство. 2014. № 2. С. 40–42.
17. Введение в математическое моделирование / В.Н. Ашихмин, М.Б. Гитман, И.Э. Келлер и др. М. : Логос, 2005. 440 с.
18. Ковригина И.В., Рожкова Е.А. Влияние на безопасность движения качества ремонта вагонов // Образование – Наука – Производство : материалы III Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2019. Т. 1. С. 36–39.
19. Ковригина И.В. Определение межремонтного ресурса грузового вагона // Наука и образование транспорту. 2017. № 1. С. 45–48.
20. Ермошенко Ю.В., Фомина И.В., Трофимов А.Н. Обобщенные динамические связи, их формы и особенности взаимодействия с объектами вибрационной защиты // Изв. Юго-Западн. гос. ун-та. 2011. № 1 (34). С. 28–37.

References

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 27.11.2021 g. № 3363-r «Ob utverzhdenii Transportnoi strategii Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda» [Decree of the Government of the Russian Federation No 3363-r dated November 27, 2021 «On the approval of the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035»].
2. Lapidus B.M. Zadachi operezhayushchego razvitiya rossiiskikh zheleznnykh dorog [Tasks of advanced development of Russian railways]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2023, no 2, pp. 4–14.
3. Makhutov N.A., Lapidus B.M., Gadenin M.M., Titov E.Yu. Zadachi i perspektivy razvitiya nauchnykh issledovaniy v ramkakh sotrudnichestva mezhdru ОАО «RZhD» i Rossiiskoi akademiei nauk [Tasks and prospects for the development of scientific research within the framework of cooperation between JSC «Russian Railways» and the Russian Academy of Sciences]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2023, no 7, pp. 6–11.
4. Verigo M.F. Dinamika vagonov [Dynamics of wagons]. Moscow: VZIIzhT Publ., 1971. 175 p.
5. Kogan A.Ya., Nikitin D.A., Poleshchuk I.V. Kolebaniya puti pri vysokikh skorostyakh dvizheniya ekipazhei i udarnom vzaimodeistvii koleasa i rel'sa [Track fluctuations at high speeds of carriage movement and impact interaction of wheel and rail]. Moscow: Intekst Publ., 2007. 168 p.
6. Vershinskiy S.A., Danilov V.N., Khusidov V.D. Dinamika vagona [Dynamics of wagon]. Moscow: Transport Publ., 1991. 360 p.
7. Kushner V.S., Krut'ko A.A., Vorob'ev A.A., Gubenko S.I., Ivanov I.A., Kerentsev D.E. Vliyanie struktury i mekhanicheskikh kharakteristik koleznykh stalei na iznashivanie i rezhimy vosstanovleniya profilya koleznykh par [The influence of the structure and mechanical characteristics of wheel steels on the wear and recovery modes of the profile of wheelsets]. Omsk: OmGTU Publ., 2015. 224 p.
8. Mitin E.V., Sul'din S.P. Raschet prochnosti bokovoi rami telezhki gruzovogo vagona pri nalozhenii vertikal'noi nagruzki [Calculation of the strength of the side frame of a freight wagon under vertical load]. *STIN* [Machines. Tools], 2024, no 10, pp. 3–6.
9. Shan'gin R.V. Nadezhnost' rel'sov v razlichnykh usloviyakh ekspluatatsii [Reliability of rails in various operating conditions]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities], 2022, no 2, pp. 2–3.
10. Pevzner V.O., Grin' E.N. Sovershenstvovanie sistemy upravleniya tekhnicheskim obsluzhivaniem puti [Improvement of the track maintenance management system]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2021, no 2, pp. 54–59.
11. Golubev O.V. Povyshenie effektivnosti monitoringa rel'sovoi kolei [Improving the effectiveness of monitoring the rail track]. *Put' i putevoe khozyaistvo* [Track and track facilities], 2023, no 10, pp. 24–28.
12. Konon A.A. Opredelenie sobstvennykh chastot kolebaniy elementov zheleznodorozhnogo puti pod poezdnoi nagruzkoj i vybor uprugikh amortizatorov [Determination of natural oscillation frequencies of railway track elements under train load

and selection of elastic shock absorbers]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results], 2021, no 4, pp. 57–64.

13. Ermolenko I.Yu., Rogozinskaya A.L. Opredelenie dinamicheskoi nagruzki ot koleasa na rel's pri izvilistom dvizhenii [Determination of the dynamic load from the wheel on the rail during tortuous movement]. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Proceedings of the Rostov State Transport University], 2020, no 4(53), pp. 40–44.

14. Rasporyazhenie ОАО «RZhD» от 27.12.2007 № 2459r «О методике определения стоимости жизненного цикла и limitnoi tseny podvizhnogo sostava i slozhnykh tekhnicheskikh sistem zheleznodorozhnogo transporta» [Order of JSC «Russian Railways» dated December 27, 2007 No 2459r «On the methodology for determining the life cycle cost and the limit price of rolling stock and complex technical systems of long-distance transport»].

15. Bolotin M.M., Vorotnikov V.G. Otkazy i srok sluzhby gruzovogo vagona [Failures and service life of a freight wagon]. *Mir transporta* [World of Transport], 2012, no 2, pp. 152–161.

16. Petrovykh V.A., Ivanova T.V., Nalabordin D.G. Optimizatsiya naznachennogo sroka sluzhby poluvagona po kriteriyu bezubytchnosti ekspluatatsii [Optimization of the assigned service life of a gondola wagon according to the criterion of break-even operation]. *Vagony i vagonnoe khozyaistvo* [Wagons and wagon facilities], 2014, no 2, pp. 40–42.

17. Ashikhmin V.N., Gitman M.B., Keller I.E., Stolbov V.Yu., Trusov P.V., Frik P.G. Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie [Introduction to mathematical modeling]. Moscow: Logos Publ., 2005. 440 p.

18. Kovrigina I.V., Rozhkova E.A. Vliyanie na bezopasnost' dvizheniya kachestva remonta vagonov [Influence of the quality of wagon repair on traffic safety]. *Materialy III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo»* [Proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Conference «Education – Science – Production»]. Chita, 2019, Vol. 1, pp. 36–39.

19. Kovrigina I.V. Opredelenie mezhremontnogo resursa gruzovogo vagona [Determination of the inter-repair resource of a freight wagon]. *Nauka i obrazovanie transportu* [Science and education for transport], 2017, no 1, pp. 45–48.

20. Ermoshenko Yu.V., Fomina I.V., Trofimov A.N. Obobshchennye dinamicheskie svyazi, ikh formy i osobennosti vzaimodeystviya s ob'ektami vibratsionnoi zashchity [Generalized dynamic connections, their forms and features of interaction with vibration protection objects]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletins of the Southwestern State University], 2011, no 1 (34), pp. 28a–37.

Информация об авторах

Ковригина Инна Владимировна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры подвижного состава железных дорог, Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита; innabella84@mail.ru.

Большаков Роман Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: bolshakov_rs@mail.ru.

Information about the authors

Inna V. Kovrigina, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Transbaikal Institute of Railway Transport – Branch of the Irkutsk State Transport University, Chita; e-mail: innabella84@mail.ru.

Roman S. Bol'shakov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operation Work Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: bolshakov_rs@mail.ru.