

научно-технический

ISSN 2220-4245
журнал

ИЗВЕСТИЯ

№ 4(52)

2022

Транссиба



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. Овчаренко Сергей Михайлович – главный редактор, ректор ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
2. Галиев Ильхам Исламович – зам. главного редактора, президент ОмГУПС, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ (Омск).
3. Шантаренко Сергей Георгиевич – зам. главного редактора, проректор по научной работе ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
4. Алексеев Виктор Михайлович – профессор кафедры «Управление и защита информации» РУТА (МИИТА), д.т.н., профессор (Москва).
5. Бессоненко Сергей Анатольевич – заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
6. Ведрученко Виктор Родионович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
7. Глинка ТADEUSZ доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
8. Горюнов Владимир Николаевич – зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГУ, д.т.н., профессор (Омск).
9. Гуда Александр Николаевич – проректор по научной работе РГУПС, д.т.н., профессор (Ростов-на-Дону).
10. Зыкина Анна Владимировна – заведующая кафедрой «Прикладная математика и фундаментальная информатика» ОмГУ, д.ф.-м.н., профессор (Омск).
11. Исаков Александр Леонидович – зав. кафедрой «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
12. Ким Константин Константинович – заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» ПГУПС, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
13. Кобылов Александр Анатольевич – профессор кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
14. Косарев Александр Борисович – первый заместитель генерального директора АО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
15. Кузнецов Андрей Альбертович – заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
16. Лебедев Виталий Матвеевич – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
17. Никитин Александр Борисович – заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ПГУПС, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
18. Лившиц Александр Валерьевич – проректор по научной работе ИРГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
19. Лю Цзинькунь – доктор, профессор, заместитель декана Школы гражданского строительства университета Сунь Ятсена (Чжухай, Китай).
20. Парамонов Александр Михайлович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУ, д.т.н., доцент (Омск).
21. Сидоров Олег Алексеевич – профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
22. Смердин Александр Николаевич – проректор по инновационному развитию ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
23. Солоненко Владимир Гельевич – профессор кафедры «Магистральная инженерия» АЛТ, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
24. Файзибаев Шерзод Сабирович – профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ПТрВ, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
25. Харламов Виктор Васильевич – заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).

EDITORIAL BOARD

1. Ovcharenko Sergey Mikhailovich – chief editor, the rector of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
2. Galiev Ilkham Islamovich – deputy chief editor, the president of OSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science and engineering of the Russian Federation (Omsk, Russia).
3. Shantarenko Sergey Georgievich – deputy chief editor, vice-rector by scientific work of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
4. Alekseev Viktor Mikhailovich – professor of the department of Information Control and Protection of RUT, D. Sc., professor (Moscow, Russia).
5. Bessonenko Sergey Anatolevich – head of the department «Track Maintenance Management» of STU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
6. Vedruchenko Victor Rodionovich – professor of the department «Heat-power engineering» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
7. Glinka Tadeusz – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Poland).
8. Goryunov Vladimir Nikolaevich – head of the department «Power supply of industrial enterprises» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
9. Huda Alexander Nikolaevich – Vice-rector for scientific-work of RSTU, D. Sc., professor (Rostov-on-Don, Russia).
10. Zykina Anna Vladimirovna – head of the department «Applied mathematics and fundamental computer science» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
11. Isakov Alexander Leonidovich – head of the department «Railway and Highway Surveying and Design Engineering» of STU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
12. Kim Konstantin Konstantinovich – head of the department «Electrical Engineering and Heat Power Engineering» of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, D. Sc., professor (St. Petersburg, Russia).
13. Komyakov Aleksandr Anatolevich – professor of the department «Theoretical electrical engineering» of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
14. Kosarev Alexander Borisovich – senior deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
15. Kuznetsov Andrey Albertovich – head of the department «Theoretical electrical engineering» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
16. Lebedev Vitaliy Matveyevich – professor of the department «Heat-power engineering» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
17. Nikitin Aleksandr Borisovich – head of the department «Automation and telemechanics on railways» of PGUPS, D. Sc., professor (St. Petersburg, Russia).
18. Livshits Aleksandr Valerievich – vice-rector for scientific work of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
19. Liu Jiansun – Ph. D., professor of Sun Yat-sen University, the associate dean of the School of Civil Engineering (Zhuhai, China).
20. Paramonov Aleksandr Mikhailovich – professor of the department «Heat-power engineering» of OmSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
21. Sidorov Oleg Alexeevich – professor of the department «Power supply of railway transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
22. Smerdin Aleksandr Nikolaevich – vice-rector by innovation development of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
23. Solonenko Vladimir Gelyevich – professor of the department «Backbone Engineering» of ALT, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
24. Fayzibaev Sherzod Sabirovich – professor of the department «Wagons and wagon facilities» of TSTU, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
25. Kharlamov Viktor Vasilyevich – head of the department «Electrical machines and common electrotechnics» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

Иванченко Владимир Иванович – ответственный секретарь, к.т.н. (Омск).

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

- Волохов Г. М., Воронин Н. Н., Князев Д. А., Чунин В. В. Моделирование динамики подвижного состава с учетом упругости колесной пары как способ прогнозирования ресурса и живучести ее элементов..... 2
- Гребнев И. А., Пудовиков О. Е. К оценке влияния ветровой нагрузки на грузовой поезд..... 13
- Незевак В. Л., Дмитриев А. Д., Тарута П. В. Имитационное моделирование работы устройств накопления электроэнергии в послеаварийных и вынужденных режимах работы системы тягового электроснабжения..... 22
- Иванов П. Ю., Дульский Е. Ю., Хамнаева А. А., Пахомов В. В. Повышение эффективности тормозов грузового поезда за счет улучшения характеристик воздухораспределителя № 483..... 32
- Минаков В. А., Фоменко В. К. Исследование надежности и повышение эффективности работы гидростатического привода вентиляторов системы охлаждения дизелей локомотивов..... 41
- Муравьев Д. В., Артюхов К. В. Обеспечение точности сборки приспособления для контроля соосности моторно-осевых подшипников локомотивов методами размерного анализа..... 48
- Кузнецов Г. Ю., Логинова Е. Ю. Повышение технических характеристик автономных локомотивов литий-ионной тяговой батареей..... 57
- Абляимов О. С., Лесов А. Т. К исследованию эффективности локомотивов электрической тяги на участке Коканд – Андижан Узбекской железной дороги..... 66
- Киселев В. И., Федянин А. И. Совершенствование конструкции и технологии ремонта тяговых электродвигателей тепловозов..... 75
- Кузнецов В. Ф., Шантаренко С. Г., Савинкин С. В. Износ материала гребня бандажа колеса локомотива..... 82

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

- Хальфин Г. Р. Контроль усилий нажатия клемм скрепления PANDROL FASTCLIP на подоплесть рельсов..... 89
- Сычева А. В., Локтев А. А., Сычев В. П. Энергетический подход к решению задачи взаимодействия колеса и рельса для железнодорожного пути оперативного развешивания..... 96
- Лесов К. С., Абдулжабаров А. Х., Кенжалиев М. К. Технология усиления основной площадки земляного полотна в зонах рельсовых стыков с применением геотекстиля... 106
- Шапегтько К. В., Третьяков В. В., Максимов И. Н. Комфорт проезда пассажиров как показатель взаимодействия пути и подвижного состава..... 115
- Мусаткина Б. В., Кообар А. А. Оценка шума железнодорожного подвижного состава на территории жилой застройки..... 123
- Эргашев У. Э., Бегматов Н. И. Эффективность применения технологии замены рельсовых плетей с использованием навесных оснасток..... 132

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»
Учредитель и издатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Омский государственный университет путей сообщения
(ОмГУПС (ОмИИТ))»
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

Г. М. Волохов¹, Н. Н. Воронин², Д. А. Князев¹, В. В. Чунин¹

¹Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава
(АО «ВНИКТИ»), г. Коломна, Российская Федерация;

²Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С УЧЕТОМ УПРУГОСТИ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ КАК СПОСОБ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА И ЖИВУЧЕСТИ ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. Колесная пара и ее составные элементы (ось и колесо) являются объектами технического регулирования. Поэтому для установления назначенного срока службы по ресурсу в соответствии с ТР ТС 001/2011 и периодичности освидетельствования с учетом параметров живучести элементов подвижного состава в соответствии с РД ВНИИЖТ 27.05.01–2017 необходимо провести оценку эксплуатационной нагруженности, получаемой по результатам ходовых испытаний, с учетом прочностных характеристик детали, которые рассчитываются при проведении стендовых испытаний. В настоящее время для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) в различных машиностроительных конструкциях широкое распространение получил метод тензометрирования, который позволяет с высокой точностью оценить их работоспособность. Однако определение НДС колесной пары является не только сложной задачей ввиду постоянного вращения и перемещения колесной пары относительно тележки, но и затратной из-за применения специальных бесконтактных измерительных комплексов. Создание динамической модели посредством современных программных комплексов позволяет определять НДС элементов колесной пары путем создания динамических моделей как системы абсолютно твердых и упругих тел, связанных силовыми элементами и шарнирами. Для подтверждения адекватности получаемых параметров при моделировании проводят верификацию по результатам ходовых динамико-прочностных испытаний. Таким образом, с использованием полученной модели подвижного состава и пути можно проводить оценку ресурса, живучести и оптимизацию основных элементов подвижного состава. На примере модели грузового полувагона получена диаграмма зависимости распределения амплитуд динамических напряжений от частоты их возникновения в колесе и с учетом результатов ранее проведенных стендовых испытаний стандартных образцов и натурных колес, определен период живучести с момента зарождения трещины в колесе и до его излома, а также дана оценка коэффициента запаса по живучести.

Ключевые слова: динамическое моделирование, упругая колесная пара, напряженно-деформированное состояние, грузовой вагон, ресурс, живучесть.

Grigory M. Volokhov¹, Nikolay N. Voronin², Dmitry A. Knyazev¹, Vitaly V. Chudin¹

¹Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock (VNIKTI), Kolomna, the Russian Federation;

²Russian University of Transport (MIIT), Moscow, the Russian Federation

SIMULATION OF ROLLING STOCK DYNAMICS CONSIDERING THE ELASTICITY OF THE WHEELSET AS A PREDICTION METHOD FOR LIFE AND DURABILITY OF ITS ELEMENTS

Abstract. The wheelset and its components (the axle and the wheel) are subject to technical regulation. Therefore, in order to establish the assigned service life in accordance with TRCU 001/2011 (Technical Regulations of the Customs Union) and the examination frequency taking into account the durability parameters of rolling stock components in accordance with VNIIZhT RD 27.05.01–2017, it is necessary to assess the operational loading obtained from the running testing results, with respect to the part strength characteristics which are calculated during the bench tests. At present, to estimate the stress-strain state (SSS) in various machine-building structures, the strain measurement method is widely used, which allows to assess their performance with high accuracy. However, determining the SSS of a wheelset is not only a difficult task due to the constant rotation and movement of the wheelset relative to the bogie, but also expensive due to the employment of special non-contact measuring systems. Development of a dynamic model using modern software systems allows determination the stress-strain state of the wheelset elements by creating dynamic models as a system of perfectly rigid and elastic bodies connected by strength members and hinges. To confirm the adequacy of the parameters obtained in the simulation, verification is carried out according to the results of running dynamic strength tests. Thus, using the obtained model of the rolling stock and the track it is possible to make life and durability assessment as well as optimize the main rolling stock components. On the example of a freight gondola car model, a diagram of the

dependence of dynamic stress amplitude distribution on the frequency of the occurrence in the wheel has been obtained, and considering the results of the earlier bench tests of standard specimens and full-scale wheels the period has been determined for durability from the moment of crack initiation in the wheel up to its fracture, as well as the assessment of the safety factor for durability is given.

Keywords: dynamic simulation, elastic wheelset, strain-stress state, freight car, durability.

Разработка динамической модели экипажа и пути. На примере грузового полувагона на тележках 18-100 с колесными парами типа РУ1Ш и цельнокатаными колесами с плоскоконическими дисками по ГОСТ 10791–2011 [1], наиболее распространенного на сети железных дорог РФ, была создана динамическая модель полувагона с упругой колесной парой. На рисунке 1 показано распределение эквивалентных напряжений на одной из колесных пар от статической нагрузки груженого вагона.

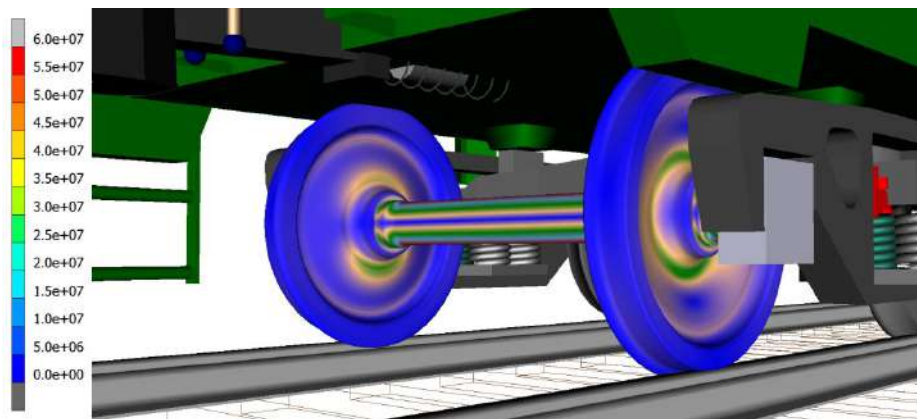


Рисунок 1 – Распределение эквивалентных напряжений, Па, в упругой колесной паре

Модель грузового вагона состоит из абсолютно твердых тел, связанных между собой шарнирами и силовыми элементами, и упругой колесной пары, связанной через интерфейсные узлы с твердыми телами (буксами). Контактное взаимодействие осуществляется за счет силовых элементов, описывающих контакт поверхности одного тела с отдельными точками другого. Данные элементы позволяют осуществлять моделирование зазоров между контактирующими элементами, вход и выход из контакта, режимы скольжения и сцепления силы трения, а также автоколебательные процессы. Система трехэлементной модели тележки описывает взаимодействие клина с фрикционной пластиной, процесс перераспределения сил трения при гашении поперечных и вертикальных колебаний. Геометрические, инерционные, жесткостные и упругодиссипативные параметры в модели соответствуют экипажу грузового вагона.

Упругая колесная пара может совершать произвольные пространственные перемещения как абсолютно твердое тело, при этом перемещения ее точек за счет упругих деформаций незначительны. Уравнения движения колесной пары выводятся с применением модального подхода. Упругие перемещения конечно-элементных узлов аппроксимируются множеством статических и собственных форм, рассчитанных в соответствии с методом Крэйга – Бэмптона [2].

Упругие перемещения узлов представляются произведением модальной матрицы на матрицу – столбец модальных координат:

$$x = \sum_{j=1}^n h_j w_j = H w, \quad (1)$$

где x – матрица-столбец узловых степеней свободы размера $N \times 1$;

N – число степеней свободы конечно-элементной модели;

h_j – формы упругого тела;

w_j – модальные координаты;

H – модальная матрица размером $N \times n$;

n – число используемых форм.

Таким образом, выполняются замена и значительное уменьшение числа используемых координат. Узловые координаты, число N которых может составлять несколько сотен тысяч, заменяются модальными координатами, число H которых обычно не превосходит сотни.

Если в точке K расположен узел, ее упругие перемещения d_k представляются в виде следующего произведения:

$$d_k = H_k w, \quad (2)$$

где H_k – часть модальной матрицы, соответствующая узлу K .

В соответствии с методом Крэйга – Бэмптона вначале выбираются внешние (интерфейсные) узлы в шарнирных точках и точка присоединения силовых элементов. Далее вычисляются статические формы от единичных смещений и поворотов в интерфейсных узлах и собственных форм при закреплении интерфейсных узлов. Число используемых собственных форм зависит от частотного диапазона, в котором оценивается динамика упругого тела, а также от конкретной конструкции колеса и выбирается с учетом наибольшей сходимости напряжений, рассчитанных методом Крэйга – Бэмптона, с напряжениями, полученными с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Интерфейсные узлы выбраны на концах оси. Примеры статической и собственной форм, рассчитанных в соответствии с методом Крэйга – Бэмптона, упругой колесной пары с увеличенным масштабом деформаций показаны на рисунке 2.

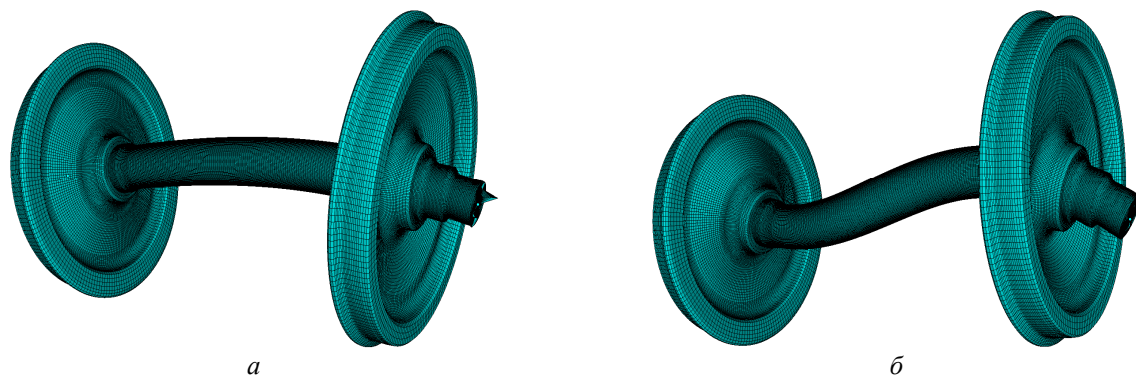


Рисунок 2 – Упругие формы колесной пары: статическая от единичного поворота в интерфейсных узлах вдоль горизонтальной оси (а) и собственная при закреплении интерфейсных узлов, соответствующая частоте 209 Гц (б)

Для оценки сходимости результатов расчета методом Крэйга – Бэмптона с МКЭ был произведен расчет максимальных напряжений от статической нагрузки груженого вагона в цельнокатаном колесе (таблица 1). По анализу результатов расчета можно сделать вывод об удовлетворительной сходимости результатов и возможности применения данного метода для динамического моделирования.

Таблица 1 – Сравнительная оценка напряжений в колесе

Напряжения		Максимальная величина напряжения по МКЭ, МПа	Максимальная величина напряжения по методу Крэйга – Бэмптона, МПа
Главные	σ_1	37,6	36,8
	σ_2	25,4	25,2
	σ_3	7,5	6,5
Осевые	σ_x	25,4	25,2
	σ_y	7,8	7,0
	σ_z	37,3	36,3
Эквивалентные	$\sigma_{\text{экв}}$	26,5	26,4

Математическое моделирование движения вагона в части установления случайных возмущений от неровностей железнодорожного пути проводилось в соответствии с указаниями ПНСТ 511–2020 [3].

Расчетные неровности являются общей характеристикой, состоящей из геометрических неровностей рельса, кругов катания колес и неравномерности характеристик пути по его длине. Осциллограммы вертикальных и горизонтальных неровностей для скоростей от 90 до 140 км/ч приведены на рисунке 3. В соответствии с ГОСТ 33211–2014 [4] для других скоростей движения указанные неровности применяют с масштабным коэффициентом.

В модели используются инерционные рельсы, представляющие собой твердые тела, имеющие по три степени свободы (две поступательные относительно поперечной и вертикальной оси и одну вращательную вокруг продольной оси). Твердые тела (рельсы) соединены с основанием силовыми элементами типа сайлент-блока, моделирующими подрельсовое основание.

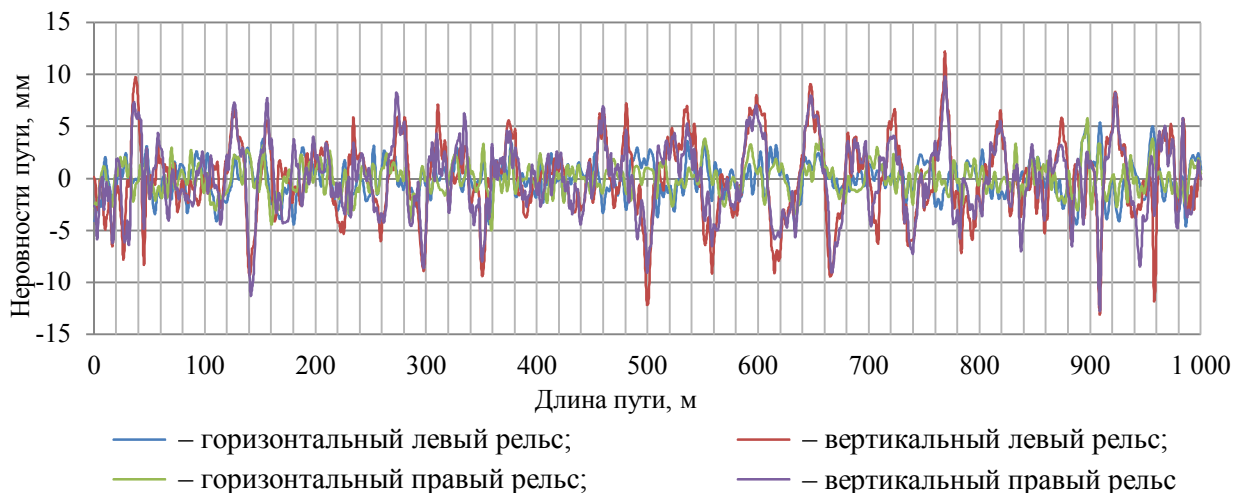


Рисунок 3 – Диаграммы расчетных неровностей пути

Математическое моделирование движения вагона с учетом упругости колесной пары. Верификация математической модели вагона проводилась по максимальным значениям, полученным при проведении ходовых динамико-прочностных испытаний, рамных сил и коэффициентов вертикальной динамики необрессоренных частей экипажа, которые взаимосвязаны с действующими в эксплуатации на колесо боковыми и вертикальными силами соответственно. Перед проведением испытаний экипажная часть грузового вагона была осмотрена и обмерена, по результатам установлено, что все размеры, зазоры соответствуют требуемым, поверхности катания колес колесных пар находились в хорошем состоянии, прокат и подрез отсутствовали.

Для измерения горизонтальных (рамных) сил, коэффициентов вертикальной динамики и прочностных показателей на боковых рамах и надрессорных балках тележек вагонов были наклеены тензорезисторы (рисунок 4), схема размещения которых приведена в источнике [5].



Рисунок 4 – Подготовка тележки вагона к испытаниям и наклейка на нее тензорезисторов

Измерения вертикальных и горизонтальных (поперечных) ускорений осуществлялись при помощи вибропреобразователей, которые устанавливались на кузове в районе пятника над каждой тележкой.

Для определения коэффициентов перехода от напряжений в боковых рамах тележек грузовых вагонов к рамным силам осуществлялась тарировка боковых рам.

Тарировка тензометрических схем для измерения горизонтальных (рамных) сил на вагонах выполнялась при помощи силового специального тарировочного устройства посредством приложения к боковой раме тележки в горизонтальной плоскости железнодорожного пути направленной перпендикулярно к оси пути нормированной силы. Сдвигая боковую раму тележки перпендикулярно оси пути в сторону от центра пути или раздвигая две боковые рамы с помощью тензометрической тяги, получали силу на измерительной схеме рамных сил, которая соответствовала силе, возникающей на измерительной тяге.

Испытания вагона на тележках 18-100 с буксовыми цилиндрическими роликовыми подшипниками в порожнем и груженом состояниях проводились на фиксированных участках пути Голутвин – Озеры Московской железной дороги: в прямых участках пути при скорости 90 км/ч, в кривых радиусом 300 и 600 м при скоростях 70 и 90 км/ч соответственно.

В ходе проведенных испытаний определялись рамные силы, вертикальные и горизонтальные ускорения кузова, коэффициенты вертикальной динамики обрессоренных и необрессоренных частей экипажа, коэффициент запаса устойчивости против схода колеса с рельса.

Коэффициенты динамики необрессоренных частей экипажа рассчитывались по напряжениям в боковинах тележек через коэффициенты, определенные в результате тарировок, коэффициенты динамики обрессоренных частей экипажа – по напряжениям в надрессорных балках тележек. Изменение главных напряжений в цельнокатаном колесе, рамной силы и коэффициента вертикальной динамики необрессоренных частей от времени при движении по прямому участку пути со скоростью 90 км/ч в груженом состоянии приведены на рисунках 5 – 7 соответственно.

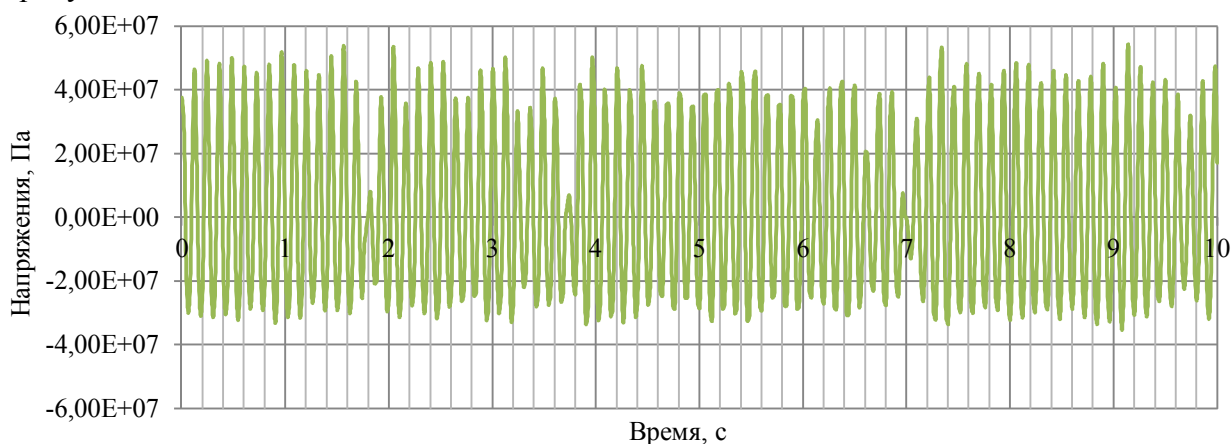


Рисунок 5 – Изменение главных напряжений в колесе при моделировании

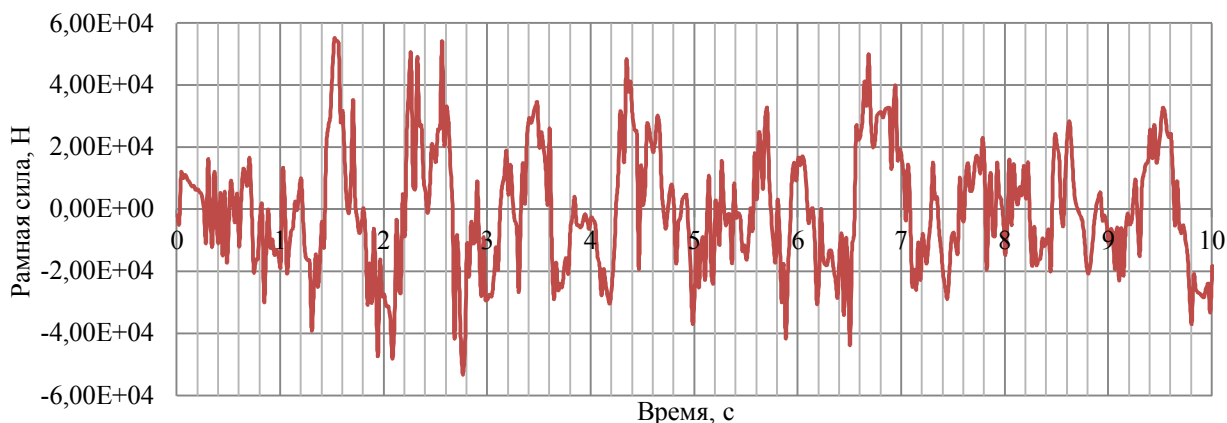


Рисунок 6 – Изменение рамной силы при моделировании

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

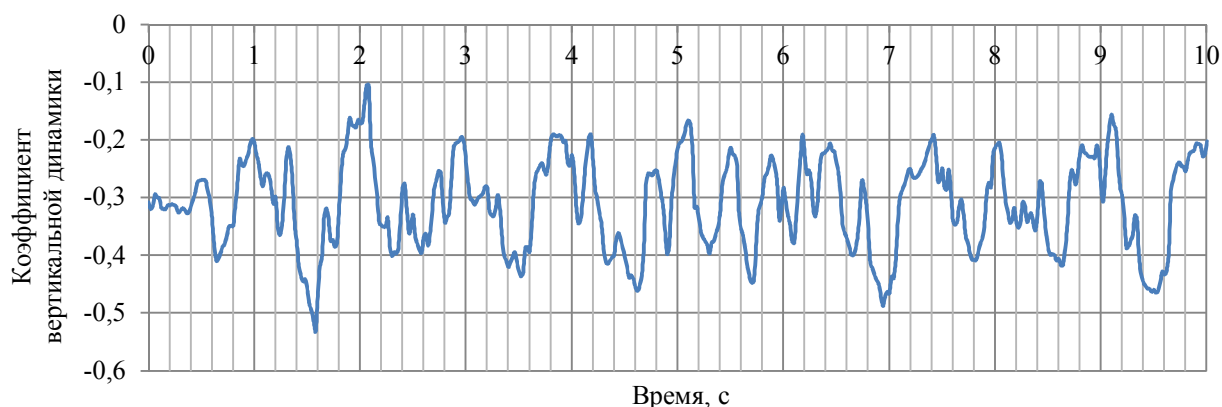


Рисунок 7 – Изменение коэффициента вертикальной динамики при моделировании

Максимальные значения динамических показателей вагона в порожнем и груженом состояниях при движении в прямых и кривых участках пути радиусом 600 и 300 м и их сравнение с результатами моделирования приведены в таблицах 2 и 3 соответственно.

Таблица 2 – Максимальные динамические показатели порожнего вагона

Показатель	Результаты ходовых испытаний	Результаты моделирования
Прямой участок при скорости 90 км/ч		
Рамные силы Y_p , кН	19,00	20,20
Коэффициент вертикальной динамики необрессоренных частей экипажа K_d	0,79	0,84
Кривой участок радиусом 600 м при скорости 90 км/ч		
Рамные силы Y_p , кН	21,20	24,90
Коэффициент вертикальной динамики необрессоренных частей экипажа K_d	0,98	0,99
Кривой участок радиусом 300 м при скорости 70 км/ч		
Рамные силы Y_p , кН	17,30	21,10
Коэффициент вертикальной динамики необрессоренных частей экипажа K_d	0,90	0,88

Таблица 3 – Максимальные динамические показатели груженого вагона

Показатель	Результаты ходовых испытаний	Результаты моделирования
Прямой участок при скорости 90 км/ч		
Рамные силы Y_p , кН	59,90	55,20
Коэффициент вертикальной динамики необрессоренных частей экипажа K_d	0,57	0,53
Кривой участок радиусом 600 м при скорости 90 км/ч		
Рамные силы Y_p , кН	62,00	67,80
Коэффициент вертикальной динамики необрессоренных частей экипажа K_d	0,61	0,66
Кривой участок радиусом 300 м при скорости 70 км/ч		
Рамные силы Y_p , кН	64,50	69,50
Коэффициент вертикальной динамики необрессоренных частей экипажа K_d	0,81	0,77

Таким образом, проанализировав данные таблиц 2 и 3, можно сделать вывод о том, что математическая модель вагона и рельсового пути адекватно описывает движение вагона в эксплуатации в груженом и порожнем состояниях при движении в прямых и кривых участках пути и имеет удовлетворительную сходимость с эксплуатацией по динамическим показателям.

Для определения динамических амплитуд напряжений в колесах колесной пары в соответствии с источником [4] моделирование проводилось на следующих участках пути:

прямом участке пути протяженностью не менее 1000 м со скоростями движения от 20 км/ч до конструкторской с шагом 10...20 км/ч;

кривом участке пути радиусом 300...400 м со скоростями движения от 10 км/ч до скорости, соответствующей непогашенному ускорению $0,7 \text{ м/с}^2$, с шагом от 10...20 км/ч;

кривом участке пути радиусом 600...800 м со скоростями движения от 10 км/ч до скорости, соответствующей непогашенному ускорению $0,7 \text{ м/с}^2$, с шагом от 10...20 км/ч.

Динамическое моделирование проводилось с вероятностью реализации участка пути и распределением скоростей движений по ГОСТ 33211–2014 [4] в следующем режиме движения: 60 % груженым составом, 40 % порожним с равной вероятностью движения как вперед, так и назад.

По результатам моделирования была получена диаграмма изменения динамических напряжений в колесе от его пробега при различных режимах движения и различных скоростях, после чего для схематизации результатов моделирования и расчета распределения амплитуд динамических напряжений от частоты их возникновения в соответствии с ГОСТ 33211–2014 [4] они были обработаны методом «дождя» по ГОСТ 25.101–83 [6]. Для формирования суммарной диаграммы амплитуд динамических напряжений полученные диаграммы были просуммированы с учетом вероятностей распределения движения по различным участкам пути с распределением скоростей движения (рисунок 8).

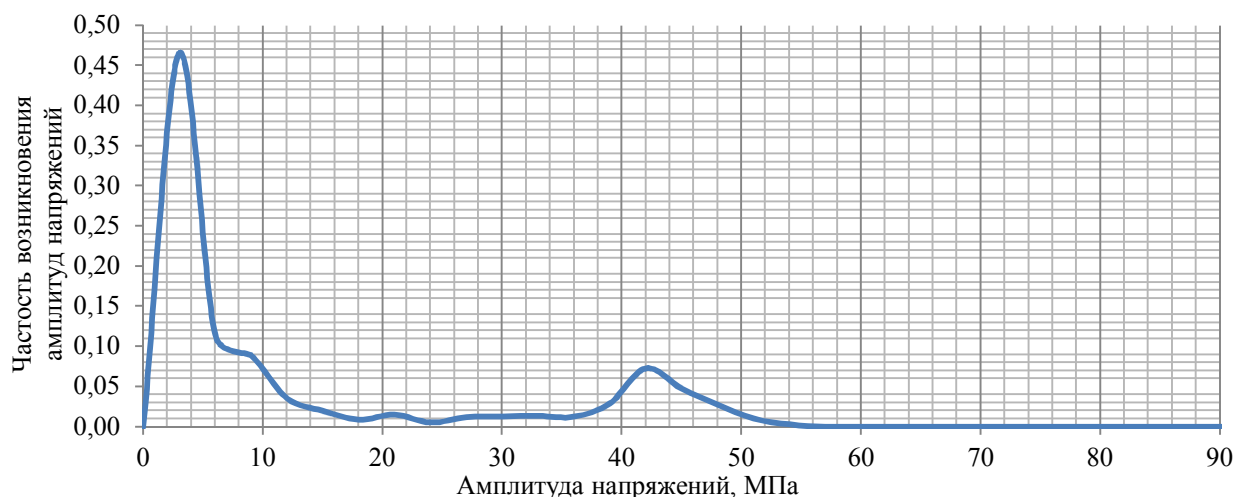


Рисунок 8 – Распределение динамических амплитуд напряжений в колесе

Анализ рисунка 8 показывает, что распределение амплитуд напряжений имеет два экстремума, один из которых соответствует средним значениям амплитуд напряжений при движении в прямых, другой – в кривых участках пути. Остальные значения соответствуют переходным и случайным процессам самоустановки колесной пары от воздействия неровностей рельса.

Прогнозирование живучести колес в эксплуатации. Полученную диаграмму при наличии результатов стендовых испытаний колес (кривая усталости и кривая скорости роста трещины) можно использовать для оценки ресурса и живучести колеса. Таким образом, используя полученную экспериментально диаграмму зависимости длины трещины от количества циклов нагружений и параметры кинетической диаграммы усталостного разрушения, полученные при испытании стандартных образцов [7] с заданной вероятностью разрушения 10^{-6} , а также уравнение Пэриса [8 – 11], можно построить график роста трещины в зависимости от числа циклов нагружений для колеса.

Уравнение Пэриса имеет вид:

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^n, \quad (3)$$

где $\frac{dl}{dN}$ – скорость роста трещины;

C и n – эмпирические коэффициенты (характеристики металла);

ΔK – размах коэффициента интенсивности напряжений (КИНа), МПа · м^{1/2}.

При значениях коэффициента асимметрии цикла $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} > 0$ ($\sigma_{\min}, \sigma_{\max}$ – соответственно

минимальные и максимальные напряжения цикла) размах КИНа ΔK вычисляется по формуле:

$$\Delta K = \sigma \sqrt{\pi l} f_{IK}, \quad (4)$$

где σ – амплитуда напряжений, МПа;

l – длина трещины, м;

f_{IK} – поправочная функция, зависящая от l .

При знакопеременных циклах $R < 0$, т. е. когда напряжения становятся сжимающими, трещина не является концентратором напряжений и выражение для определения КИНа теряет свой смысл, согласно работе [8] принимают $\Delta K = K_{\max}$.

При всех видах ремонта и освидетельствования колесных пар их элементы подвергают визуальному и неразрушающему контролю. Зону перехода от диска к ступице и диск колеса с внешней стороны (для колес с криволинейным диском) проверяют путем проведения визуального осмотра и неразрушающего контроля вихретоковым методом. В соответствии с техническими характеристиками на применяемые при контроле дефектоскопы следует, что с определенной вероятностью 3 мм дефект может быть не выявлен и колесо будет допущено в эксплуатацию. Таким образом, дефект 3 мм в приступичной зоне колеса с внутренней стороны (зона с максимальными амплитудами напряжений в эксплуатации) выбран как характерный размер начальной трещины.

При задании приращения количества циклов dN вычисляется приращение длины трещины для каждого уровня амплитуд динамических напряжений. Для порогового и критического значений КИНа, полученных при испытании образцов, находим размах этих значений и далее производим вычисления приращения длины трещины от количества циклов нагружений. При $\Delta K < \Delta K_{th}$ длина трещины составляет $l_i = l_{i-1}$, а количество циклов $N_i = N_{i-1} + dN_i$, при $\Delta K > \Delta K_{th}$ длина трещины $l_i = l_{i-1} + dl_i$, а количество циклов $N_i = N_{i-1} + dN_i$. По полученным значениям длины l_i и количества циклов N_i строится график роста трещины в зависимости от числа циклов нагружений для колеса, который приведен на рисунке 9.

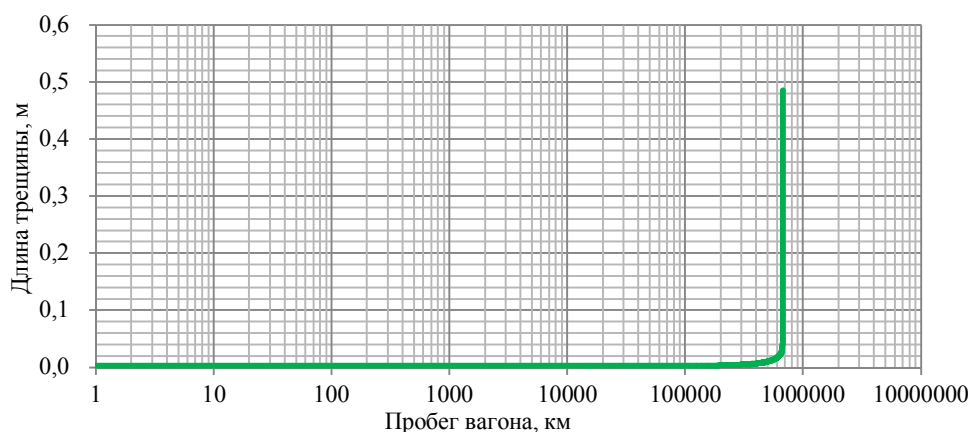


Рисунок 9 – Зависимость длины трещины в цельнокатаном колесе от пробега вагона

В начале диаграмм скорость роста трещины (тангенс касательной угла наклона кривой) низкая в связи с тем, что лишь наибольшие амплитуды динамических напряжений, которые имеют маленькую частоту и при которых $\Delta K > \Delta K_{th}$, вызывают приращение длины трещины.

С ростом трещины уровень амплитуд динамических напряжений, вызывающих приращение трещины, снижается, их частота увеличивается, а скорость роста увеличивается. В конце диаграммы, где угол наклона касательной стремится к 90° , все амплитуды динамических напряжений вызывают прирост трещины, причем значения размаха КИНа превышают циклическую вязкость разрушения ($\Delta K > \Delta K_{fc}$) и происходит хрупкий долом колеса.

Таким образом, пробег вагона от момента зарождения в колесе трещины до его излома составит 672 тыс. км. В соответствии с руководящим документом [12] и приложением к распоряжению ОАО «РЖД» [13] для грузовых вагонов установлены нормативные межремонтные пробеги 110, 160 и 210 тыс. км, при которых происходит освидетельствование колес колесных пар.

В расчете принималось, что физико-механические характеристики материала за срок службы не изменяются, материал коррозии и другим агрессивным средам не подвергается. С учетом ограниченного числа экспериментальных данных, вероятности увеличения их разброса вследствие невозможности учета всех влияющих факторов, а также возможности наличия дефектов по кругу катания колеса, увеличению жесткости пути и рельсовых стыков с понижением температуры для обеспечения надежности и безопасности эксплуатации колес принимаем минимально допускаемый коэффициент запаса по живучести $[K_{ж}] = 2$.

Следовательно, безопасность эксплуатации цельнокатаных колес подтверждается даже при максимальном периоде освидетельствования на пробеге в 210 тыс. км, при этом коэффициент запаса по живучести составляет 3,2.

Список литературы

1. ГОСТ 10791–2011. Колеса цельнокатаные. Технические условия. – С поправ. от 29.12.2016. – Введ. 01.01.2012. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 28 с. – Текст : непосредственный.
2. Craig R. R., Bampton M. C. Coupling of substructures for dynamic analysis. *AIAA Journal*, 1968, vol. 6, no. 7, pp. 1313–1319.
3. ПНСТ 511–2020. Вагоны грузовые. Расчетные неровности железнодорожного пути для оценки показателей динамических качеств грузовых вагонов расчетными методами. – Москва : Стандартинформ, 2021. – 24 с. – Текст : непосредственный.
4. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 54 с. – Текст : непосредственный.
5. ГОСТ 33788–2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 58 с. – Текст : непосредственный.
6. ГОСТ 25.101–83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статического представления результатов. – Москва : Стандартинформ, 1984. – 25 с. – Текст : непосредственный.
7. Сравнительная оценка скорости роста трещины в дисках литых и цельнокатаных колес / Г. М. Волохов, Э. С. Оганян, Д. А. Князев [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИКТИ. – 2020. – Вып. 103. – С. 41–53.
8. Броек, Д. Основы механики разрушения / Д. Броек. – Москва : Высшая школа, 1980. – 368 с. – Текст : непосредственный.
9. Paris P., Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws. *J. Basic Eng*, 1963, vol. 85, no. 4, pp. 528–534.

10. Шлюшенков, А. П. Механика разрушения и расчеты на прочность и долговечность элементов машин и конструкций с трещинами : учебное пособие / А. П. Шлюшенков. – Брянск : Брянский гос. техн. ун-т, 1996. – 232 с. – Текст : непосредственный.

11. Махутов, Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность / Н. А. Махутов. – Москва : Машиностроение, 1981. – 272 с. – Текст : непосредственный.

12. Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524 мм): РД ВНИИЖТ 27.05.01–2017. – 242 с. – Текст : непосредственный.

13. Приложение к распоряжению ОАО «РЖД» от 29.12.2012 № 2759р. Положение о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении. – Москва : ОАО «ВНИИЖТ», 2012. – 16 с. – Текст : непосредственный.

References

1. National Standard 10791–2011. Solid wheels. Specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 28 p. (In Russian).

2. Craig R.R., Bampton M.C. Coupling of substructures for dynamic analysis. *AIAA Journal*, 1968, vol. 6, no. 7, pp. 1313-1319.

3. National pre-standard 511–2020. Freight cars. Estimated railway track irregularities for assessing the indexes of dynamic properties of freight cars by calculation methods. Moscow, Standartinform Publ., 2021, 24 p. (In Russian).

4. National Standard 33211–2014. Freight cars. Requirements for strength and dynamic properties. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 54 p. (In Russian).

5. National Standard 33788–2016. Freight and passenger cars. Test methods for strength and dynamic qualities. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 58 p. (In Russian).

6. National Standard 25.101–83. Calculations and strength tests. Methods for mapping of random processes of loading of machine and structure elements and static representation of results. Moscow, Standartinform Publ., 1984, 25 p.

7. Volokhov G.M., Oganyan E.S., Knyazev D.A., Chunin V.V., Timakov M.V., Bubnov A.A. Comparative evaluation of crack growth rate in the discs of cast and solid wheels. *Vestnik VNIKTI – Bulletin of VNIKTI*, 2020, iss. 103, pp. 41-53 (In Russian).

8. Broyek D. *Osnovy mekhaniki razrusheniya* [Fundamentals of fracture mechanics]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1980, 368 p. (In Russian).

9. Paris P., Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws. *J. Basic Eng*, 1963, vol. 85, no. 4, pp. 528-534.

10. Shlyushenkov A.P. *Mekhanika razrusheniya i raschety na prochnost' i dolgovechnost' elementov mashin i konstruktsiy s treshchinami* [Fracture mechanics and calculations for strength and durability of machine and structure elements with cracks]. Bryansk, Bryansk State Technical University Publ., 1996, 232 p. (In Russian).

11. Makhutov N.A. *Deformatsionnyye kriterii razrusheniya i raschet elementov konstruktsiy na prochnost'* [Deformational fracture criteria and strength calculation of structure elements]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 272 p. (In Russian).

12. Regulatory document for repair and maintenance of wheelsets with axle box units of freight cars of 1520 (1524 mm) mainline railways 27.05.01–2017. Moscow, VNIIZhT Publ., 2017, 242 p. (In Russian).

13. Appendix to the order of OJSC «RZhD» dated December 29, 2012 No 2759r. Regulations on maintenance and repair system for freight cars admitted to circulation on public railway tracks in international traffic). Moscow, VNIIZhT Publ., 2012, 16 p. (In Russian).

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Волохов Григорий Михайлович

АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, 140402, Российская Федерация.

Доктор технических наук, заведующий отделением, АО «ВНИКТИ».

Тел.: +7 (496) 618-82-48, доб. 11-12.

E-mail: volokhov-gm@vnikti.com

Воронин Николай Николаевич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта».

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994, ГСП-4, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (495) 684-24-48.

E-mail: profvnn@mail.ru

Князев Дмитрий Александрович

АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, 140402, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, заместитель заведующего отделом, АО «ВНИКТИ».

Тел.: +7 (496) 618-82-48, доб. 15-77.

E-mail: knyazev-da@vnikti.com

Чунин Виталий Владимирович

АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»).

Октябрьской революции ул., д. 410, г. Коломна, 140402, Российская Федерация.

Заведующий лабораторией, АО «ВНИКТИ».

Тел.: +7 (496) 618-82-48, доб. 15-77.

E-mail: chunin-vv@vnikti.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Моделирование динамики подвижного состава с учетом упругости колесной пары как способ прогнозирования ресурса и живучести ее элементов / Г. М. Волохов, Н. Н. Воронин, Д. А. Князев, В. В. Чунин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 4 (52). – С. 2 – 12.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Volokhov Grigory Mikhailovich

JSC «Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»).

410, Oktyabrskoy Revolyutsii st., Kolomna, 140402, the Russian Federation.

Doctor Of Sciences in Engineering, head of division, JSC «VNIKTI».

Phone: +7 (496) 618-82-48, add. 11-12.

E-mail: volokhov-gm@vnikti.com

Voronin Nikolay Nikolaevich

Autonomous Educational Institution of Higher Education «Russian University of Transport (MIIT)».

9, b. 9, Obratsova st., Moscow, 127994, GSP-4, the Russian Federation.

Doctor Of Sciences in Engineering, professor, professor of the department «Technology of transport engineering and repair of rolling stock», RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 684-24-48.

E-mail: profvnn@mail.ru

Knyazev Dmitry Aleksandrovich

JSC «Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»).

410, Oktyabrskoy Revolyutsii st., Kolomna, 140402, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, deputy head of department, JSC «VNIKTI».

Phone: +7 (496) 618-82-48, add. 15-77.

E-mail: knyazev-da@vnikti.com

Chunin Vitaly Vladimirovich

JSC «Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKTI»).

410, Oktyabrskoy Revolyutsii st., Kolomna, 140402, the Russian Federation.

Head of laboratory, JSC «VNIKTI».

Phone: +7 (496) 618-82-48, add. 15-77.

E-mail: chunin-vv@vnikti.com

BIBLIOGRAFIC DESCRIPTION

Volokhov G.M., Voronin N.N., Knyazev D.A., Chunin V.V. Simulation of rolling stock dynamics considering the elasticity of the wheelset as a prediction method for life and durability of its elements. Journal of Transsib Railway Studies, 2022, no. 4 (52), pp. 2-12 (In Russian).

И. А. Гребнев, О. Е. Пудовиков

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), г. Москва, Российская Федерация

К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА ГРУЗОВОЙ ПОЕЗД

Аннотация. Статья посвящена исследованию влияния ветровой нагрузки на аэродинамическую составляющую сопротивления движению грузового поезда. Полученные результаты способствуют пониманию влияния аэродинамического сопротивления на расход топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на тягу поездов. В статье показана высокая значимость рассматриваемой проблемы для Российских железных дорог (ОАО «РЖД»), сделаны выводы из анализа статистических данных маршрутов машинистов, работающих на участке Паласовка – Верхний Баскунчак, который является подверженным ветровым нагрузкам. При помощи приложения SOLIDWORKS создана модель поезда с локомотивом и полувагонами в сцепе на железнодорожной насыпи, а с помощью расширения SOLIDWORKS Flow Simulation смоделирована ветровая нагрузка, разная по скорости, изменяющаяся под углом от 0 до 90°. Получены значения силы аэродинамического сопротивления движению на поезд в целом и на каждую единицу подвижного состава в отдельности. Методами теории тяги поездов выполнена оценка влияния аэродинамического сопротивления на расход топлива на тягу. На основе полученных значений сил аэродинамического сопротивления и картин распределения воздушных потоков сделаны выводы о влиянии загрузки полувагона на увеличение сопротивления движению. Сделаны выводы о влиянии ветровой нагрузки на каждую единицу подвижного состава в поезде. Установлено, что при направлении ветра под углом к оси пути сила ветрового воздействия увеличивается по сравнению со случаем, когда угол между осью пути и вектором скорости равен нулю. Данные эксперимента об увеличении сопротивления от ветровой нагрузки подтверждаются теоретическим расчетом и практической обработкой маршрутов машинистов. Данная статья демонстрирует необходимость отдельного нормирования ТЭР при возникновении ветровых нагрузок, может быть полезна при дальнейшем детальном изучении аэродинамического сопротивления грузовых поездов.

Ключевые слова: аэродинамическое сопротивление, ветровые нагрузки, энергоэффективность, моделирование воздушного потока, удельный расход топлива.

Ivan A. Grebnev, Oleg E. Pudovikov

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, the Russian Federation

ON THE ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF WIND LOAD ON A FREIGHT TRAIN

Abstract. The article is devoted to the research of the of wind load effect on the aerodynamic component to the movement of a freight train. These findings contribute to a better understanding of the impact of aerodynamic resistance on the consumption of fuel and energy resources (FER) on train traction. The article shows the high significance of this problem for Joint Stock Company Russian Railways (RZD JSC). The conclusions were drawn from the analysis of statistical data on the routes of locomotive drivers, working on the Pallasovka-Verkhniy Baskunchak section, which is undergone to wind loads. The SOLIDWORKS application was used to design a train with a locomotive and gondola cars coupled on an embankment, and SOLIDWORKS Flow Simulation plug-in was used to simulate wind load, different in speed, varying from 0 to 90°. The values of the force of aerodynamic resistance to movement for the train as a whole and for each unit of the rolling stock separately were obtained. Using the methods of the theory of train traction, the influence of aerodynamic drag on fuel consumption for traction has been assessed. Based on the obtained values of the aerodynamic drag forces and patterns of air flow distribution, conclusions were drawn about the effect of loading a gondola car on an increase in traffic resistance. Conclusions are drawn about the effect of wind load on each unit of rolling stock in the train. It was found that when the wind is directed at an angle to the axis of the path, the force of the wind effect increases, compared with the case when the angle between the axis of the path and the velocity vector is zero. The experimental data on the increase in resistance from the wind load are confirmed by theoretical calculation, as well as practical processing of routes machinists. This article demonstrates the need for a separate regulation of fuel and energy resources in the event of wind loads, and may be useful in further detailed study of the aerodynamic drag of freight trains.

Keywords: aerodynamic resistance, wind Loads, energy efficiency, air flow simulation, specific fuel consumption.

Проблема ресурсосбережения является важной составляющей в экономической политике компании ОАО «РЖД». Особенно острой является проблема нормирования топлива и электроэнергии на тягу поездов. В большинстве случаев учитываются лишь известные

постоянные факторы, влияющие на энергозатраты, а именно – план и профиль пути [1]. Однако имеются некоторые участки железных дорог, на которых велико влияние переменных факторов, к примеру ветровых нагрузок. К таким метеозависимым участкам относится в частности участок Приволжской железной дороги Палласовка – Верхний Баскунчак [2].

Следует отметить, что до сих пор доподлинно не установлено влияние взаимных скоростей и направлений перемещений подвижного состава и ветровых потоков на тягу поездов и расход топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). В Правилах тяговых расчетов (ПТР) [3] представлены лишь коэффициенты для увеличения дополнительного сопротивления, учитывающие скорость ветра, но не угол между вектором скорости движения поезда и направлением ветра. Такое определение не подходит для конкретных участков с целью нормирования энергозатрат на них.

Влияние воздушной среды на подвижной состав многопланово. Условно его рассматривают в рамках внешней, внутренней и пограничной аэродинамики. Обычно поезд характеризуется внешней аэродинамикой, которая определяется скоростью движения поезда, его составностью, степенью аэродинамического совершенства вагонов и локомотивов, условиями движения по железнодорожному полотну, состоянием и величиной внешних и внутренних аэродинамических связей в поезде, а также поезда с элементами инфраструктуры, расположенными вблизи нее [4, 5].

Для экспериментального установления влияния ветровой нагрузки на расход ТЭР был выполнен анализ статистических данных о расходе топлива в периоды март – май и октябрь – декабрь 2019, 2020 гг., полученных из маршрутов машинистов форма № ТУ-ЗВЦ (отчетная форма, содержащая информацию о выполненной локомотивной бригадой поездке, в частности, данные об остановках, расходе топлива за поездку по показаниям контрольно-измерительных приборов) на участке Палласовка – Верхний Баскунчак Приволжской железной дороги в тяге с тепловозами 2ТЭ25КМ. Рассматриваемый период выбран не случайно – именно в эти месяцы дуют ветра преимущественно восточного направления с максимальной за год скоростью. В электронную форму учета маршрутов вносятся также данные о присутствии ветровых нагрузок на основе рапорта машиниста. Данный анализ показал, что в тех поездках, в которых было воздействие ветровых нагрузок при прочих равных факторах, наблюдалось увеличение удельного расхода топлива в среднем на 6,5 %. Причем большая разница по сравнению со случаями отсутствия воздействия ветровых нагрузок наблюдалась для поездов, состоящих из порожних полувагонов. На рисунке 1, а, б показаны плотности распределения удельного расхода топлива без наличия ветровых нагрузок (см. рисунок 1, а) и при их наличии (см. рисунок 1, б) для поездов с фиксированной минимальной нагрузкой на ось [6].

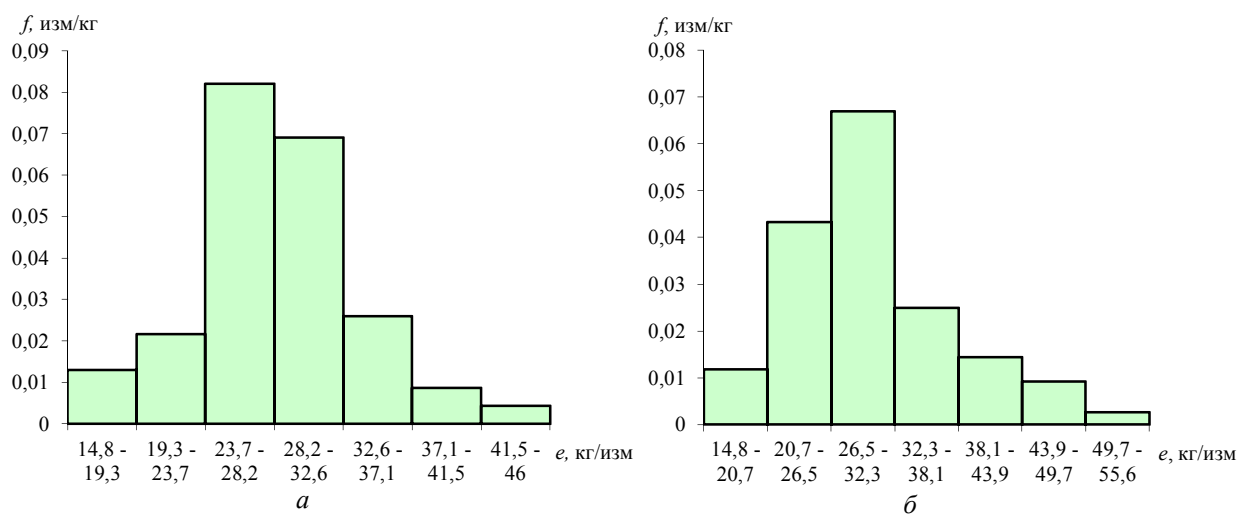


Рисунок 1 – Гистограмма плотности распределения удельного расхода топлива тепловозом 2ТЭ25КМ без ветра (а) и при наличии ветровой нагрузки (б) для общей выборки с порожними поездами

Известно, что аэродинамическое сопротивление тела, обтекаемого потоком, представляет собой сумму составляющих его сопротивлений, а именно – формы, индуктивного поверхностного (трения), интерференционного и внутренних потоков. Составляющая сопротивления, определяемая формой тела, возникает в результате появления перепадов давления на поверхности обтекаемого тела, вызванных срывом потока [7]. Сопротивление трения возникает в результате преодоления сопротивления вязкой текучей среды, эта составляющая зависит от площади обтекаемой поверхности тела, на нее оказывает влияние и шероховатость поверхности. Так как по известной классификации железнодорожный поезд представляет собой плохообтекаемое тело значительного удлинения, движущееся вдоль экрана [4], эти две составляющие сопротивления являются преобладающими для грузового железнодорожного поезда, в то время как величинами индуктивного сопротивления, возникающего в результате действия подъемной силы, интерференционного, возникающего в результате взаимодействия потоков, обтекающих различные части поезда, а также сопротивления внутренних потоков можно пренебречь.

Дополнительная ветровая нагрузка оказывает влияние на аэродинамическую составляющую сопротивления движению, а также ухудшает условия взаимодействия подвижного состава и железнодорожного пути, дополнительно прижимая гребни колесных пар к внутреннему по отношению к действующему ветру рельсу, создавая дополнительное сопротивление в подшипниках качения [8, 9].

Оценку влияния воздушной среды, в том числе ветровых нагрузок, на грузовой поезд выполним, используя метод имитационного моделирования. Для выполнения расчета используем программный пакет SOLIDWORKS, в состав которого входит расширение Flow Simulation. SOLIDWORKS Flow Simulation – вычислительный инструмент для моделирования потоковых процессов в текучей среде Computational Fluid Dynamics (CFD-анализ), полностью встроенной в SOLIDWORKS [10].

Была выполнена проверка возможности использования расширения SOLIDWORKS для определения характера силового взаимодействия исследуемого объекта и набегающего потока путем определения величины коэффициента лобового сопротивления C_z , качественной оценки характера воздушного потока и сопоставления ее с результатами эксперимента. Проверка проводилась для тела с уже известным коэффициентом лобового сопротивления, а именно для сферы. Величина C_z вычислялась по известной формуле [11]:

$$C_z = \frac{2 \cdot F_{\text{сопр}}}{\rho \cdot v^2 \cdot S}, \quad (1)$$

где $F_{\text{сопр}}$ – величина силы, действующей на тело в результате обтекания его воздухом, определяется в результате выполнения расчетов, Н;

ρ – плотность воздуха, кг/м³;

v – скорость набегающего потока воздуха, м/с;

S – наибольшая (миделева) площадь поперечного сечения обтекаемого тела. Для сферы $S = \pi d^2 / 4$, где d – диаметр сферы, м.

Выполненные расчеты для различных Re (Re – безразмерная величина – число Рейнольдса, определяющее относительную роль сил инерции и сил трения в динамике потока) показали, как качественное (по характеру обтекания тела), так и количественное соответствие результатов расчета результатам экспериментальных исследований по определению величины C_z .

Анализ влияния ветровой нагрузки выполним применительно к поездам в грузовом движении, обращающимся на участке Палласовка – Верхний Баскунчак Приволжской железной дороги. Выбор данного участка обусловлен тем, что он расположен в зоне с повторяемостью ветра скоростью более 12 м/с 10–15 % в год. Согласно ГОСТ 16350–80 «Климат СССР. Районирование и статистические параметры для технических целей». То есть на этом участке дуют ветра со скоростями 12 м/с и выше чаще чем 53 дня в году [2]. На рисун-

ке 2 приведена информация о ветровой нагрузке, зафиксированной в период с марта по май 2015 – 2019 гг. (именно в эти переходные сезоны возникает наиболее сильное ветровое воздействие) на метеостанции поселка Эльтон, расположенной на исследуемом участке железной дороги, примерно на одинаковом удалении от конечных точек рассматриваемого маршрута.

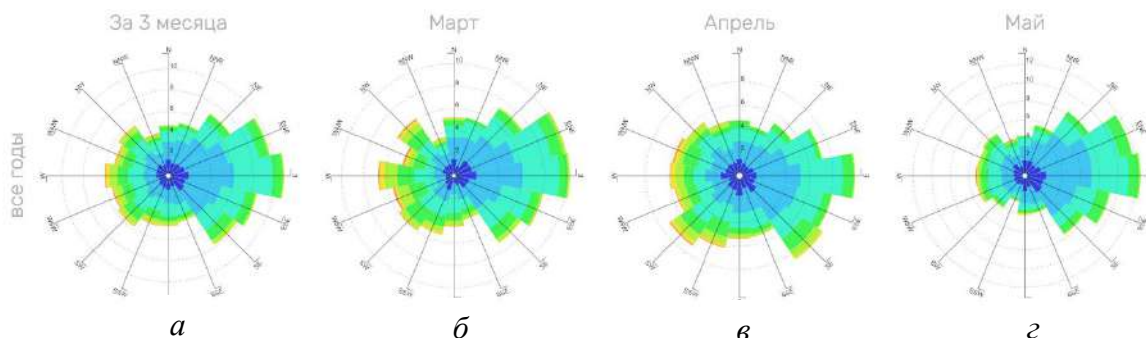


Рисунок 2 – Роза ветров метеостанции Эльтон

На рисунке 2 показана повторяемость ветров каждого направления. Сила ветра отображается цветом сектора диаграммы, размер сектора в радиальном направлении соответствует повторяемости данного ветра. Согласно данным метеостанции [12] преобладает ветер восточного направления. Так, за все время наблюдений повторяемость ветров с направлений от северо-восточного до юго-восточного составляет 38 %, при этом 33 % из них со скоростями до 6 м/с.

Устойчивые значения пиковых скоростей ветра определяются по формуле [13]:

$$\omega = \bar{\omega} + k\sigma_{\omega}, \quad (2)$$

где ω – максимальная скорость ветра; $\bar{\omega}$ – средняя скорость ветра; σ_{ω} – стандартное отклонение естественной скорости ветра; k – коэффициент достоверности.

Различные значения k соответствуют разным коэффициентам надежности; коэффициент надежности определяется как вероятность того, что средняя пиковая скорость ветра не превысит $\bar{\omega} + k\sigma_{\omega}$. При k , равном 2,84, вероятность того, что пиковая скорость ветра не превысит $\bar{\omega} + k\sigma_{\omega}$, составляет 99,77 %. При ветровом потоке, действующем под углом к оси пути, земляное полотно оказывает значительное влияние на траекторию и скорость воздушного потока, способствуя дополнительному вихреобразованию и турбулизации потока, а следовательно, оказывая влияние на характер взаимодействия подвижного состава с воздушным потоком [14]. Стандартное отклонение скорости ветра зависит главным образом от средней скорости ветра и интенсивности турбулентности; оно рассчитывается по формуле [15]:

$$\sigma_{\omega} = I_z \omega, \quad (3)$$

где I_z – интенсивность турбулентности, которую можно вычислить по формуле:

$$I_z = \frac{1}{\ln\left(\frac{h}{h_0}\right)} \left(1 - \frac{5}{10^5} \left(\lg\left(\frac{h_0}{0,05}\right) + 2 \right)^7 \right), \quad (4)$$

где h – высота насыпи над землей, $h = 2$ м; h_0 – шероховатость насыпи, $h_0 = 0,07$ м. С учетом сказанного получена средняя пиковая скорость ветра, равная 13 м/с.

Расчеты были выполнены при различных сочетаниях скоростей и направлений скорости воздушного потока для случая движения поезда в безветренных условиях, т. е. при $v_b = 0$ м/с. Проведена серия расчетов для случая действия ветра со скоростью, равной среднему пиковому значению скорости ветра, действующему на протяжении всего года в районе метеостанции

Эльтон и составляющему 13 м/с, при этом ветровой поток был направлен навстречу подвижному составу под углом α , изменяющимся в диапазоне от 0 до 90° с шагом в 15° к оси пути (рисунок 3). Для сопоставления результатов расчета по определению влияния ветра на величину аэродинамического сопротивления поезда, а значит, и расхода ТЭР на тягу, был выполнен расчет при скорости ветрового потока $v_B = 6$ м/с, направленного под углом $\alpha = 75^\circ$ к оси пути. Данный вариант соответствует наиболее вероятной величине угла между направлениями ветрового потока и движения поезда с учетом трассировки рассматриваемого участка железной дороги.

Для выполнения расчета была создана модель поезда, состоящего из односекционного локомотива, по своим основным геометрическим размерам соответствующего одной секции современного магистрального тепловоза, а также из 26 полувагонов. Модели всех экипажей выполнены в масштабе 1:1.

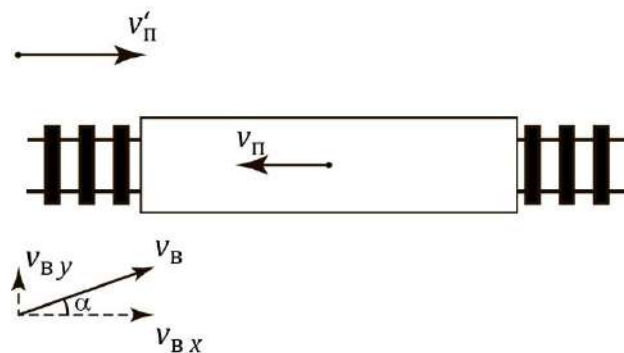


Рисунок 3 – Схема учета дополнительного ветрового воздействия на поезд

Во всех случаях расчеты выполнены при скорости поезда $v_{\pi} = 60$ км/ч, равной технической, определенной в результате обработки статистического материала из маршрутов машиниста.

Необходимо отметить, что расчеты выполняют в предположении, что твердое тело, обтекаемое потоком, является неподвижным. Тогда в соответствии с принципом относительности скорость эквивалентного воздушного потока v'_{π} , воздействующего на поезд:

$$v'_{\pi} = -v_{\pi} + v_{Bx} = -v_{\pi} + v_B \cos \alpha. \quad (5)$$

На рисунке 4 приведены результаты расчета, иллюстрирующие обтекание поезда, движущегося со скоростью $v_{\pi} = 60$ км/ч, ветровым потоком со скоростью $v_B = 6$ м/с, направленным под углом $\alpha = 75^\circ$ к оси пути. На рисунке приведено распределение скоростей воздушного потока и линии тока в горизонтальной плоскости, параллельной оси пути на высоте 2 м от уровня головки рельсов, а также в вертикальной плоскости, содержащей ось пути. Как видно (рисунок 4, а), головная часть локомотива служит для набегающего под углом к оси пути потока экраном, способствуя отклонению воздушного потока от начальной траектории, интенсивному вихреобразованию вокруг головной части поезда, а также создавая «тень» для группы вагонов, расположенных непосредственно за локомотивом, вследствие чего характер их обтекания значительно отличается от аналогичного для вагонов, расположенных на большем удалении от локомотива.

Как видно из рисунка 4, а, характер обтекания вагонов варьируется и зависит от местоположения вагона в поезде, он стабилизируется по мере удаления от головной части, так как при этом значительно снижается влияние эффекта экранирования набегающего потока локомотивом. В хвостовой части поезда, очевидно, значительное отличие от остальных должен иметь характер течения вокруг последнего вагона, что подтверждается результатами расчетов

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

(рисунок 4, б). Как видно из рисунка 4, а, б, из-за отсутствия заполнения вагонов в их кузовах тоже наблюдается интенсивное вихреобразование, сопровождающееся значительным перепадом давления на различных стенках вагонов. Все эти факторы, а именно повышенное вихреобразование, перепады давления, ведут к увеличению сил аэродинамического сопротивления, действующих на вагоны порожнего поезда, а значит, и на поезд в целом.

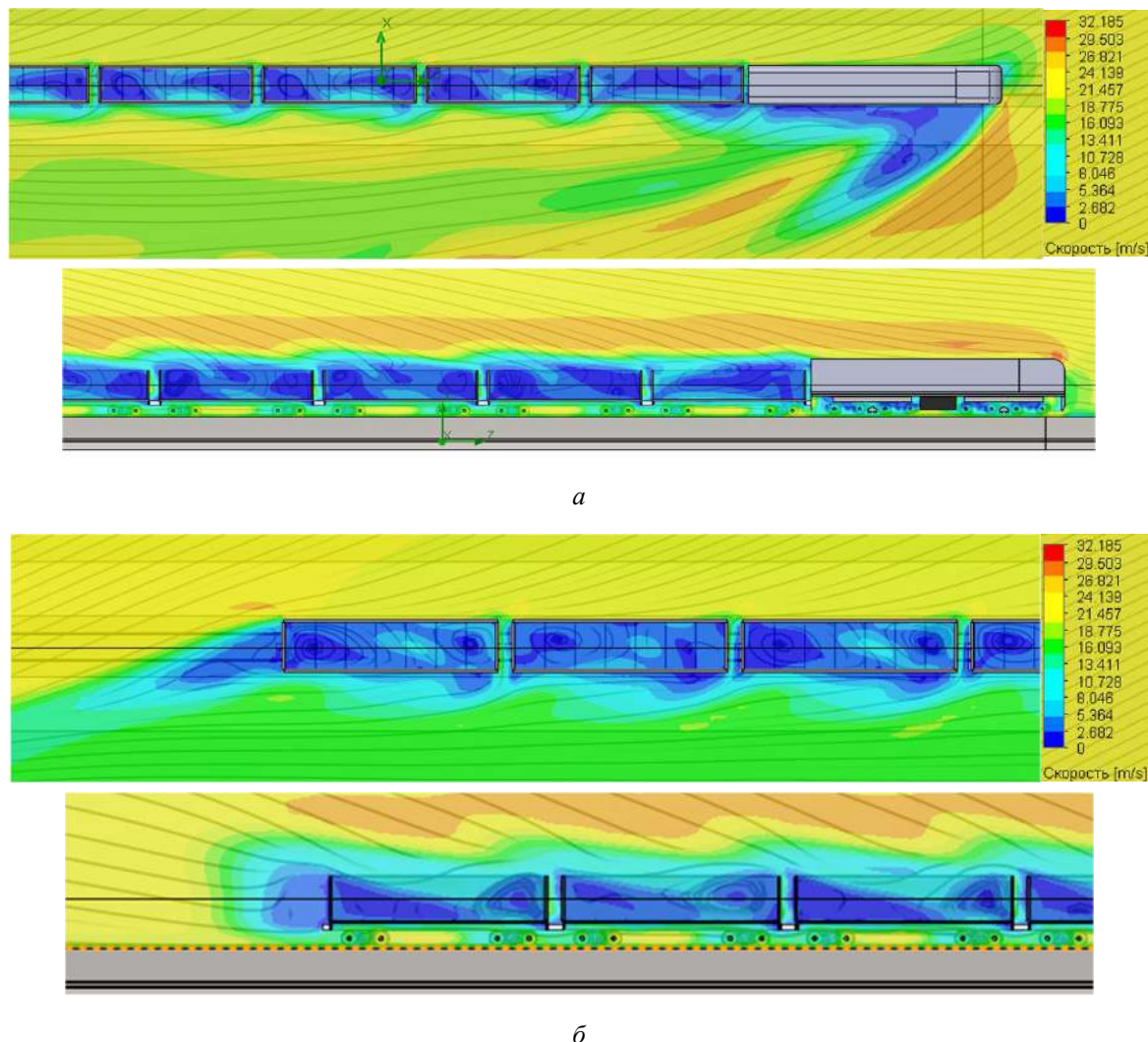


Рисунок 4 – Распределение скоростей воздушного потока и линии тока в областях головной (а) и хвостой (б) групп экипажей

В таблице приведены результаты расчетов – значения сил (кН), действующих на порожний поезд при движении в безветренных условиях, а также при скорости ветра $v_v = 6$ м/с, воздействующего на поезд под углом $\alpha = 75^\circ$. Кроме этого в таблице приведены результаты расчетов как для порожнего, так и для груженого поезда при действии ветра со скоростью $v_v = 13$ м/с и изменении угла дополнительной ветровой нагрузки α от 0 до 90° .

Силы, действующие на поезд, кН

Тип загрузки вагонов	Скорость ветра, м/с	Направление ветрового потока, α						
		0	15	30	45	60	75	90
Порожние	0	14,4	–	–	–	–	–	–
	6	–	–	–	–	–	27,3	–
	13	22,2	35,5	36,7	38,3	42,1	42,4	41,3
Груженные	13	17,0	25,5	29,5	35,0	36,5	36,1	32,4

Как видно из представленных результатов, величина силы давления существенно зависит от величины скорости потока, а также от величины угла между направлением движения поезда и направлением ветра. При скорости ветра $v_v = 13$ м/с максимальное значение силы давления, действующей на поезд, состоящий из порожних вагонов, достигается при величине угла, равной примерно $60 - 75^\circ$, при этом в результате детального повагонного анализа значений сил установлено, что наибольшая сила, действующая на локомотив, достигается при величине угла 45° . Установлено также, что сила давления, действующая на локомотив, значительно превышает аналогичные силы, действующие на вагоны поезда, составляет от 12 до 21 % от величины общей силы и равномерно убывает от 21 до 12 % при изменении угла ветровой нагрузки от 0 до 90° . Так же и для последнего вагона в поезде доля общей величины сопротивления, приходящейся на него, примерно в два раза превышает аналогичные значения для промежуточных вагонов при величинах углов в диапазоне 0 до 60° , при больших значениях углов данная разница значительно снижается. Вагоны (со второго по пятый), расположенные непосредственно за локомотивом, имеют значительно больший разброс величин сил давления воздушного потока по сравнению со средним по составу (40 % против 6 %), при этом их величина значительно меньше, чем у локомотива. Причиной этого является то, что локомотив выступает экраном, который создает эффект «тени» для набегающего потока воздуха, способствуя интенсивному вихреобразованию вокруг головной части поезда [16]. Применительно к промежуточным вагонам: величина силы давления равномерно возрастает по мере увеличения угла дополнительной ветровой нагрузки, достигая максимума при значении этого угла 90° . В случаях, если угол дополнительной ветровой нагрузки составляет $60 - 90^\circ$, силы, действующие на все экипажи поезда, за исключением головной группы, примерно одинаковы, при этом суммарное сопротивление является наибольшим. Установлено, что на группу вагонов, расположенных между пятым и последним вагоном поезда, действуют примерно одинаковые по значению силы, что позволяет масштабировать полученные результаты на поезд произвольной длины [17].

На рисунке 5 приведены результаты повагонного определения сил, действующих на экипажи поезда при скорости ветра $v_v = 13$ м/с, направленного под углом $\alpha = 30^\circ$ на движущийся поезд.

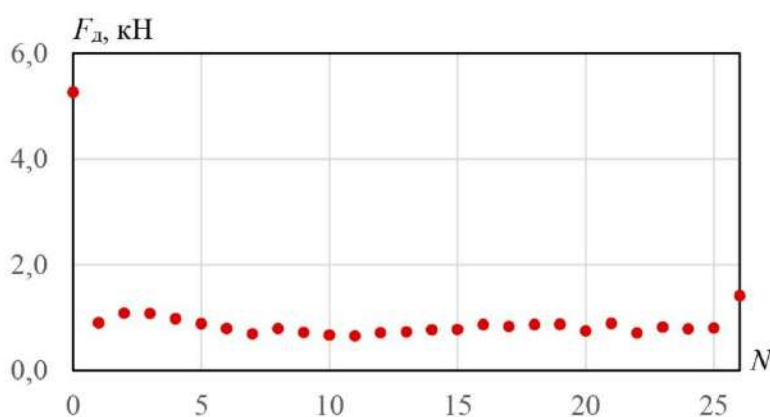


Рисунок 5 – Силы, действующие на экипажи поезда при $v_v = 13$ м/с и $\alpha = 30^\circ$

Как видно из результатов, приведенных в таблице, при скорости ветра, равной 6 м/с, и направлении ветрового потока под углом 75° по отношению к направлению движения, по сравнению с результатами расчета варианта при отсутствии ветровой нагрузки величина силы аэродинамического сопротивления больше примерно на 12,9 кН. Данное значение увеличивает величину силы основного сопротивления движению поезда рассматриваемого варианта формирования при движении со скоростью 60 км/ч, вычисленную в соответствии с известной методикой [3 с. 35,36; 64, 65], на 17 % с 74 до 87,9 кН. Проведенная оценка показала, что удельный расход топлива, затрачиваемого на тягу поезда, в этом случае увеличивается

на 11 %. Данный результат в достаточной мере соответствует результатам статистической обработки данных, полученных в эксплуатации, подтверждающих увеличение расхода в среднем на 6,5 %.

Применительно к груженому поезду (см. таблицу): величины сил сопротивления движению являются значительно меньшими по сравнению с поездом, состоящим из порожних вагонов, что объясняется значительно более благоприятными условиями обтекания вагонов поезда воздушным потоком, связанным с большей однородностью сечения поезда.

В остальном характер изменения аэродинамических сил по длине поезда, зависимости этих сил от величины угла дополнительного ветрового потока являются в целом аналогичными вариантам, полученным для поезда, состоящего из порожних полувагонов.

Таким образом, как статистический анализ, так и результаты математического моделирования показали, что ветровая нагрузка оказывает существенное влияние на расход топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов за счет увеличения аэродинамической составляющей сопротивления движению поезда, а также некоторых сопутствующих факторов. Подтверждено, что степень загрузки полувагона оказывает значительное влияние на величину аэродинамического сопротивления поезда. Установлено, что существенное влияние на величину сопротивления движению оказывает не только скорость ветрового потока, но и его направление относительно оси движения поезда, поэтому при решении задачи нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов целесообразно учитывать влияние данных факторов на расход топлива, корректируя его в сторону увеличения на процентную разницу, полученную в результате моделирования.

Список литературы

1. Годовой отчет ОАО «РЖД» 2018 года // rzd.ru : сайт. – Текст : электронный – URL: <https://ar2018.rzd.ru/ru> (дата обращения: 31.10.2022).
2. ГОСТ 16350–80. Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. – Москва : Стандартинформ, 1981. – 140 с. – Текст : непосредственный.
3. Правила тяговых расчетов для поездной работы. Нормативное производственно-практическое издание. – Москва : ОАО «РЖД», 2016. – 515 с. – Текст : непосредственный.
4. Чурков, Н. А. Аэродинамика железнодорожного поезда. Принципы конструирования подвижного состава, минимизирующие воздействия воздушной среды на железнодорожный поезд. – Москва : Желдориздат, 2007. – 332 с. – Текст : непосредственный.
5. D. Soper The aerodynamics of a container freight train. *University of Birmingham Research Archive*, 2014, 371 p.
6. Grebnev I.A., Sidorova N.N., Pudovikov O.E. Identification of wind loads through train statistical analysis. *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles*, 2022, no. 2, pp. 299-307.
7. Schetz J.A. Aerodynamics of high-speed trains. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2001, no. 33 (1), pp. 371-414.
8. Стромский, П. П. Влияние ветра на сопротивление поезда / П. П. Стромский. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 1959. – № 7. – С. 24–28.
9. Стромский, П. П. Определение коэффициента воздушного сопротивления вагонов / П. П. Стромский. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 1963. – № 2. – С. 21–24.
10. Алямовский, А. А. Инженерные расчеты и SolidWorksSimulation / А. А. Алямовский. – Москва : ДМК Пресс, 2010. – 464 с. – Текст : непосредственный.
11. Петров, К. П. Аэродинамика тел простейшей формы / К. П. Петров. – Москва : Физматлит, 1998. – 428 с. – Текст : непосредственный.
12. Розы ветров России // lakka-sails.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://lakka-sails.ru/winds/> (дата обращения: 31.10.2022).

13. Mengge Y., Rongchao J., Qian Z., Jiye Z., Crosswind stability evaluation of high-speed train using different wind models. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2019 no. 32(40), 37 p.
14. G. V. V. S. Watkins, P. Mousley, J. Watmuff, S. Prasad. Flow structures in the near wake of the Ahmed model. *Journal of Fluids and Structures*, 2005, no. 20, pp. 673-695.
15. Trivella A., Wang P., Corman F. The impact of wind on energy-efficient train control. *SSRN Electronic journal*, 2020, no. 8, pp. 47-77.
16. Кравец, В. В. Аэродинамика частично перекрытого межвагонного пространства скоростного поезда / В. В. Кравец, Е. В. Кравец. – Текст : непосредственный // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2005. – 9 с.
17. Поляков, Б. О. Разработка методики исследования аэродинамических особенностей подвагонного пространства в составе высокоскоростного электропоезда / Б. О. Поляков, Е. Я. Ватулина, Ю. П. Бороненко. – Текст : непосредственный // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы : материалы всероссийской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 20–27 апреля 2020 г. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2020. – С. 47–50.

References

1. *Godovoi otchet OAO «RZhD» 2018 goda* [Annual report of Russian Railways JSC 2018]. Available at: <https://ar2018.rzd.ru/ru>. Publication date March 21, 2018 (accessed 31.10.2022).
2. National Standard 16350–80. Climate of the USSR. Zoning and statistical parameters of climatic factors for technical purposes. Moscow, Standartinform Publ., 1981. 140 p. (In Russian).
3. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poyezdnoy raboty* [Rules of traction calculations]. Moscow, JSC «RZD» Publ., 2016, 515 p. (In Russian).
4. Churkov N.A. *Aerodinamika zheleznodorozhnogo poyezda* [Rolling stock aerodynamics]. Moscow, Zheldorizdat Publ., 2007, 332 p. (In Russian).
5. Soper D. The aerodynamics of a container freight train. *University of Birmingham Research Archive*, 2014, 371 p.
6. Grebnev I.A., Sidorova N.N., Pudovikov O.E. Identification of wind loads through train statistical analysis. *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles*, 2022, no. 2, pp. 299-307.
7. Schetz J.A. Aerodynamics of high-speed trains. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2001, no. 33 (1), pp. 371-414.
8. Stromsky P.P. Influence of wind on train resistance. *Vestnik VNIIZhT – The Bulletin of VNIIZhT*, 1959, no. 7, pp. 24-28 (In Russian).
9. Stromsky P.P. Determination of the coefficient of air resistance of cars. *Vestnik VNIIZhT – The Bulletin of VNIIZhT*, 1963, no. 2, pp. 21-24 (In Russian).
10. Alyamovsky A.A. *Inzhenernyye raschety i SolidWorksSimulation* [Engineering calculations and SolidWorksSimulation]. Moscow, DMK Press Publ., 2010, 464 p. (In Russian).
11. Petrov K.P. *Aerodinamika tel prosteyshyey formy* [Aerodynamics of bodies of the simplest form]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1998, 428 p. (In Russian).
12. *Rozy vetrov Rossii* (Wind roses of Russia), Available at: <http://lakka-sails.ru/winds/> (accessed 31.10.2022).
13. Mengge Y., Rongchao J., Qian Z., Jiye Z. Crosswind stability evaluation of high-speed train using different wind models. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2019, no. 32 (40), 37 p.
14. V. G. V. S. Watkins, P. Mousley, J. Watmuff, S. Prasad. Flow structures in the near wake of the Ahmed model. *Journal of Fluids and Structures*, 2005, no. 20, pp. 673-695.
15. Trivella A., Wang P., Corman F. The impact of wind on energy-efficient train control. *SSRN Electronic journal*, 2020, no. 8, pp. 47-77.
16. Kravets V.V., Kravets E.V. Aerodynamics of partially covered inter-car space of a high-speed train. *Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta – Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport*, 2005, p. 9 (In Russian).

17. Polyakov B.O. Development of a methodology for studying the aerodynamic features of the undercar space as part of a high-speed EMU train. *Vserossiyskaya nauchno-tehnicheskoy konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh*. [All-Russian scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists]. St. Petersburg, 2020, pp. 47-50 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гребнев Иван Алексеевич

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электропоезда и локомотивы», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (980) 388-24-19.

E-mail: lokomotiv197309@gmail.com

Пудовиков Олег Евгеньевич

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (495) 684-22-15.

E-mail: olegep@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grebnev Ivan Alekseevich

Russian University of Transport (MIIT).

9, b. 9, Obrazcova st., Moscow, 127994, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «EMU and locomotives», RUT (MIIT).

Phone: +7 (980) 388-24-19.

E-mail: lokomotiv197309@gmail.com

Pudovikov Oleg Evgenievich

Russian University of Transport (MIIT).

9, b. 9, Obrazcova st., Moscow, 127994, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «EMU and locomotives», RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 684-22-15.

E-mail: olegep@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Гребнев, И. А. К оценке влияния ветровой нагрузки на грузовой поезд / И. А. Гребнев, О. Е. Пудовиков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 4 (52). – С. 13 – 22.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Grebnev I.A., Pudovikov O.E. On the estimation of the influence of wind load on a freight train. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 4 (52), pp. 13-22 (In Russian).

УДК 621.311

В. Л. Незевак¹, А. Д. Дмитриев¹, П. В. Тарута²

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация;

²Западно-Сибирская дирекция по энергообеспечению ОАО «РЖД», г. Новосибирск, Российская Федерация

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПОСЛЕАВАРИЙНЫХ И ВЫНУЖДЕННЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Аннотация. Одним из свойств надежности электроснабжения электроподвижного состава железных дорог является безотказная работа системы тягового электроснабжения в различных режимах ее работы. Для послеаварийных и вынужденных режимов работы системы тягового электроснабжения характерно снижение показателей нагрузочной способности. С целью обеспечения пропускной и провозной способности участка железной дороги по устройствам тягового электроснабжения предлагается рассмотреть применение устройств накопления электроэнергии на электроподвижном составе и в системе тягового электроснабжения.

Исследования, проводимые отечественными и зарубежными учеными, позволяют оценить эффективность альтернативных решений по повышению надежности электроснабжения, к которым относятся различные варианты применения устройств накопления электроэнергии на электроподвижном составе и в системе тягового электроснабжения.

В настоящей статье представлены результаты обзора указанных решений, предложена имитационная модель системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава с устройствами накопления

электроэнергии на базе различных аккумуляторов и суперконденсаторов. Моделирование изменения режимов работы системы тягового электроснабжения выполнено с учетом управления состоянием коммутационных аппаратов. Результаты расчетов позволяют оценить падение напряжения на выходе накопителей электроэнергии, в том числе с учетом экспоненциальной зоны разрядной характеристики аккумуляторов, оценить изменение напряжения для заданной электротяговой нагрузки в зависимости от энергоемкости накопителя, выполненного на основе наиболее распространенных типов аккумуляторов и суперконденсатора.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, электроподвижной состав, устройство накопления электроэнергии, послеаварийный и вынужденный режимы, пост секционирования, минимальное напряжение, энергоемкость, имитационная модель.

Vladislav L. Nezevak¹, Alexander D. Dmitriev¹, Pavel V. Taruta²

¹Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation;

²West Siberian Directorate for Energy Supply of JSC «Russian Railways», Novosibirsk, the Russian Federation

SIMULATION MODELING OF THE OPERATION OF ELECTRICITY STORAGE DEVICES IN POST-ACCIDENT AND FORCED OPERATING MODES OF THE TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM

Abstract. One of the properties of the reliability of the power supply of electric rolling stock of railways is the trouble-free operation of the traction power supply system in various modes of its operation. For post-emergency and forced modes of operation of the traction power supply system, a decrease in load capacity is characteristic. In order to ensure the throughput and carrying capacity of the railway section by traction power supply devices, it is proposed to consider the use of electric power storage devices on electric rolling stock and in the traction power supply system.

Studies conducted by domestic and foreign researchers allow us to evaluate the effectiveness of alternative solutions to improve the reliability of power supply, which include various options for the use of electric power storage devices on electric rolling stock and in the traction power supply system.

This article presents the results of a review of these solutions, a simulation model of a traction power supply system and an electric rolling stock with power storage devices based on various batteries and a supercapacitor is proposed. Modeling of changes in the modes of operation of the traction power supply system is carried out taking into account the state control of switching devices. The calculation results allow us to estimate the voltage drop at the output of electric power storage devices, including taking into account the exponential zone of the discharge characteristics of batteries, to estimate the voltage change for a given electric traction load depending on the energy intensity of the storage device, made on the basis of the most common types of batteries and a supercapacitor.

Keywords: traction power supply system, electric rolling stock, electric power storage device, emergency and forced mode, post-partitioning, minimum voltage, energy intensity, simulation model.

Нормальные режимы питания межподстанционных зон на железных дорогах России, как правило, являются двухсторонними, что совместно с выполняемым секционированием позволяет обеспечить требующийся уровень надежности электроснабжения электроподвижного состава. В ряде случаев отказы устройств электроснабжения приводят к снятию напряжения с поврежденной секции контактной сети и соответствующим задержкам в графике движения поездов.

Одним из решений задачи по сокращению задержек поездов в наиболее чувствительном виде движения – пассажирском – является модернизация электроподвижного состава, позволяющая обеспечить автономность хода на части пути следования, что позволяет проследовать ему до ближайшей станции с неповрежденной секцией контактной сети и следовать далее в нормальном режиме.

Применение электроподвижного состава, имеющего автономность хода, позволяет использовать его не только для повышения надежности перевозок, но и для решения задач по повышению эффективности рекуперации и энергетической эффективности перевозок и снижению экологического воздействия на окружающую среду при замене в пассажирском движении дизель-поездов на электропоезда, оснащенные бортовыми системами накопления, которые могут следовать автономно на всем пути следования или на его части.

Применение автономного подвижного состава в грузовом движении представляется нецелесообразным ввиду повышенной энергоемкости указанных перевозок и длительности тяговых режимов, приводящих к высокой стоимости бортовых систем накопления.

Исключением может являться маневровое движение, в котором имеются примеры реализации пилотных проектов с гибридным подвижным составом или электроподвижным составом с бортовыми системами накопления.

Другим аспектом задачи по повышению надежности электроснабжения является работа системы тягового электроснабжения в послеаварийных и вынужденных режимах. Продолжительность указанных режимов, в ряде случаев являющихся плановыми, может существенно превышать продолжительность аварийных режимов работы.

Вынужденные режимы работы системы тягового электроснабжения связаны с изменением параметров и в ряде случаев приводят к длительному снижению пропускной и провозной способности на участке железной дороги. В данном случае требуется решать задачу обеспечения пропускной и провозной способности участка железной дороги не только для пассажирского электроподвижного состава, но и для грузовых электровозов.

Наиболее ярким примером применения систем накопления в вынужденных режимах является их применение в системе тягового электроснабжения на линейных пунктах или в местах секционирования, устройство которых связано с временным изменением схемы питания и секционирования, например, при устройстве блок-постов при капитальном ремонте пути.

Таким образом, с целью повышения надежности электроснабжения в послеаварийных режимах работы системы тягового электроснабжения для пассажирского электроподвижного состава целесообразно применять бортовые системы, для послеаварийных и вынужденных режимов – стационарные системы накопления, размещаемые в границах лимитирующих пропускную и провозную способность межподстанционных зон.

Тенденция развития автономности электроподвижного состава привела к появлению электропоездов, питание которых может быть реализовано как от контактной сети, так и от бортовых систем накопления электроэнергии. Современные образцы электропоездов оснащаются литий-ионными батареями, обеспечивающими зарядку за время около 10 мин и запасом хода до 100 км, например, как это реализовано в поездах Talent 3 Bombardier. Указанные поезда получают питание от контактной сети переменного тока напряжением 15 кВ, конструкционная скорость составляет 140 км/ч, ускорение – $1,1 \text{ м/с}^2$ [1].

Развитие указанного технического решения в отношении пассажирских перевозок, наиболее чувствительных к задержкам поездов, привело к появлению автономных аккумуляторных поездов и подвижного состава, сочетающего возможность питания от контактной сети и бортовой системы накопления, а также к предложению специальных систем тягового электроснабжения, построенных по «островной» структуре.

Последняя содержит электрически несвязанные секции контактной сети, позволяющие обеспечить движение электроподвижного состава по непротяженным участкам и одновременную зарядку систем накопления электроэнергии на ограниченных по протяженности участках.

Одним из примеров реализации данного подхода является перевод участков с дизельной тягой на электроподвижной состав с бортовыми системами накопления. На указанных участках реализуется система тягового электроснабжения с секциями контактной сети, не связанными между собой и привязанными к центрам питания [2].

Применение указанных систем позволяет сократить капитальные затраты на сооружение и монтаж контактной подвески, но имеет ограниченную область применения, связанную с малодейственными участками. Рост интенсивности движения, наличие смешанного движения или преобладание грузового движения существенно понижают экономическую привлекательность указанных проектов, поскольку связаны со значительным ростом требуемых мощностей системы тягового электроснабжения и энергоемкости электроподвижного состава [3].

Послеаварийный и вынужденные режимы работы систем тягового электроснабжения характеризуются изменением параметров, являющихся критическими по отношению к некоторым показателям нагрузочной способности и ограничивающих пропускную и

провозную способность участка железной дороги. Основными задачами управления системой тягового электроснабжения в данных режимах являются ограничение роста нагрузки и поддержание напряжения в контактной сети с обеспечением надежности электроснабжения [4]. В ряде случаев вынужденный режим работы связан с увеличением тяговой нагрузки выше проектной [5], когда требуются переход в интенсивный режим работы и реализация мероприятий по усилению тягового электроснабжения. Контроль показателей работы системы тягового электроснабжения в указанных режимах позволяет выполнить необходимое регулирование или обосновать применение тех или иных технических мероприятий по усилению системы тягового электроснабжения [6, 7].

Наиболее тяжелыми с точки зрения поддержания режима напряжения в контактной сети являются режимы питания тяговой сети, связанные с отключением тяговой подстанции или секции контактной сети на время проведения ремонта. Одним из технических решений, направленных на поддержание уровня напряжения на участках, лимитирующих пропускную и провозную способность, является применение устройств накопления электроэнергии.

В случае послеаварийных и вынужденных режимов работы продолжительность действия мероприятий по применению устройств накопления электроэнергии для усиления соответствует продолжительности этих режимов и по аналогии использования передвижных тяговых подстанций носит временный характер. Это позволяет использовать в концепции устройств накопления электроэнергии для тягового электроснабжения как стационарные, так и передвижные комплексы, мобильность которых позволяет использовать их в границах межподстанционных зон.

Применение бортовых устройств накопления электроэнергии возможно как в условиях традиционной системы тягового электроснабжения, так и при реализации «островной» модификации системы.

В послеаварийных и вынужденных режимах работы секционирование контактной сети позволяет сократить протяженность отключенных участков на перегонах и станциях. На перегонах локализация участков главных путей выполняется, как правило, с помощью выключателей, разъединителей и изолирующих сопряжений, на станциях локализация контактной подвески одного или нескольких путей дополнительно обеспечивается секционными изоляторами. Исходя из протяженности отключенных секций на перегонах и станциях критичным для бортовой системы накопления будет являться обесточенный участок межподстанционной зоны, на котором требуется автономность хода до ближайшей секции контактной сети, находящейся под напряжением.

Энергетические параметры для электропоезда (ЭПС) в границах межподстанционной зоны протяженностью l , ограниченной тяговыми подстанциями ТП1 и ТП2 с находящимся на ней постом секционирования, зависят от условий профиля пути, направления следования, скорости и расстояния от начала автономного следования l_i до секции контактной сети под напряжением.

Результаты тяговых расчетов для одной из межподстанционных зон участка Санкт-Петербург – Москва (Клин – Подсолнечная) позволяют оценить электропотребление электропоезда *Velaro RUS* в зависимости от скоростей движения. Для технической скорости движения 50 км/ч результаты расчета электропотребления в зависимости от расположения электропоезда на участке и направления следования приведены на рисунке. Точка пересечения графиков с абсциссой l_p позволяет определить направление движения ЭПС, соответствующее следованию от абсциссы поезда до абсциссы начала следующей секции контактной сети с наименьшим электропотреблением.

Определение параметров бортовой системы накопления ЭПС должно позволять решить задачу автономности электропоезда с минимальными затратами. В данном случае на стоимость бортовых систем основное влияние оказывают их энергоемкость и мощность. Расчет указанных параметров проводится для заданной скорости движения на автономном

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

ходу и должен быть выполнен для диапазона скоростей, позволяющих минимизировать энергоемкость и мощность.

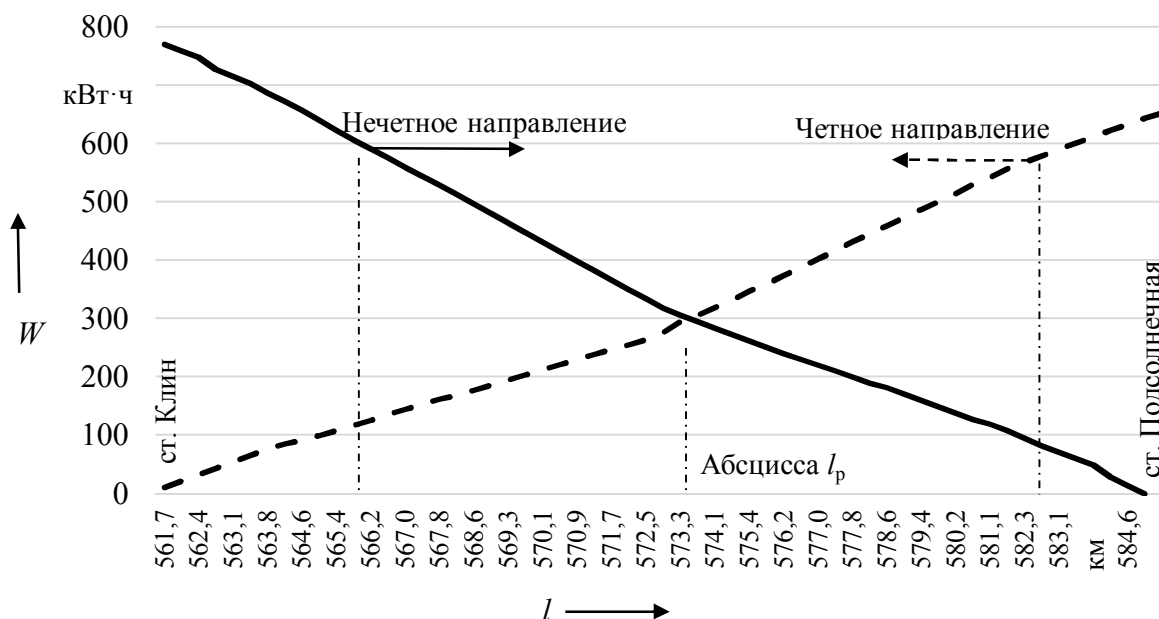


График изменения потребляемой электроэнергии в зависимости от направления движения

При снятии напряжения с контактной сети автоматическое повторное включение (АПВ) выполняется с выдержкой времени в диапазоне 4 – 10 с и в отдельных случаях она может быть сокращена, например, как это показано в статье [8]. В указанном случае электропоезд при снятии напряжения в контактной сети продолжает двигаться по инерции, сохраняя скорость движения. В случае неуспешного АПВ и отсутствия напряжения в контактной сети по истечении выдержки времени выполняется подача напряжения на силовые цепи электропоезда с помощью бортового устройства накопления электроэнергии.

Энергоемкость бортового устройства в этом случае будет определяться величиной электропотребления на наиболее энергозатратной межподстанционной зоне участка, где выполняется пассажирское движение. В этом случае на основе расчетов для укрупненных полигонов движения определяется требуемый уровень номинальной энергоемкости для достижения электропоездом ближайшей следующей секции контактной сети, расположенной по пути следования. Как показано выше, уровень энергоемкости для максимальной скорости 100 км/ч составляет около 1000 кВт·ч. Указанный уровень энергоемкости соответствует результатам, полученным для бортового устройства, предназначенного для решения других задач – повышения энергетической эффективности и следования на неэлектрифицированных участках [9]. Максимальная потребляемая мощность при этом не превышает 2 МВт. Указанное соотношение максимальной мощности и энергоемкости позволяет применять для бортовых систем накопления аккумуляторные батареи, большинство которых допускает разряд токами $2C_n$, т. е. токами, превышающими номинальные в два раза.

Необходимо отметить, что минимальная энергоемкость бортового устройства накопления на малоделятельных участках при аварийном снятии напряжения будет определяться удаленностью электропоезда до ближайшей станции. В этом случае энергоемкость зависит от расчетной ординаты, позволяющей выбрать менее энергозатратное направление движения поезда. Указанный порядок действий при аварийном режиме позволяет обеспечить возвращение электропоезда на ближайшую станцию и одновременно с этим значительно снизить энергоемкость бортового устройства.

Послеаварийные режимы и вынужденные режимы работы характеризуются отключением секций контактной сети и соответствующего коммутационного оборудования тяговых

подстанций. Продолжительность существования указанных режимов, как правило, незначительна и связана с проведением аварийных работ или внеочередных ремонтов. К другой группе относятся вынужденные режимы, связанные с проведением плановых ремонтов оборудования системы тягового электроснабжения или инфраструктуры железной дороги, например, капитального ремонта пути на перегонах с устройством блок-постов, продолжительность которых может изменяться от одних до нескольких суток.

Одним из наиболее характерных примеров вынужденного режима является режим питания межподстанционной зоны с выведенной в ремонт на перегоне секцией контактной сети.

При отключении секции контактной сети движение электроподвижного состава осуществляется по вариантным графикам, предусматривающим движение поездов в неправильном направлении. Пропуск поездов с одной из отключенных секций контактной сети приводит к снижению показателей нагрузочной способности системы тягового электроснабжения, например, коэффициента загрузки силового оборудования или по уровню напряжения.

Для обеспечения пропускной и провозной способности путем поддержания показателей нагрузочной способности предлагается рассмотреть размещение устройства накопления в системе тягового электроснабжения, расположенное на тяговой подстанции или в границах межподстанционной зоны. Параметры устройства при решении данной задачи должны обеспечивать поддержание показателей нагрузочной способности. В отличие от бортового устройства рассматриваемое устройство не предлагается для аварийного питания контактной сети ввиду высоких требований к мощности и энергоемкости для обеспечения пропускной и провозной способности, а также возможного повреждения секции контактной сети.

Оценка работы устройств накопления на базе аккумуляторов и суперконденсатора применительно к бортовой системе и размещению в системе тягового электроснабжения позволяет получить информацию о режиме напряжения, степени заряженности и глубине разряда при тяговых нагрузках электропоезда или совокупности поездов в границах межподстанционной зоны в послеаварийных и вынужденных режимах.

Аккумуляторы и суперконденсаторы имеют различные разрядные характеристики. С целью оценки изменения степени заряженности и минимального напряжения при разряде в работе рассматриваются четыре вида аккумуляторов и один суперконденсатор с двойным электрическим слоем (EDLC). В качестве аккумуляторов, составляющих аккумуляторную батарею, рассматриваются никель-металлогидридные (NiMh), никель-кадмиевые (NiCd), литий-ионные (LiIon) и свинцово-кислотные (LeAc(Pb)) аккумуляторы. В качестве суперконденсаторов используются конденсаторы с двойным электрическим слоем EDLC – суперконденсатор (Electric Double Layer Capacitors) [10].

Разрядная характеристика аккумуляторов имеет так называемую экспоненциальную зону, в которой происходит соответствующее изменение напряжения на клеммах аккумулятора. При дальнейшем разряде напряжение аккумулятора стабилизируется. В отличие от аккумулятора разрядная характеристика суперконденсатора EDLC не имеет выраженной экспоненциальной зоны изменения напряжения и для проведения расчетов может рассматриваться как линейная характеристика.

Напряжение аккумулятора в аналитическом виде описывается на основе уравнений Пейкерта [11, 12], Шеферда [13] или их модификаций, а также моделей Тевенина, Зиммермана – Петерсона и др.

Имитационное моделирование на основе модели в Matlab позволяет получить характеристики режима напряжения для рассматриваемой нагрузки и видов накопителей электроэнергии. Полученные результаты для бортовой и стационарных систем при изменении энергоемкости накопителей в диапазоне от 30 до 300 кВт · ч приведены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 1 – Минимальные напряжения при применении бортовой системы

Энергоемкость, кВт · ч	Минимальное напряжение, В				
	NiMh	NiCd	LiIon	LeAc(Pb)	EDLC
30	2386	2317	2352	2352	2937
60	2852	2773	2780	2780	2967
90	3050	2966	2971	2971	2978
120	3159	3072	3080	3080	2983
150	3229	3139	3152	3152	2986
180	3277	3186	3203	3203	2988
210	3312	3219	3241	3241	2989
240	3339	3245	3271	3271	2991
270	3360	3266	3294	3294	2991
300	3377	3282	3313	3313	2992

Если для бортовых систем с рассматриваемой нагрузкой достаточно уровня энергоемкости 90 кВт · ч для аккумуляторов и 30 кВт · ч для суперконденсатора, то при размещении системы на посту секционирования требующаяся энергоемкость должна быть увеличена в соответствии с нагрузкой не в два раза, а следующим образом: для аккумуляторов NiMh – в 1,33 раза (энергоемкость составит 120 кВт·ч), для NiCd и LiIon – в 1,67 раза (150 кВт · ч), для LeAc(Pb) – более чем в три раза (превысит 300 кВт · ч), а для суперконденсаторов – в два раза (60 кВт · ч).

Таблица 2 – Минимальные напряжения при применении стационарной системы

Энергоемкость, кВт · ч	Минимальное напряжение, В				
	NiMh	NiCd	LiIon	LeAc(Pb)	EDLC
30	1880	1820	1891	1311	2885
60	2460	2389	2418	1873	2940
90	2739	2663	2674	2165	2959
120	2903	2824	2829	2343	2968
150	3012	2929	2933	2463	2974
180	3089	3004	3009	2549	2977
210	3146	3059	3067	2613	2980
240	3190	3102	3113	2664	2982
270	3226	3136	3149	2704	2984
300	3255	3164	3180	2737	2985

Следует отметить, что тяговая нагрузка электроподвижного состава требует увеличения указанной энергоемкости для условий размещения устройств накопления электроэнергии в системах тягового электроснабжения постоянного и переменного тока, например, как это показано для постов секционирования, до значений около 1,5 и 12,0 МВт · ч соответственно [14, 15].

Различие разрядных характеристик, определяющее падение напряжение на шинах батарей аккумуляторов и суперконденсаторов, обуславливает различие в выборе энергоемкости для различных видов накопителей для бортовых и стационарных систем в тяговом электроснабжении, в том числе гибридных устройств и устройств с регулированием напряжения.

Апробация работы модели выполнена для двух вариантов размещения устройств накопления, в каждом из которых используется накопитель, построенный на базе одной из

четырёх рассмотренных аккумуляторных батарей (NiMh, NiCd, LiIon, LeAc(Pb)) и суперконденсатора (EDLC).

Результаты моделирования позволяют оценить для заданной электротяговой нагрузки характер изменения напряжения и степени заряженности накопителя, зарядная и разрядная характеристики которых заданы аналитически, а также диапазоны энергоемкости для различных режимов работы и используемых видов накопителей.

Дальнейшая работа по исследованию процессов работы устройств накопления на основе имитационного моделирования связана с совершенствованием модели в части дополнения блоками, учитывающими изменение тяговой нагрузки, ее ординаты, различные алгоритмы регулирования устройств накопления электроэнергии в системе тягового электроснабжения.

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00002, <https://rscf.ru/project/22-29-00002/>».

Список литературы

1. Realize your vision with Bombardier TALENT 3 BEMU / Bombardier. APTA 2019 Rail Conference. – 2019. – Текст : электронный. – URL: https://www.apta.com/wp-content/uploads/Realize-your-vision-with-Bombardier-TALENT-3-BEMU_Yves_Lappierre.pdf (дата обращения: 23.06.2022).

2. Deutsche Bahn baut erstmals Oberleitungsinselfür Regionalverkehr mit Akku-Zügen / Deutsche Bahn. – Текст : электронный. – URL: https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/Deutsche-Bahn-baut-erstmalsoberleitungsinselfuer-Regionalverkehr-mit-Akku-Zuegen-7343070.

3. Незевак, В. Л. Сравнение вариантов применения накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения и на электроподвижном составе / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2020. – № 9. – С. 17–23.

4. Закарюкин, В. П. Управление режимами систем тягового электроснабжения / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, С. М. Асташин. – Иркутск : Иркутский государственный университет путей сообщения, 2009. – 104 с. – Текст : непосредственный.

5. Марский, В. Е. Режимы работы системы тягового электроснабжения на линии Санкт-Петербург – Москва при пропуске двояных поездов «Сапсан» / В. Е. Марский. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт на современном этапе : 70 лет аспирантуре ОАО «ВНИИЖТ»: сборник трудов ученых ОАО «ВНИИЖТ». – Москва : ВМГ-Принт, 2014. – С. 111–120.

6. Анализ показателей работы силового оборудования системы тягового электроснабжения ОАО «РЖД» на основе мониторинга тяговых подстанций в режиме реального времени / М. П. Бадер, В. А. Гречишников, М. В. Шевлюгин, Ю. Н. Король. – Текст : непосредственный // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2011. – № 5-6. – С. 5–8.

7. Черемисин, В. Т. Организация контроля предельных режимов работы тяговой сети в условиях скоростного и тяжеловесного движения / В. Т. Черемисин, А. Л. Каштанов, В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2017. – № 1 (29). – С. 83–90.

8. Обоснование необходимости применения быстродействующего АПВ фидеров контактной сети переменного тока / Л. А. Герман, Е. В. Новиков, З. А. Фомина, Л. Г. Ручкина. – Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2015. – № 1. – С. 105–108.

9. Гибридный поезд. Как будет работать российский локомотив на аккумуляторах // gudok.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: https://gudok.ru/content/science_education/1598983/ (дата обращения: 01.04.2022).

10. Shiraishi S. (2003). Electric Double Layer Capacitors. *Carbon Alloys*, 447–457. doi:10.1016/b978-008044163-4/50027-9.

11. Dongen van L. A. M., Graaf van der R., Visscher W. H. M. Theoretical prediction of electric vehicle energy consumption and battery state-of-charge during arbitrary driving cycles. *EVC symposium VI proceedings*, 1981, pp. 1-13.

12. Shepherd C.M. Design of primary and secondary cell. *J. Electroche, SOC*, 1965, vol. 112, 657 p.
13. Stern O. Zur Theorie der Elektrolytischen Doppelschicht. *Zeitschrift für Elektrochemie*, 1924, no. 30, pp. 508-516, doi:10.1002/bbpc.192400182.
14. Незевак, В. Л. Условия работы системы накопления электроэнергии в тяговом электроснабжении постоянного тока однопутных участков железных дорог / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2021. – Т. 80. – № 4. – С. 216–224. – DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-4-216-224.
15. Незевак, В. Л. О сравнении энергетических параметров систем накопления электроэнергии для систем тягового электроснабжения постоянного и переменного тока / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2022. – Т. 81. – № 1. – С. 38–52. – DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-38-52.

References

1. Realize your vision with Bombardier TALENT 3 BEMU / Bombardier. APTA 2019 Rail Conference. – 2019. Available at: https://www.apta.com/wp-content/uploads/Realize-your-vision-with-Bombardier-TALENT-3-BEMU_Yves_Lappierre.pdf (accessed 23.06.2022).
2. Deutsche Bahn baut erstmals Oberleitungsinselfür Regionalverkehr mit Akku-Zügen / Deutsche Bahn. Available at: https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/Deutsche-Bahn-baut-erstmalsoberleitungsinselfuer-Regionalverkehr-mit-Akku-Zuegen-7343070 (accessed 23.06.2022).
3. Nezevak V.L. Comparison of application options for electric power storage devices in the traction power supply system and on electric rolling stock. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi sbornik – Transport: science, equipment, management. Scientific Information Collection*, 2020, no. 9, pp. 17-23 (In Russian).
4. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Astashin S.M. *Upravlenie rezhimami sistem tyagovogo elektrosnabzheniya* [Management of traction power supply system modes]. Irkutsk: Irkutsk State Transport University Publ., 2009, 104 p. (In Russian).
5. Marskij V.E. [Operating modes of the traction power supply system on the St. Petersburg – Moscow line]. *Zheleznodorozhnyi transport na sovremennom etape : 70 let aspiranture OAO «VNIIZhT»: sbornik trudov uchenykh OAO «VNIIZhT»* [Railway transport at the present stage : 70 years of postgraduate study of JSC «VNIIZhT»: collection of works of scientists of JSC «VNIIZhT»]. Moscow, VMG-Print Publ., 2014, pp. 111-120 (In Russian).
6. Bader M.P., Grechishnikov V.A., Shevlyugin M.V., Korol Y.N. Performance analysis of power system equipment of power supply system of traction jsc russian railways, based on monitoring of traction substations in real time. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta – Electronics and electrical equipment of transport*, 2011, no. 5-6, pp. 5-8 (In Russian).
7. Cheremisin V.T., Kashtanov A.L., Nezevak V.L. Organization of control limit operation mode traction network in the speed and heavy movement. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 1(29), pp. 83-90 (In Russian).
8. German L.A., Novikov E.V., Fomina Z.A., Ruchkina L.G. Substantiation of the need for fast-acting APV feeders of the alternating current contact network. *Nauka i tekhnika transporta – Science and Technology of Transportation*, 2015, no. 1, pp. 105-108 (In Russian).
9. *Gibridnyj poezd. Kak budet rabotat' rossijskij lokomotiv na akkumulyatorah* [Hybrid train. How the Russian battery-powered locomotive will work]. Available at: https://gudok.ru/content/science_education/1598983. (accessed 01.04.2022).
10. Shiraishi, S. (2003). Electric Double Layer Capacitors. *Carbon Alloys*, 447–457. doi:10.1016/b978-008044163-4/50027-9.
11. Dongen van L. A. M., Graaf van der R., Visscher W. H. M. Theoretical prediction of electric vehicle energy consumption and battery state-of-charge during arbitrary driving cycles. *EVC symposium VI proceedings*, 1981, pp. 1-13.

12. Shepherd C.M. Design of primary and secondary cell. *J. Electroche, SOC*, 1965, vol. 112, 657 p.
13. Stern O. Zur Theorie der Elektrolytischen Doppelschicht. *Zeitschrift für Elektrochemie*, 1924, no. 30, pp. 508-516, doi:10.1002/bbpc.192400182.
14. Nezevak V.L. Operating conditions of electric energy storage system in DC traction power supply for single-track sections of railways. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian railway science journal*, 2021, vol. 80, no. 4, pp. 216-224, DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-4-216-224 (In Russian).
15. Nezevak V.L. Comparison of energy parameters of electric storage systems for DC and AC traction power supply systems. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian railway science journal*, 2022, vol. 81, no. 1, pp. 38-52, DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-4-216-224 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Незевак Владислав Леонидович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: nezevakwl@mail.ru

Дмитриев Александр Дмитриевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (908) 117-96-71.

E-mail: alexandrorado@mail.ru

Тарута Павел Викторович

Трансэнерго – Филиал ОАО «РЖД», Западно-Сибирская дирекция по энергообеспечению, Новосибирская дистанция электроснабжения, Дорожная электротехническая лаборатория.

Спартака, д. 5а, г. Новосибирск, 6330007, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, начальник Дорожной электротехнической лаборатории.

Тел.: +7 (3832) 29-42-76.

E-mail: TarutaPV@wsr.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Незевак, В. Л. Имитационное моделирование работы устройств накопления электроэнергии в послеаварийных и вынужденных режимах работы системы тягового электроснабжения / В. Л. Незевак, А. Д. Дмитриев, П. В. Тарута. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 4 (52). – С. 22 – 31.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nezevak Vladislav Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Power supply of railway transport», OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: nezevakwl@mail.ru

Dmitriev Alexander Dmitrievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Power supply of railway transport», OSTU.

Phone: +7 (908) 117-96-71.

E-mail: alexandrorado@mail.ru

Taruta Pavel Viktorovich

Branch of Russian Railways, Transenergo, West-Siberian Directorate for Energy Supply, Novosibirsk Power Supply Distance, Road Electrotechnical Laboratory

5a, Spartak str., Novosibirsk, 6330007, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, head of the Road Electrotechnical Laboratory.

Phone: +7 (3832) 29-42-76.

E-mail: TarutaPV@wsr.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nezevak V.L., Dmitriev A.D., Taruta P.V. Simulation modeling of the operation of electricity storage devices in post-accident and forced operating modes of the traction power supply system. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 4 (52), pp. 22-31 (In Russian).

П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский, А. А. Хамнаева, В. В. Пахомов

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОРМОЗОВ ГРУЗОВОГО ПОЕЗДА ЗА СЧЕТ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ № 483

Аннотация. В настоящее время в тормозной системе эксплуатируемых вагонов существует проблема нехватки тормозного нажатия колодки на колесо, необходимого для движения поезда с установленной скоростью согласно нормативной документации. Это связано с тенденцией роста массы поездов и максимальной загрузки вагонов при неизменной массе тары, что требует расширенного диапазона регулирования давления в тормозном цилиндре воздухораспределителем или авторежимом в зависимости от загрузки вагона. Для решения этой проблемы были произведены расчеты тормозного коэффициента вагонов, оборудованных воздухораспределителями № 483, которые показали недостаточность оснащённости тормозами грузового вагона для следования в составе поезда с установленной скоростью. В ходе инженерных исследований выяснилось, что увеличение жесткости пружины груженого и среднего режимов может увеличить регулировочный диапазон воздухораспределителя и частично решить проблему нехватки тормозного нажатия. Таким образом, предлагается пересчитать жесткость регулировочной пружины. Произведены расчеты жесткости штатных и предлагаемых пружин. Заново рассчитан тормозной коэффициент с учетом увеличившейся жесткости пружины. В итоге этот коэффициент увеличился, что позволяет снять ограничения по скорости. Предложенный способ модернизации воздухораспределителя можно осуществлять на всех видах ремонта, что облегчает процесс внедрения.

Ключевые слова: тормоза, воздухораспределитель № 483, жесткость пружины, модернизация, тормозной цилиндр, безопасность движения поезда, пропускная и провозная способность железных дорог.

Pavel Y. Ivanov, Evgeny Y. Dulsky, Alyona A. Khamnaeva, Vadim V. Pakhomov

Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, the Russian Federation

EXPANSION OF THE ADJUSTMENT RANGE OF THE AIR DISTRIBUTOR № 483

Abstract. Currently, in the brake system of operated cars, there is a problem of lack of brake pressure on the wheel, which is necessary for the movement of the train at a set speed in accordance with the regulatory documentation. This is due to the tendency to increase the mass of trains and the maximum load of cars with a constant tare weight, which requires an extended range of pressure control in the brake cylinder by an air distributor or auto mode, depending on the load of the car. To solve this problem, calculations were made of the braking coefficient of cars equipped with air distributors № 483, which showed that the freight car was not equipped with brakes to run as part of a train at a set speed. In the course of engineering studies, it turned out that increasing the spring rate of loaded and medium modes can increase the adjusting range of the air distributor and partially solve the problem of lack of brake pressure. Thus, it is proposed to recalculate the stiffness of the adjusting spring. Calculations of the rigidity of regular and proposed springs were made. The braking coefficient has been recalculated, taking into account the increased spring constant. As a result, this coefficient has increased, which makes it possible to remove speed limits. The proposed method for upgrading the air distributor can be carried out on all types of repairs, which facilitates the implementation process.

Keywords: brakes, air distributor № 483, spring stiffness, modernization, brake cylinder, train traffic safety, throughput and carrying capacity of railways.

В настоящее время существует проблема нехватки тормозного нажатия для обеспечения безопасности движения поездов с установленной скоростью [1]. Установленная скорость движения поездов в зависимости от фактического тормозного нажатия определяется в нормативной документации «Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава» [4]. Такая проблема обусловлена неодновременным развитием эффективности тормозной системы грузового подвижного состава и разрешенной массы вагонов. Расчетная масса вагона, оборудованного чугунными колодками, при которой движение поезда с полной загрузкой не требует ограничений по скорости, составляет 85 тс. При такой массе вагона нажатие 7 тс на каждую ось обеспечит расчетный тормозной коэффициент на уровне 0,33, но в настоящее время масса

вагонов увеличена до максимально разрешенной путейцами 94 т для четырехосного вагона или 23,5 т на ось [3]. Таким образом, расчетный тормозной коэффициент снизился до 0,29, а это согласно Правилам требует введения ограничений скорости движения поезда. В настоящее время также широко эксплуатируются инновационные вагоны с осевой нагрузкой 25 тс на ось и раздельным торможением, обеспечивающим осевое нажатие у груженого вагона на уровне 7,5 тс в пересчете на чугунные колодки. В случае с инновационными вагонами расчетный тормозной коэффициент находится на уровне 0,3. Таким образом, происходит снижение допустимой скорости движения определенных групп поездов на 5 – 20 км/ч, что в результате снижает среднюю скорость движения поездов, следующих по удалению, и уменьшает пропускную и провозную способность железной дороги в целом.

В ходе инженерных исследований был выявлен способ решения описанной проблемы без изменения конструкции тормозной системы, за счет регулирования главной части ВР.

Для того чтобы повысить тормозную эффективность грузового вагона, необходимо повысить давление в тормозном цилиндре (ТЦ) [2]. Учитывая конструктивные особенности воздухораспределителя (ВР) усл. № 483, давление в ТЦ задается сжимающейся режимной пружиной через уравнительный поршень, следовательно, наиболее простым путем повышения давления ТЦ и тормозной эффективности вагона в целом является повышение жесткости режимной пружины, регулирующей средний и груженный режимы, так как согласно расчетам на порожнем режиме оснащённость тормозами грузового вагона при его порожнем состоянии составляет 0,29 при требуемом 0,33, а у порожнего вагона оснащённость тормозами находится на уровне 0,6 – 0,7, увеличение тормозной эффективности для вагона в порожнем режиме нецелесообразно.

Давление в ТЦ с одной стороны задается режимной пружиной и ограничивается запасом кинетической энергии газа, накопленного в запасном резервуаре (ЗР), и, следовательно, давление ТЦ имеет определенное ограничение. Для того чтобы рассчитать это ограничение, необходимо учитывать объем ЗР, объем соединительных трубопроводов, между ЗР ТЦ и объем ТЦ, который в свою очередь зависит от величины выхода штока и диаметра поршня. Расчетная схема для выяснения максимально возможного давления ТЦ приведена на рисунке 1.

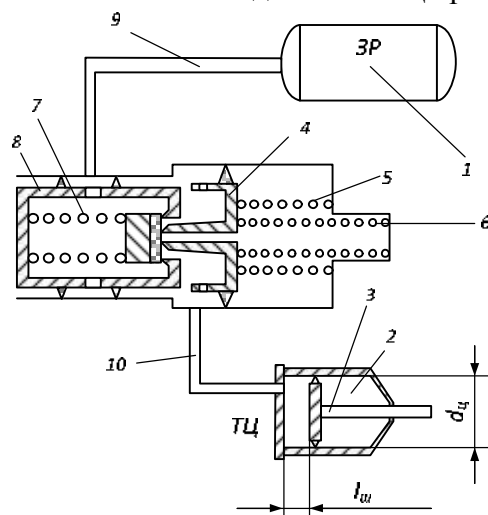


Рисунок 1 – Упрощенная схема элементов главной части воздухораспределителя, управляющих давлением ТЦ

На рисунке 1 цифрой 1 обозначается ЗР, который по воздухопроводам 9 и 10, через полость полого штока 8, тормозной клапан 6 сообщается с тормозным цилиндром (ТЦ) 2, объем которого зависит от величины выхода штока 3, величину выхода штока обозначим $L_{ш}$. Объем ЗР составляет 78 л. Вся кинетическая энергия сжатого газа, которую мы можем использовать для торможения, запасается в ЗР, следовательно, максимально возможное давление в ТЦ появится в тот момент, когда произойдет сообщение ЗР ТЦ без всяких препятствий и давление

в двух сосудах, т. е. ЗР и ТЦ, уравнивается через воздухопроводы 9 и 10, полость полого штока 8, а тормозной клапан 6 при этом будет открыт, не препятствуя этому сообщению. Таким образом вся кинетическая энергия ЗР равномерно распределится по системе ЗР воздухопровода ТЦ и несколько снизится. Давление, создаваемое данной энергией, и будет максимальным давлением ТЦ. Для того чтобы выяснить, какое в конечном итоге будет давление ТЦ при беспрепятственном сообщении с ЗР, вычислим объем ТЦ по формуле

$$V_{\text{ТЦ}} = S_{\text{ТЦ}} \cdot l_{\text{ш}} = \frac{d_{\text{ц}}^2}{4} \cdot \pi \cdot l_{\text{ш}}, \quad (1)$$

где $S_{\text{ТЦ}}$ – площадь поршня ТЦ;

$l_{\text{ш}}$ – выход штока;

$d_{\text{ц}}^2$ – диаметр поршня.

Вычислив объем ТЦ, можно выяснить величину снижения давления. Давление снижается пропорционально увеличению объема, следовательно, есть возможность составить пропорцию, из которой будет выведена формула, по которой можно рассчитать давление, распределенное из ЗР в ТЦ. Обозначим эту величину $P_{\text{ЗР+ТЦ}}$

$$P_{\text{ЗР+ТЦ}} = \frac{P_{\text{ЗР}} \cdot V_{\text{ЗР}}}{V_{\text{ЗР}} + V_{\text{ТЦ}}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{ЗР}}$ – давление ЗР начальное;

$V_{\text{ЗР}}$ – объем ЗР;

$V_{\text{ТЦ}}$ – объем ТЦ.

Вычисляем давление $P_{\text{ЗР+ТЦ}}$, подставляем цифры и получаем давление:

$$P_{\text{ЗР+ТЦ}} = \frac{5 \dots 5,5 \cdot 78}{78 + 3,5} = 4,78 \dots 5,26 \text{ кгс/см}^2.$$

Следовательно, максимально возможное давление, на которое можно настроить режимную пружину 5 и 6, равно $(4,78 \dots 5,26 \text{ кгс/см}^2, \text{ или } 0,487 \dots 5,26 \text{ МПа})$. Данная величина давления является ограничивающей при проектировании модернизированного узла главной части воздухораспределителя № 483.

Для осуществления модернизации воздухораспределителя, заключающейся в увеличении диапазона регулирования давления в тормозном цилиндре в сторону его верхнего предела, необходимо иметь характеристики пружин, участвующих в процессе задачки давления.

В воздухораспределителе имеются три пружины, показанные на рисунке 2.

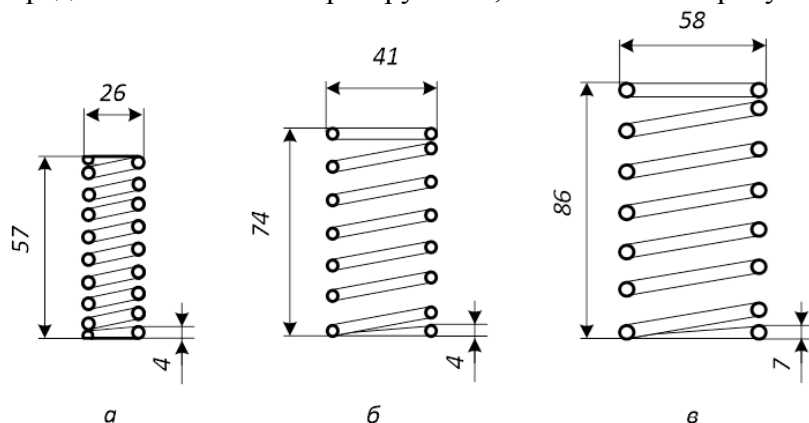


Рисунок 2 – Геометрические параметры исследуемых пружин: а – пружина груженого и среднего режима; б – пружина порожнего режима; в – пружина главного поршня

Самой крупной пружиной является пружина главного поршня, ее геометрические параметры представлены на рисунке 2, в. Средней по размерам является пружина, задающая давление на уравнильный поршень в порожнем режиме работы воздухораспределителя, ее

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

габаритные размеры приведены на рисунке 2, б. Самой маленькой пружиной является пружина, задающая давление в среднем и равнинном режимах работы воздухораспределителя, она изображена на рисунке 2, а.

Был проведен опыт по определению жесткости приведенных пружин. Для проведения опыта использовано оборудование, представленное на рисунке 3: блок измерительный БИУ-06М с выносным блоком чувствительных элементов, которое крепилось между нагрузочным устройством и пружиной.

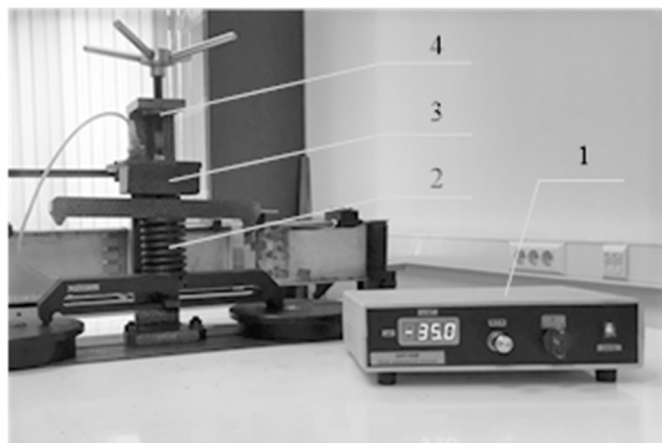


Рисунок 3 – Оборудование, использованное для определения параметров пружин:
1 – блок измерительный БИУ-06М; 2 – исследуемая пружина;
3 – выносной блок чувствительных элементов прибора БИУ-06М; 4 – нагрузочное устройство

Перед началом опыта были произведены замеры геометрических размеров пружин без нагрузки, после чего нагрузочным устройством задавалось усилие приращением 100 Н.

По результатам экспериментов были получены кривые зависимости усилия, создающего деформацию пружины. Данные кривые приведены на рисунке 4, где цифрой 1 обозначена характеристика пружины груженого и среднего режимов, цифрами 2 и 3 – характеристики пружины порожнего режима и пружины главного поршня соответственно.

На рисунке 4 изображена характеристика пружины порожнего режима воздухо-распределителя с учетом того, что она имеет начальное сжатие $\Delta x_{\text{нач}}$.

Имея данные характеристики, можно вычислить коэффициенты жесткости пружин.

Коэффициент жесткости пружины порожнего режима

$$k_{\text{пор}} = \frac{F_{\text{пор}}}{x}, \quad (3)$$

где $F_{\text{пор}}$ – сила, создаваемая пружиной порожнего режима при перемещении на величину x .

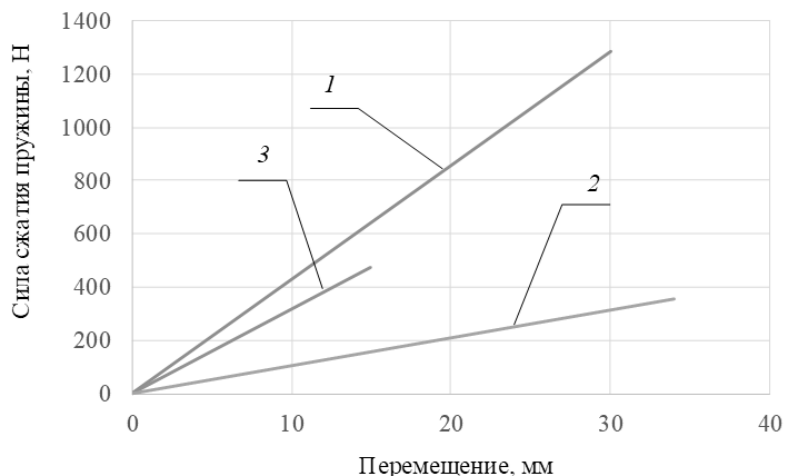


Рисунок 4 – Полученные характеристики исследуемых пружин: 1 – характеристика пружины груженого и среднего режимов; 2 – характеристика пружины порожнего режима; 3 – характеристика пружины главного поршня

В ходе экспериментальных исследований были получены следующие жесткости пружин. Коэффициент жесткости пружины порожнего режима

$$k_{\text{пор}} = 9,1 \text{ Н/мм};$$

коэффициент жесткости пружины главного поршня (ГП)

$$k_{\text{ГП}} = 27,8 \text{ Н/мм};$$

коэффициент жесткости пружины груженого и среднего режимов

$$k_{\text{г. с}} = 32,7 \text{ Н/мм}.$$

Работа главной части воздухораспределителя заключается в том, что главный поршень принимает на себя усилие, возникшее в результате разницы давлений рабочей камеры и золотниковой камеры, приложенное ко всей площади диска поршня. С другой стороны, на поршень действует пружина главного поршня. В результате балансирования двух этих сил поршень занимает некоторое положение, соответствующее величине разрядки тормозной магистрали.

Взаимное расположение элементов, участвующих в приведенном выше процессе представлено на рисунке 5. В результате разрядки тормозной магистрали возникает перемещение главного поршня на расстояние, обозначенное Δx , оно передается на уравнильный поршень, однако он перемещается под действием давления ТЦ, которое должно компенсироваться усилием пружин, сжимаемых на величину Δx .

От того, насколько сильно режимные пружины сопротивляются перемещению уравнильного поршня 3, показанного на рисунке 5, зависит величина давления ТЦ. Таким образом, регулировать давление в зависимости от загрузки вагона можно эксцентриком 8, обеспечивающим предварительное сжатие.

В порожнем режиме работы воздухораспределитель задает давление в ТЦ до максимальной величины значением 0,15 – 0,17 МПа, при этом уравнильный поршень удерживается только одной пружинной порожнего режима, а пружина груженого и среднего режимов находится в расслабленном положении и ее длина в торможении и в отпуске $l_{\text{г.р.}}$ составляет 57 мм.

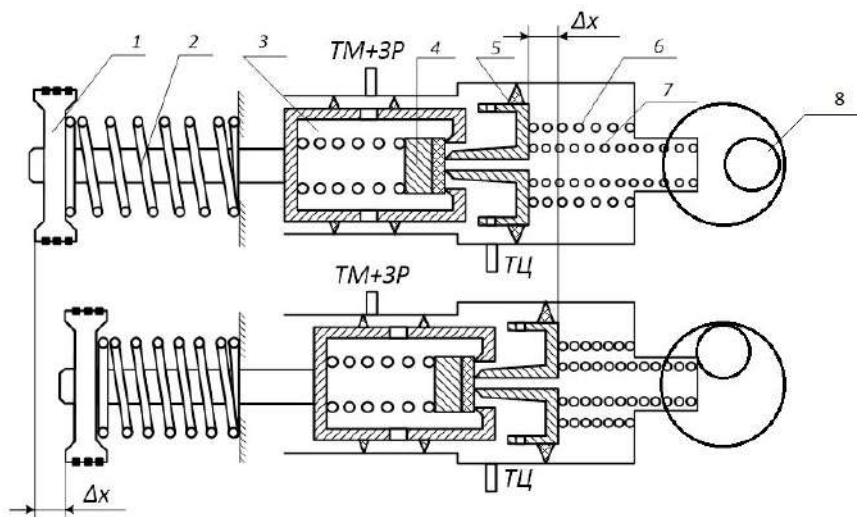


Рисунок 5 – Схема работы пружин воздухораспределителя при торможении: 1 – главный поршень; 2 – пружина главного поршня; 3 – полый шток главного поршня; 4 – тормозной клапан; 5 – уравнильный поршень; 6 – режимная пружина порожнего режима; 7 – режимная пружина груженого и среднего режимов; 8 – эксцентрик

В среднем режиме работы воздухораспределитель задает давление в ТЦ до максимальной величины значением 0,3 МПа, при этом уравнильный поршень удерживается пружинной

порожного режима с предварительным сжатием, которая усиливается пружиной среднего и груженого режимов, которая в момент начала перемещения поршня находится в расслабленном состоянии, однако валиком переключателя режимов подпирается таким образом, что при начале перемещения уравнильного поршня начинается ее сжатие на величину Δx .

В груженом режиме работы воздухораспределитель задает давление в ТЦ до максимальной величины значением 0,4 МПа, при этом уравнильный поршень удерживается пружиной порожнего режима с предварительным сжатием и параллельно пружиной среднего и груженого режимов, которая создает большее сопротивление движению уравнильного поршня.

Учитывая данную схему взаимодействия пружин, можно прийти к выводу, что изменить давление режимов средней и полной загрузки можно, изменив жесткость пружины порожнего и груженого режимов, либо обеспечить более раннее сжатие пружины среднего и груженого режимов.

Учитывая приведенные схемы, составим уравнения, описывающие равновесные процессы воздухораспределителя:

$$P_{п\ ТЦ} \cdot S_{уП} = (\Delta x_{нач} + \Delta x) \cdot k_{пор}; \quad (4)$$

$$P_{ср\ ТЦ} \cdot S_{уП} = (\Delta x_{нач} + \Delta x) \cdot k_{пор} + \Delta x \cdot k_{г.\ с}; \quad (5)$$

$$P_{гр\ ТЦ} \cdot S_{уП} = (\Delta x_{нач} + \Delta x) \cdot k_{пор} + (\Delta x_{г.\ с\ нач} + \Delta x) \cdot k_{г.\ с}, \quad (6)$$

где $P_{п\ ТЦ}$ – давление тормозного цилиндра на порожнем режиме;

$P_{ср\ ТЦ}$ – давление тормозного цилиндра на среднем режиме;

$P_{гр\ ТЦ}$ – давление тормозного цилиндра на груженом режиме;

$S_{уП}$ – площадь уравнильного поршня;

$k_{пор}$ – коэффициент жесткости пружины порожнего режима;

$k_{г.\ с}$ – коэффициент жесткости пружины груженого и среднего режимов;

$\Delta x_{нач}$ – начальное сжатие пружины порожнего режима;

Δx – ход поршня;

$\Delta x_{г.\ с\ нач}$ – начальное сжатие пружины груженого и среднего режимов.

Тогда давление тормозного цилиндра на груженом режиме можно вычислить по формуле

$$P_{гр\ ТЦ} = \frac{(\Delta x_{нач} + \Delta x) \cdot k_{пор} + (\Delta x_{г.\ с\ нач} + \Delta x) \cdot k_{г.\ с}}{S_{уП}}. \quad (7)$$

Тогда жесткость пружины, необходимую для создания заданной величины давления $P_{гр\ ТЦ}$, можно вычислить по формуле

$$k_{г.\ с} = \frac{P_{гр\ ТЦ} \cdot S_{уП} - (\Delta x_{нач} + \Delta x) \cdot k_{пор}}{\Delta x_{г.\ с\ нач} + \Delta x} \quad (8)$$

Вычислим необходимую жесткость для создания давления $P_{ЗР+ТЦ} = 0,478$ МПа:

$$k_{г.\ с} = \frac{478 \cdot 1,9 - (4 + 19) \cdot 9,1}{19} = 36,78 \text{ Н/мм}.$$

На основании произведенных расчетов были построены регулировочные характеристики воздухораспределителя № 483. Сравнение регулировочных характеристик приведено на рисунке 6.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Рассчитаем изменение тормозной эффективности согласно правилам тормозных расчетов: при штатном воздухораспределителе нажатие на ось на среднем режиме $F_{cp} = 5$ тс, на ось на груженом режиме $F_{гр} = 7$ тс.

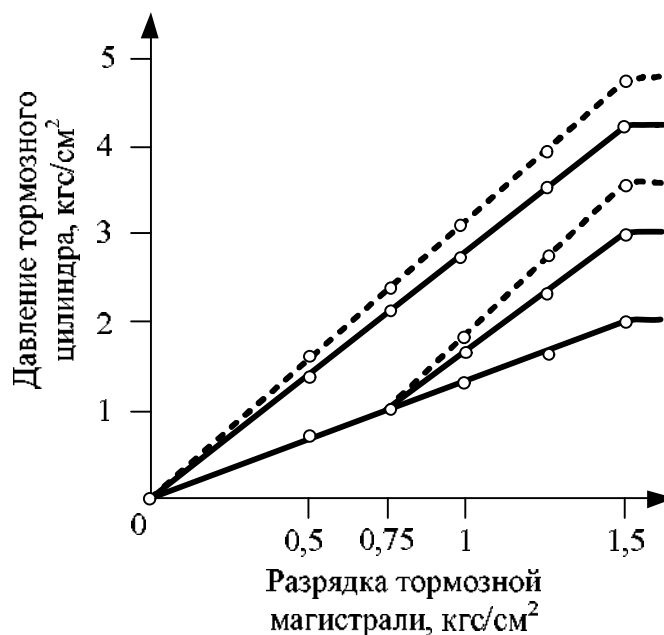


Рисунок 6 – Графики зависимости давления ТЦ от разрядки ТМ воздухораспределителя с усиленной пружиной (пунктирная линия) груженого, порожнего режимов и штатного воздухораспределителя (сплошная линия)

Рассчитаем потребное тормозное нажатие тяжелого поезда массой 6300 т условной длиной 67 вагонов.

Определим потребное тормозное нажатие (ПТН), необходимое для остановки поезда [2]:

$$\text{ПТН} = \frac{M \cdot \text{ЕНТН}_{100}}{100 \text{ тс}}, \quad (9)$$

где M – масса поезда в тонно-силах (для тяжелого поезда масса составляет 6300 тс);

ЕНТН_{100} – единое наименьшее тормозное нажатие необходимое для остановки грузового поезда, движущегося на уклоне до 10 ‰ со скоростью 90 км/ч на участке длиной 1500 м.

$$\text{ПТН} = \frac{6300 \text{ тс} \cdot 33 \text{ тс}}{100 \text{ тс}} = 2079 \text{ тс}.$$

Определим фактическое тормозное нажатие 67 стандартных вагонов поезда, у которых тормозное нажатие на ось составляет 7 тс:

$$\text{ФТН} = n_o \cdot \text{ТН}_o, \quad (10)$$

$$\text{ФТН} = 67 \cdot 4 \cdot 7 = 1876 \text{ тс}.$$

Произведем сравнение потребного и фактического нажатия:

$$\text{ПТН} > \text{ФТН}, \quad (11)$$

$$2079 \text{ тс} > 1876 \text{ тс}.$$

Нехватка нажатия

$$\Delta = \text{ПТН} - \text{ФТН}, \quad (12)$$

$$\Delta = 2079 \text{ тс} - 1876 \text{ тс} = 203 \text{ тс}.$$

Вычислим нехватку нажатия на каждые 100 тс веса поезда:

$$\Delta_{100} = \frac{\Delta \cdot 100 \text{ тс}}{M},$$
$$\Delta_{100} = \frac{203 \cdot 100 \text{ тс}}{6300} = 3,22 \text{ тс} \approx 4 \text{ тс.}$$
$$\Phi TH_{100} = \frac{\Phi TH \cdot 100 \text{ тс}}{M}, \quad (13)$$

$$\Phi TH_{100} = \frac{1876 \text{ тс} \cdot 100 \text{ тс}}{6300 \text{ тс}} = 29,7 \text{ тс} \approx 29 \text{ тс.}$$

Нехватка тормозного нажатия

$$\Delta_{100} = E TH_{100} - \Phi TH_{100}, \quad (14)$$

$$\Delta_{100} = 33 \text{ тс} - 29 \text{ тс} = 4 \text{ тс.}$$

Снижение скорости $4 \cdot 2 = 8$ км/ч округляем кратно 5 км/ч.

Скорость с 80 км/ч снижается на 10 км/ч и составляет 70 км/ч.

Рассчитаем фактическое тормозное нажатие 67 модернизированных вагонов поезда, у которых тормозное нажатие на ось составляет 8,225 тс, для удобства расчетов сократим нажатие до 8 тс на ось:

$$\Phi TH = n_o \cdot TH_o, \quad (15)$$

$$\Phi TH = 67 \cdot 4 \cdot 8 = 2144 \text{ тс.}$$

Произведем сравнение потребного и фактического нажатия:

$$PTH < \Phi TH,$$

$$2079 \text{ тс} < 2144 \text{ тс.}$$

Фактическое тормозное нажатие превышает потребное.

Предложенное решение по изменению жесткости пружины груженого и среднего режимов воздухораспределителя № 483 позволит увеличить фактическое тормозное нажатие на груженом и среднем режимах без изменения нажатия на порожнем режиме, таким образом, можно снять проблему нехватки тормозного нажатия у вагонов с полной загрузкой, что позволит тяжелым поездам двигаться со скоростью 90 км/ч по участкам с уклоном до 10‰ с трехзначной автоблокировкой согласно документу «Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава» [4]. Учитывая тот факт, что такие участки составляют большую часть магистралей на сети дорог ОАО «РЖД», а тяжелые поезда с нехваткой фактического тормозного нажатия следуют по ним со скоростями 70 – 80 км/ч, внедрение предложенных решений позволит заметно повысить техническую и участковую скорость движения поездов, пропускную и провозную способность участков и, как следствие, получить значительный экономический эффект.

Список литературы

1. Иванов, П. Ю. Повышение управляемости тормозов поезда / П. Ю. Иванов, Н. И. Мануилов, Е. Ю. Дульский. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – № 1 (57). – С. 103–109.
2. Иванов, П. Ю. Снижение энергопотребления электровоза при управлении пневматическими тормозами грузового поезда / П. Ю. Иванов, А. А. Хамнаева, А. М. Худонов. – Текст : непосредственный // Разработка и эксплуатация электротехнических

комплексов и систем энергетики и наземного транспорта : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2018. – С. 143–151.

3. Карпычев, В. А. Методика оценки тормозных нажатий / В. А. Карпычев, П. А. Андреев. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2011. – Т. 9. – № 4 (37). – С. 16–20.

4. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава (утв. Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества (протокол от 6–7 мая 2014 г. № 60)) (с изменениями и дополнениями).

References

1. Ivanov P.Yu., Manuilov N.I., Dulsky E.Yu., Cherevko M.N. Improving the controllability of train brakes. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2018, no. 1 (57), pp. 103-109 (In Russian).

2. Ivanov P.Yu., Khamnaeva A.A., Khudonogov A.M. *Razrabotka i ekspluatatsiia elektrotekhnicheskikh kompleksov i sistem energetiki i nazemnogo transporta: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Reducing the energy consumption of an electric locomotive when controlling the pneumatic brakes of a freight train]. [Development and operation of electrical complexes and systems of energy and land transport: Materials the third international scientific and practical conference]. Omsk, 2018, pp. 143-151 (In Russian).

3. Karpychev V.A., Andreev P.A. Technique to assess braking pressure. *Mir transporta – World of transport and transportation*, 2011, vol. 9, no. 4 (37), pp. 16-20 (In Russian).

4. Rules for the maintenance of brake equipment and control of the brakes of railway rolling stock (approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States (Minutes No. 60 dated May 6-7, 2014)) (as amended and supplemented) (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванов Павел Юрьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ИрГУПС.

Тел.: +7 (950) 065-21-77.

E-mail: savl.ivanov@mail.ru

Дульский Евгений Юрьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ИрГУПС.

Тел.: +7 (983) 403-46-43.

E-mail: e.dulskiy@mail.ru

Хамнаева Алена Александровна

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

Тел.: +7 (924) 714-12-15.

E-mail: alenalend95@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivanov Pavel Yurievich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Wagons and wagon economy», ISTU.

Phone.: +7 (950) 065-21-77.

E-mail: savl.ivanov@mail.ru

Dulsky Evgeny Yuryevich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Wagons and wagon economy», ISTU.

Phone.: +7 (983) 403-46-43

E-mail: e.dulskiy@mail.ru

Khamnaeva Alyona Aleksandrovna

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Electric rolling stock», ISTU.

Phone.: +7 (924) 714-12-15

E-mail: alenalend95@mail.ru

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Пахомов Вадим Викторович

Иркутский государственный университет путей
сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074,
Российская Федерация.

Студент кафедры «Электроподвижной состав»,
ИрГУПС.

Тел.: +7 (908) 211-79-12.

E-mail: vadim.repakhomov.2000@gmail.com

Pakhomov Vadim Viktorovich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, the Russian
Federation.

Student of the department «Electric rolling stock»,
ISTU.

Phone.: +7 (908) 211-79-12.

E-mail: vadim.repakhomov.2000@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Повышение эффективности тормозов грузового
поезда за счет улучшения характеристик воздухо-
распределителя № 483 / П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский,
А. А. Хамнаева, В. В. Пахомов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 4 (52). –
С. 32 – 41.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Ivanov P.Yu., Dulsky E.Yu., Khamnaeva A.A.,
Pakhomov V.V. Expansion of the adjustment range of the
air distributor № 483. Journal of Transsib Railway
Studies, 2022, no. 4 (52), pp. 32-41 (In Russian).

УДК 629.4.069

В. А. Минаков, В. К. Фоменко

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРОВ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДИЗЕЛЕЙ ЛОКОМОТИВОВ

Аннотация. Рассмотрена конструкция гидростатического привода вентилятора системы охлаждения дизелей пассажирских локомотивов серии ТЭП70 в/и. По результатам анализа неисправностей узлов и деталей системы охлаждения тепловозов установлено, что основными причинами выхода из строя гидростатического привода вентиляторов являются разрушение корпуса и перегрев подшипников гидромотора, утечка масла в месте установки резиновой диафрагмы и потеря жесткости пружины терморегулятора. Причинами возникновения перечисленных неисправностей чаще всего являются нарушение температурных режимов работы и низкий ресурс деталей.

В статье рассмотрены вопросы по повышению эффективности работы гидростатического привода вентилятора системы охлаждения дизелей локомотивов. Увеличения ресурса гидромотора можно достичь путем исключения холостого режима из времени его работы, так как он связан жесткой муфтой с ведущим валом от дизеля. Обеспечение независимости работы гидромотора относительно работы дизеля возможно с помощью изменения конструкции гидропривода вентилятора путем установки промежуточного звена для передаточного момента вращения вала только в период необходимой полезной работы при достижении определенной температуры масла. Для повышения надежности работы терморегулятора рассмотрена возможность установки дополнительного резинового кольца с повышенной силой натяга для безаварийной работы терморегулятора при достижении максимального давления и при снижении вязкости масла. Неисправность терморегулятора часто ведет к самым серьезным последствиям, вплоть до выхода локомотива из строя, где наиболее частой причиной является потеря жесткости пружины терморегулятора, с последующим заеданием золотника, что влияет на перенаправление потока масла, и, как следствие, высока вероятность повышения температуры масла и (или) воды в системе. Рассмотрены основные неисправности гидропривода вентилятора и способы их решения, что позволит значительно повысить надежность работы и эффективность работы пассажирских локомотивов.

Ключевые слова: тепловоз, гидропривод вентиляторов, система охлаждения, повышение эффективности, надежность.

INVESTIGATION OF RELIABILITY AND IMPROVEMENT OF THE EFFICIENCY OF THE HYDROSTATIC FAN DRIVE OF THE DIESEL LOCOMOTIVE COOLING SYSTEM

Abstract. *The design of the hydrostatic fan drive of the cooling system of diesel engines of passenger locomotives of the TEP70 all series is considered. According to the results of the analysis of malfunctions of components and parts of the cooling system of locomotives, it showed that the main reasons for the failure of the hydrostatic fan drive are: the destruction of the housing and overheating of the bearings of the hydraulic motor, oil leakage at the installation site of the rubber diaphragm and loss of rigidity of the spring of the thermostat. The reasons for which are often the temperature conditions and the life of the parts.*

The article discusses the issues of improving the efficiency of the hydrostatic fan drive of the cooling system of diesel locomotives. An increase in the life of the hydraulic motor can be achieved by eliminating idle from its operating time, since it is connected by a rigid coupling with the diesel shafts. Ensuring the independence of the operation of the hydraulic motor relative to the diesel engine is possible by changing the design of the hydraulic fan drive, by installing a viscous coupling for the transfer torque of the shaft only during the period of necessary useful work, when a certain oil temperature is reached. To increase the reliability of the thermostat, the possibility of installing an additional rubber diaphragm with increased tension force, for trouble-free operation of the thermostat when the pressure reaches 12 MPa and when the oil viscosity decreases, is considered. A malfunction of the thermostat often leads to the most serious consequences, up to the failure of the locomotive, where the most common cause is the loss of rigidity of the spring of the thermostat due to the jamming of the spool, which affects the redirection of the oil flow, and there is a high probability of an increase in the temperature of oil or water in the system. The considered main malfunctions of the hydraulic fan drive and ways to solve them will significantly increase the reliability of its operation and the efficiency of passenger locomotives.

Keywords: *diesel locomotive, hydraulic fan drive, cooling system, efficiency improvement, reliability.*

В условиях существующей тенденции к увеличению числа пассажирских перевозок, при возрастающих требованиях к обеспечению безопасности движения, одной из важнейших задач локомотивного хозяйства является обеспечение надежной работы тепловозов на протяжении всего жизненного цикла локомотива. В случае отсутствия необходимого уровня надежности такие показатели, как качество и экономичность, не могут быть полностью реализованы. Недостаточный уровень надежности может повлечь за собой снижение технической и экономической эффективности использования локомотивного парка, что приводит к росту затрат на перевозочную работу и неплановых видов ремонта вследствие отказов деталей и узлов тягового подвижного состава [1, 2].

Локомотивы серий ТЭП70, ТЭП70У, ТЭП70БС (далее – ТЭП70 в/и), хорошо зарекомендовавшие себя при различных условиях эксплуатации (произведено около 1000 тепловозов), являются основной тяговой единицей (тепловозом), задействованной в пассажирском движении железнодорожного транспорта России.

Отличительной конструкционной особенностью указанных локомотивов в сравнении с другими сериями тепловозов является применение гидростатического привода вентиляторов системы охлаждения дизеля (рисунок 1), обеспечивающего плавное регулирование частоты вращения вентилятора и обладающего большой перегрузочной способностью по мощности и крутящему моменту [3]. Гидростатический привод обеспечивает свободу компоновки вспомогательных агрегатов, так как элементы гидропривода связаны лишь трубопроводами и их можно устанавливать в удобных для обслуживания местах на локомотиве, а также имеет меньшую массу, чем приводы других типов (гидромеханический, электрический) [4, 5]. На рисунке 1 представлена упрощенная схема гидропривода вентиляторов системы охлаждения дизелей пассажирских локомотивов серии ТЭП70 в/и.

Результаты анализа эксплуатационных показателей гидростатического привода вентиляторов тепловозов ТЭП70 в/и указывают на эффективную работу системы, но также и на невысокую надежность отдельных узлов и деталей. Установлено, что отказы, приходящиеся на детали и узлы

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

гидростатического привода, были причиной выхода локомотивов на непланный вид ремонта по причине неисправности системы охлаждения и задержек пассажирского движения поездов.

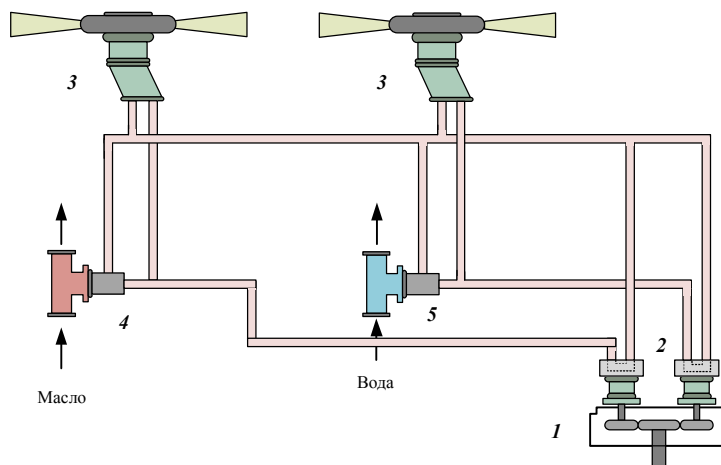


Рисунок 1 – Упрощенная схема гидропривода вентиляторов системы охлаждения: 1 – мультипликатор (повышающий редуктор); 2 – гидронасосы; 3 – гидромотор; 4 – терморегулятор (по температуре масла); 5 – терморегулятор (по температуре воды)

На основании выполненного анализа надежности деталей и элементов гидростатического привода установлено, что основными причинами отказов являются разрушение корпуса и перегрев подшипников гидромотора, потеря жесткости пружины и утечка масла на месте установки мембраны терморегулятора.

1. Разрушение корпуса гидромотора.

Гидромотор серии МН 250/160К представляет собой аксиально-поршневую нерегулируемую гидромашину с двойным несиловым карданом, наклонной осью блока цилиндров и торцевым распределением жидкости, приводом вала является повышающий редуктор от коленчатого вала дизеля. При работе гидромотора поршни с шатунами, совершают в блоке цилиндров возвратно-поступательное движение, при этом осуществляется всасывание и нагнетание рабочей жидкости.

Долгое время одной из самых распространенных неисправностей гидросистемы на локомотиве серии ТЭП70 являлось разрушение корпуса гидромотора в связи с отсутствием дренажной системы на гидромоторе МН 250/160, поэтому они были заменены на модернизированные гидромоторы типа МН 250/160К. С заменой типа гидромотора количество случаев разрушения корпуса уменьшилось, но все же является одной из основных типов неисправностей, возникающих в процессе эксплуатации.

Разрушение элементов (подшипников, шатунов) и корпуса гидромотора (рисунок 2) является одной из частых неисправностей, возникающих в процессе эксплуатации. В случае возникновения подобного рода отказов дальнейшая эксплуатация локомотива запрещается.



а



б

Рисунок 2 – Разрушение корпуса гидромотора: а – корпус гидромотора; б – подшипник гидромотора

Основными причинами разрушения элементов гидромотора являются гидроудар, возникающий вследствие заедания золотника перепускного клапана (будет рассмотрено далее), и невысокая надежность его элементов, которые должны иметь такую же наработку до отказа, как и дизель, поскольку гидромотор включен в работу постоянно с помощью отбора мощности от коленчатого вала дизеля. Так как значительную часть времени локомотивы работают в режиме холостого хода или выбега, гидромотором совершается циркуляция масла из бака и обратно в бак, при этом отсутствует его полезная работа и происходит естественный износ составных частей гидромотора, тем самым снижая ресурс его элементов.

Увеличение ресурса гидромотора возможно только путем исключения холостого времени работы. Обеспечение независимости работы гидромотора от дизеля возможно с помощью изменения конструкции привода путем установки промежуточного звена, в качестве которого может выступать электродвигатель или муфта, обеспечивающая привод гидромотора только в период необходимой полезной работы системы охлаждения дизеля.

Изменение конструкции гидростатического привода вентилятора включением промежуточного звена для привода гидромотора позволит существенно увеличить ресурс гидромотора и уменьшить вероятность возникновения отказа в процессе работы, что повышает уровень работоспособности гидромотора.

2. Утечка масла через уплотнительное кольцо терморегулятора.

Нормальная работа системы гидропривода обеспечивается при использовании турбинного масла (ГОСТ 32–74) [7, 8]. Выбор сорта масла для гидропривода вентилятора связан с температурным режимом эксплуатации, где нежелательна работа при повышении температуры масла свыше 90 °С. Оптимальная рабочая температура масла находится в пределах 60 – 70 °С. Превышение температуры масла способствует уменьшению его вязкости, возможности потерь в результате утечек, снижению КПД и, как следствие, выходу элементов гидронасоса из строя. Гидромеханический КПД гидронасоса рассчитывается по формуле:

$$\eta = \frac{2\pi M}{\Delta P V_0}, \quad (1)$$

где M – измеренный крутящий момент насос-мотора, Н·м;

P – перепад давления, МПа;

V_0 – рабочий объем масла в системе, см³.

Рабочий объем масла в системе рассчитывается, см³:

$$V_0 = \frac{Q}{n 10^{-3}}, \quad (2)$$

где Q – расход рабочей жидкости в системе при измерении расходомером, л/мин;

n – частота вращения расходомера, мин⁻¹.

Согласно уравнениям (1), (2) при постоянном гидромеханическом КПД гидронасоса повышение давления в системе зависит от крутящего момента насос-мотора, а в случае с уменьшением вязкости масла повышается вероятность его утечки через уплотняющие элементы в соединениях.

Во время эксплуатации локомотива случается, что температура масла достигает критических значений, что связано с режимами работы дизель-генераторной установки (ДГУ), массой состава, профилем пути, погодными условиями и т. д. Так, при следовании локомотива по участку с затяжным подъемом, боковым или встречным ветром дизель работает на номинальных режимах с повышенной температурой воды и масла. В таких случаях высока вероятность утечки турбинного масла в месте установки уплотнительного кольца (рисунок 3, б) терморегулятора (рисунок 3, а) [9].

Для повышения надежности работы терморегулятора и снижения вероятности утечки масла при достижении давления в системе 2 МПа рассмотрена возможность установки дополнительного резинового кольца с повышенной силой натяга, что позволит увеличить вероятность безаварийной работы терморегулятора при достижении максимального давления и при снижении вязкости масла. Установка дополнительного резинового кольца терморегулятора применялась при выполнении ТО и ТР локомотивов ТЭП60, что положительно сказалось на надежности системы.

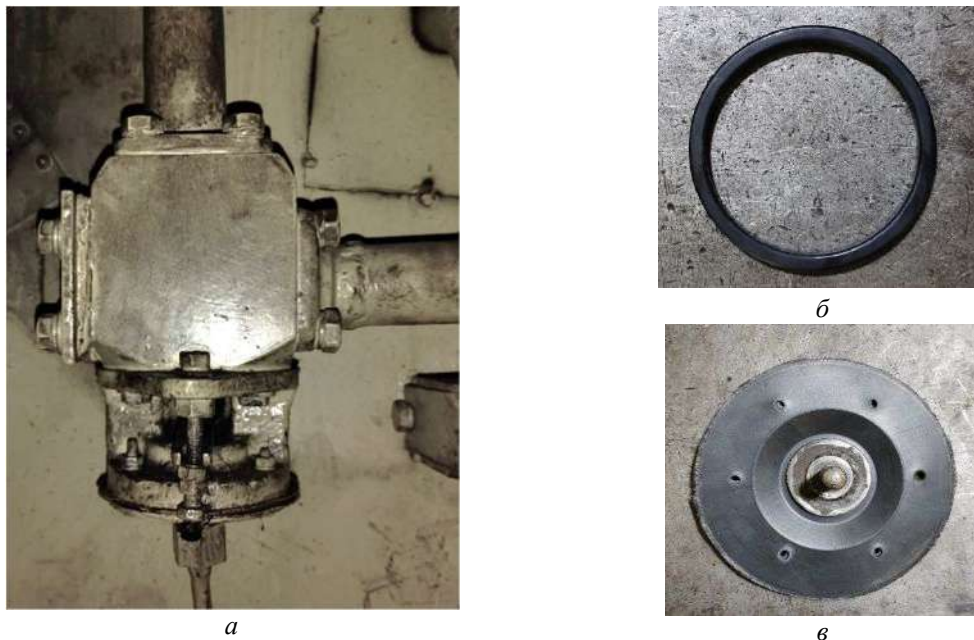


Рисунок 3 – Терморегулятор гидропривода вентилятора:
а – терморегулятор; б – уплотнительное кольцо; в – резиновая диафрагма

3. Потеря жесткости пружины терморегулятора.

Работа терморегулятора (клапан перепускной ТЭП75.10.30.001СБ) заключается в регулировании потока масла, поступающего к гидродвигателю, перемещением золотника терморегулятора, тем самым изменяя частоту вращения вентиляторов охлаждения. Перемещение золотника терморегулятора осуществляется посредством сжатого воздуха через резиновую диафрагму (рисунок 3, в) при превышении температуры воды или масла в системе дизеля. Ранее, на первых версиях локомотивов серии ТЭП70, датчик температуры терморегулятора омывался водой или маслом дизеля и под действием температуры среды изменялся объем наполнителя датчика (церезин смешанный с алюминиевой пудрой), что вызывало перемещение золотника терморегулятора [5, 10].

Потеря жесткости пружины терморегулятора возникает после определенного времени его эксплуатации. Продолжительность наработки пружины до отказа определить сложно, так как ее ресурс определяется количеством сжатий и растяжений, температуры рабочей жидкости, качеством обслуживания и ремонта. При наличии потери жесткости пружины (рисунок 4) высока вероятность возникновения

гидроудара вследствие резкого подъема золотника терморегулятора, и как результат – разрушение или излом шатуна гидромотора;

несвоевременного или частичного срабатывания терморегулятора по причине заедания золотника, что влияет на перенаправление потока масла в системе и вероятность превышения допустимых значений температуры.

Указанные последствия потери жесткости пружины терморегулятора, как правило, приводят к выходу локомотива из строя с последующим ремонтом элементов гидростатического привода вентилятора системы охлаждения дизелей.



а



б

Рисунок 4 – Пружина терморегулятора гидростатического привода

Повышения надежности работы терморегулятора можно достичь выполнением своевременной оценки работоспособности пружины, а именно определением силы упругости. Известно, что сила упругости $F = k\Delta l$ определяется коэффициентом жесткости k и расстоянием Δl , на которое изменилась длина пружины в результате растяжения. Имея показатель коэффициента жесткости пружины, получаемый при изготовлении и проверке, перед установкой в корпус терморегулятора необходимо осуществлять ее периодический контроль специализированными машинами для испытания на растяжение и сжатие. Таким образом, необходимо внести изменения в руководящий документ и технологический процесс ремонта и технического обслуживания гидростатического привода вентиляторов в объеме ТР-1, что, в свою очередь, повлечет увеличение трудоемкости операций. Вместе с тем следует отметить, что исключение выхода локомотива из строя по причине неисправностей терморегулятора гидростатического привода вентилятора, существенно окупает затраты на техническое обслуживание или ремонт локомотива.

Рассмотренные основные неисправности деталей и узлов гидростатического привода вентиляторов системы охлаждения дизелей и представленные способы их решения позволят значительно повысить надежность и эффективность работы пассажирских локомотивов.

Список литературы

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года. Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации 17 июня 2008 г. № 877-р. – Москва : Правительство Российской Федерации; Транспорт, 2008. – 171 с. – Текст : непосредственный.
2. Семенов, А. П. Разработка модели управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования / А. П. Семенов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 58–65.
3. Пассажирский тепловоз ТЭП70 / В. Г. Быков, Б. Н. Морошкин, Г. В. Серделевич, Ю. В. Хлебников. – Москва : Транспорт, 1976. – 232 с. – Текст : непосредственный.
4. Грудин, Н. А. Тепловозы ТЭП70 и 2ТЭП70. Механическое оборудование, устройство и ремонт / Н. А. Грудин. – Курск : Славянка, 2014. – 200 с. – Текст : непосредственный.
5. Осин, Г. Г. Устройство и эксплуатация тепловозов серии ТЭП70БС (ТЭП70У) / Г. Г. Осин. – Москва : ОАО «Российские железные дороги», 2015. – 266 с. – Текст : непосредственный.

6. Теория и конструкция локомотивов / Г. С. Михальченко, В. Н. Кашников, В. С. Косов, В. А. Симонов. – Москва : Транспорт, 2006. – 584 с. – Текст : непосредственный.
7. Асламова, В. С. Системный анализ причин возникновения пожаров на локомотивах ОАО «РЖД» / В. С. Асламова, Е. Ю. Фролова. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – № 4 (60). – С. 63–70.
8. Кононов, В. Е. Справочник машиниста тепловоза / В. Е. Кононов, А. В. Скалин, Н. М. Хуторянский. – Москва : Транспорт, 2005. – 293 с. – Текст : непосредственный.
9. Черток, Е. В. Совершенствование гидростатического привода вентиляторов холодильника тепловоза ТЭП70 / Е. В. Черток. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – № 2 (23). – С. 116–126.
10. Горячев, Д. Н. Система управления приводом вентиляторов модернизированной БМП-3 / Д. Н. Горячев. – Текст : непосредственный // Сборник трудов 15 ЦНИИ МО РФ. – 2009. – С. 164–170.

References

1. Rossijskaya Federaciya. Pravitel'stvo. Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossijskoj Federacii do 2030 goda (Russian Federation. Government. Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030). Moscow, Transport Publ., 2008, 171 p. (In Russian).
2. Semenov A.P. Development of a model for managing the life cycle of locomotives using modern methods of technical diagnostics. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 3 (43), pp. 58-65 (In Russian).
3. Bykov B.G. *Passazhirskij teplovoz TEP70* (Passenger diesel locomotive TEP70). Moscow, Transport Publ., 1976, 232 p. (In Russian).
4. Grudin N.A. *Teplovozy TEP70 i 2TEP70. Mekhanicheskoe oborudovanie, ustrojstvo i remont* [Diesel locomotives TEP70 and 2TEP70. Mechanical equipment, device and repair]. Kursk, Slavyanka Publ., 2014, 200 p. (In Russian).
5. Osin G.G. *Ustrojstvo i ekspluatatsiya teplovozov serii TEP70BS (TEP70U)* [Design and operation of diesel locomotives of the TEP70BS series (TEP70U)]. Moscow, Transport Publ: JSC «RZhD», 2015, 266 p. (In Russian).
6. Mihal'chenko G.S., Kosov V.S., Simonov V.A. *Teoriya i konstrukciya lokomotivov* [Theory and design of locomotives]. Moscow, Transport Publ., 2006, 584 p. (In Russian).
7. Aslamova V.S., Frolova E.U. System analysis of the causes of fires on locomotives of JSC «Russian Railways». *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2018, no. 4 (60), pp. 63-70 (In Russian).
8. Kononov V.E. *Spravochnik mashinista teplovoza* [Diesel locomotive Driver's Handbook]. Moscow, Transport Publ., 2005, 293 p. (In Russian).
9. Chertok E.V. Improvement of the hydrostatic drive of the refrigerator fans of the TEP70 diesel locomotive. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia – Proceedings of Petersburg transport university*, 2005, no. 2 (23), pp. 116-126 (In Russian).
10. Goryachev D.N. Fan drive control system of the upgraded BMP-3. *Sbornik trudov 15 CNII MO RF – Proceedings of the 15th Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation*, 2009, pp. 164-170 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Минаков Виталий Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Minakov Vitalii Anatolievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 37-60-82.
E-mail: vitalya_13@mail.ru

Ph. D. in Engineering, associate professor of the
department «Locomotives», OSTU.
Phone: +7 (3812) 37-60-82.
E-mail: vitalya_13@mail.ru

Фоменко Валентин Константинович
Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская
Федерация.
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Локомотивы», ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 37-60-82.
E-mail: fomenkovk@mail.ru

Fomenko Valentin Konstantinovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian
Federation.
Ph. D. in Engineering, associate professor of the
department «Locomotives», OSTU.
Phone: +7 (3812) 37-60-82.
E-mail: fomenkovk@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Минаков, В. А. Исследование надежности и
повышение эффективности работы гидростатического
привода вентиляторов системы охлаждения дизелей
локомотивов / В. А. Минаков, В. К. Фоменко. – Текст :
непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. –
№ 4 (52). – С. 41 – 48.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Minakov V.A., Fomenko V.K. Investigation of
reliability and improvement of the efficiency of the
hydrostatic fan drive of the diesel locomotive cooling
system. Journal of Transsib Railway Studies, 2022,
no. 4 (52), pp. 41-48 (In Russian).

УДК 621.715.4

Д. В. Муравьев, К. В. Артюхов

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ СБОРКИ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СООСНОСТИ МОТОРНО-ОСЕВЫХ ПОДШИПНИКОВ ЛОКОМОТИВОВ МЕТОДАМИ РАЗМЕРНОГО АНАЛИЗА

Аннотация. Статья посвящена описанию требований к точности контрольных приспособлений и разработке методов обеспечения заявленной размерной точности методами размерного анализа. Перечислены условия обеспечения точности схемы сборки, определения размерной цепи и размерного анализа размерной цепи при сборке контрольного приспособления, а также основные причины возникновения погрешностей при сборке и пути их устранения. Кроме того, представлены последствия влияния нерегламентированных зазоров в сопряжениях деталей контрольного приспособления на точность измерений, рассмотрены различные виды сборочных размерных цепей, задачи, решаемые при расчете размерной цепи. В работе приведена составленная размерная цепь технологического процесса сборки средства измерений для контроля соосности вкладышей моторно-осевых подшипников тяговых электродвигателей локомотивов, которая представляет размерную цепь первого типа и является цепью с линейными размерами и расположенными вертикально параллельными звеньями. Цель работы заключается в обосновании рассчитанных допусков и предельных отклонений звеньев сборочной размерной цепи, обеспечивающих требуемое значение замыкающего звена для правильного функционирования собираемого средства измерений. В работе описываются выбор замыкающего звена размерной цепи, выбор составляющих размерную цепь звеньев, расчет предельных отклонений замыкающего звена, обеспечивающих требуемую точность измерений при эксплуатации контрольного приспособления и расчет предельных отклонений составляющих звеньев размерной цепи по методу «максимума-минимума». Таким образом, в статье представлено решение проектной задачи размерного анализа, заключающейся в определении точности составляющих звеньев размерной цепи при сборке контрольного приспособления по известному рассчитанному допуску замыкающего звена и его предельным отклонениям.

Ключевые слова: сборка, размерный анализ, приспособление, точность, замыкающее звено, допуск, натяг, технологический процесс, контроль, размерная цепь.

Dmitry V. Muravyov, Kirill V. Artyukhov

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

ENSURING THE ACCURACY OF THE ASSEMBLY OF THE DEVICE FOR MONITORING THE ALIGNMENT OF MOTOR-AXIAL BEARINGS OF LOCOMOTIVES METHODS OF DIMENSIONAL ANALYSIS

Abstract. The article is devoted to the description of the requirements for the accuracy of control devices and the development of methods to ensure the claimed dimensional accuracy by methods of dimensional analysis. The conditions for ensuring the accuracy of the assembly scheme, the determination of the dimensional chain and dimensional analysis of the dimensional chain during the assembly of the control device, as well as the main causes of errors during assembly and ways to eliminate them are listed. In addition, the consequences of the influence of irregular gaps in the interfaces of the control device parts on the measurement accuracy are presented, various types of assembly dimensional chains are considered, tasks solved when calculating the dimensional chain. The paper presents a compiled dimensional chain of the technological process of assembling a measuring instrument for monitoring the alignment of the inserts of motor-axial bearings of traction electric motors of locomotives, which represents a dimensional chain of the first type and is a chain with linear dimensions and vertically parallel links. The purpose of the work is to substantiate the calculated tolerances and limit deviations of the links of the assembly dimensional chain, providing the required value of the closing link for the proper functioning of the assembled measuring instrument. The paper describes the selection of the closing link of the dimensional chain, the selection of the links that make up the dimensional chain, the calculation of the limiting deviations of the closing link that ensure the required measurement accuracy during operation of the control device and the calculation of the limiting deviations of the components of the links of the dimensional chain by the "maximum-minimum" method. Thus, the article presents a solution to the design problem of dimensional analysis, which consists in determining the accuracy of the component links of the dimensional chain when assembling the control device according to the known calculated tolerance of the closing link and its limit deviations.

Keywords: assembly, dimensional analysis, adaptation, accuracy, closing link, tolerance, tension, technological process, control, dimensional chain.

Предметом исследования является технологический процесс сборки приспособления для контроля соосности и радиального биения моторно-осевых подшипников (МОПов) локомотивов, представленного на рисунке 1 [1].

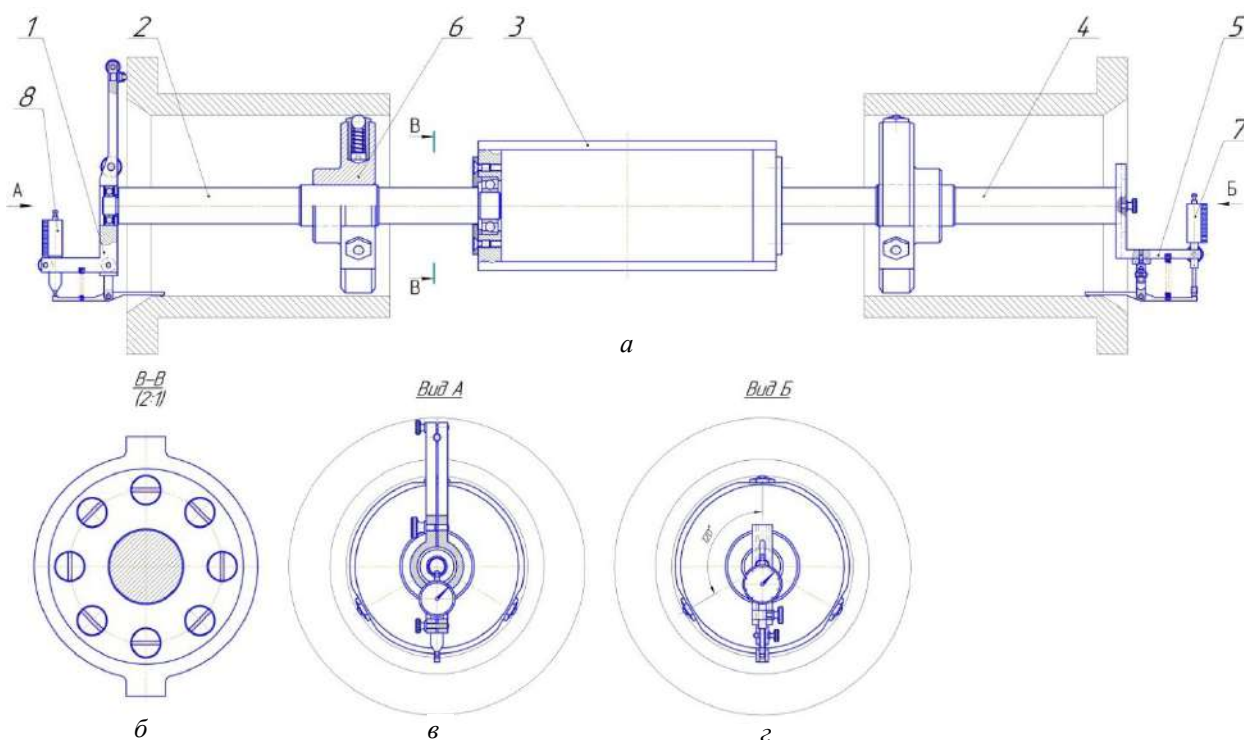


Рисунок 1 – Приспособление для контроля соосности и радиального биения МОПа

Приспособление состоит из следующих основных узлов: измерительной головки 1 для контроля радиального биения с индикатором 8 часового типа ИРБ 0...0,8 мм (ГОСТ 5584–75),

левого вала 2, корпуса 3, правого вала 4, измерительной головки 5 с индикатором 7 часового типа ИЧ 50-0,01 (ГОСТ 577–68) для контроля соосности вкладышей МОПа и опор 6 (см. рисунок 1).

Нарушение точности сборки, технологических требований при сборке или конструктивных требований к деталям и узлам приспособления при их изготовлении влечет за собой следующие негативные последствия при эксплуатации собираемого приспособления и выполнении измерений:

увеличение погрешности измерений в результате смещения измерительных контактных и направляющих элементов приспособления и замыкающих деталей в подвижных шарнирных сочленениях при наличии повышенных зазоров и люфтов в соединениях с зазором;

повышение интенсивности изнашивания замыкающих деталей приспособления, расположенных в подвижных соединениях, за счет увеличенного зазора и свободного хода деталей в сопряжениях;

возникновение трудностей при настройке измерительных головок приспособления для выполнения измерений отклонений от соосности и радиального биения при увеличении зазоров в подвижных соединениях сверх нормативных значений;

нарушение правильного положения деталей, приводящее к разбалансировке отдельных сборочных единиц, входящих в конструкцию приспособления.

Целью реализации сборочного процесса в машиностроении не только при сборке контрольно-измерительных приспособлений, но и при сборке узлов и агрегатов машин и технологического оборудования в целом является установление размеров заданных звеньев в пределах их полей допусков для обеспечения нахождения суммарного поля допуска сборочной цепи T_{Σ} в его заданных предельных границах $T[A]$.

Условие обеспечения точности схемы сборки будет иметь вид [2]:

$$T_{\Sigma} \leq T[A]. \quad (1)$$

Совокупность сопряженных размеров, образующая в процессе сборочных операций замкнутый контур и влияющая на один размер в этом контуре, называется сборочной размерной цепью, или размерной цепью сборочного процесса.

Зависимость, которая описывает эту сборочную размерную цепь в формализованном виде, называется уравнением размерной цепи.

В любой размерной цепи имеется один размер, который является цифровым выражением технического требования к собираемому узлу. Такой размер формируется автоматически по окончании сборочных операций данного узла. В зависимости от точности изготовления деталей и качества сборки механизма этот указанный размер колеблется в определенном интервале. Следовательно, он в зависимости от величины колебания характеризует степень точности, с которой изготовлен и далее собран соответствующий узел.

Результирующий размер, который определяет степень точности размерной цепи и образующийся в ней автоматически в процессе выполнения сборочных работ, называется замыкающим звеном.

Следовательно, исходя из сформулированных выше определений можно сделать два важных вывода:

- 1) размерная цепь представляет группу звеньев, взаимодействующих между собой и образующих замкнутый контур;
- 2) размерная цепь представляет собой группу звеньев, совместно влияющих на особое звено, которое называется замыкающим.

Наибольшая часть размерных цепей, описывающих сборочные процессы в машинах и механизмах, состоит из звеньев, располагающихся параллельно друг другу. Следовательно, их всегда можно привести к двум параллельным ветвям, одна из которых имеет положительное направление от начала координат, а вторая – отрицательное направление.

Цепи с параллельными и непараллельными звеньями относятся к размерным цепям с линейными размерами.

Известно, что одни линейные размеры не могут в полной мере определить положение детали в сборочной единице, поскольку для определения ее положения нужно знать, насколько параллельны между собой или взаимно перпендикулярны поверхности или оси сопрягаемых деталей.

При этом параллельность или перпендикулярность поверхностей определяется наличием или отсутствием угла между ними. Например, отклонение от строгой перпендикулярности является отклонением от угла, который равен 90° . Отклонение же от параллельности является отклонением угла от 0° или 180° . Размеры, которые определяются углами, называются угловыми размерами.

Анализ механизмов с нешарнирными сопряжениями показывает, что все отклонения звеньев от параллельности, перпендикулярности или угла зависят только от величин угловых отклонений сопрягаемых деталей.

Угловые размеры также представляются в виде размерных цепей, где они могут указываться как в градусном, так и в линейном измерении, и образуют они также замкнутый контур со своим замыкающим звеном.

Существуют цепи, в которых на величину замыкающего звена оказывают влияние как линейные, так и угловые размеры. В этом случае замыкающее звено в такой цепи должно быть обязательно линейным размером, а составляющие звенья могут входить в нее в виде как линейных, так и угловых размеров.

Исходя из рассмотренных разновидностей сборочных размерных цепей их можно классифицировать следующим образом:

- 1) цепи с линейными размерами и параллельными звеньями;
- 2) цепи с линейными размерами и непараллельными звеньями;
- 3) цепи с угловыми размерами;
- 4) цепи с линейными и угловыми размерами (смешанные).

Размерные цепи первого типа относятся к линейным цепям, так как их замыкание происходит по двум параллельным линиям.

Размерные цепи второго, третьего и четвертого видов относятся к плоским цепям, поскольку их замыкание осуществляется в плоскости.

Кроме линейных и плоских цепей в практике размерного моделирования встречаются и пространственные цепи, в которых положение замыкающего звена определяется в пространстве. В этом случае задача сводится к рассмотрению двух или трех плоских цепей, звенья которых располагаются во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Следующей разновидностью сборочных размерных цепей являются независимые и связанные размерные цепи. Известно, что любая сборочная размерная цепь может быть независимой от других цепей или связанной с другими цепями в собираемом узле. Эта взаимосвязь проявляется в том, что разные размерные цепи имеют общие звенья в данном узле и, следовательно, оказывают влияние через них друг на друга.

В процессе рассмотрения сборочной размерной цепи решаются две расчетные задачи.

Первая задача определяет суммарную накопленную ошибку при сборке в замыкающем звене заданной размерной цепи и сравнивает ее с допусковым значением (проверочная задача).

Следовательно, первая задача сводится к определению суммарного поля допуска всех звеньев, образующих данную сборочную цепь, когда закончилось конструирование узла и окончательно установлены требования к его точности.

Исходя из этого обстоятельства можно определить параметры замыкающего звена и ответить на вопрос собираемости данной конструктивной единицы исходя из тех требований, которые к ней предъявляются.

Вторая задача заключается в численном подборе допусков звеньев, образующих данную сборочную цепь, при условии, что суммарный допуск в этих звеньях не будет выходить за требуемые пределы допуска замыкающего звена (проектная задача) [3].

Вторая задача определяет приемлемый метод достижения точности замыкающего звена при известных его предельных размерах и номинальных значениях составляющих звеньев. Эта задача решается на стадии проектирования узла. Например, при заданном зазоре при сборке размерной цепи требуется нормировать точностные параметры составляющих звеньев, обеспечивающие заданную точность конструктивной единицы [4, 5].

На рисунке 2, *а – в* представлена размерная цепь технологического процесса сборки средства измерений для контроля соосности вкладышей моторно-осевых подшипников тяговых электродвигателей (ТЭД) локомотивов. Составленная размерная цепь относится к размерным цепям первого типа и является цепью с линейными размерами и параллельными звеньями, расположенными вертикально.

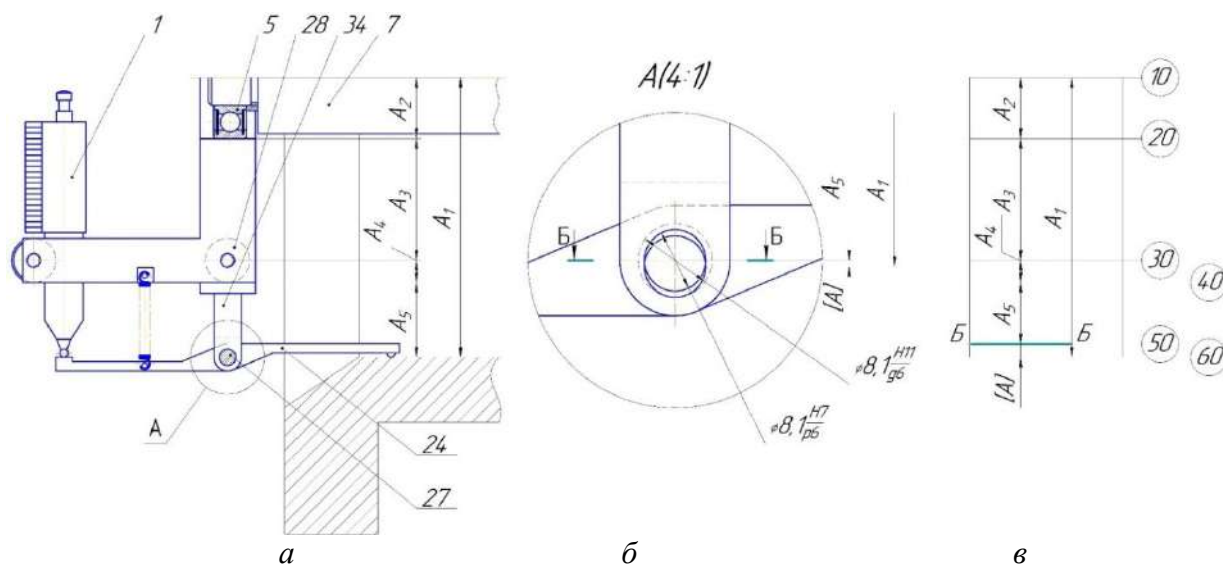


Рисунок 2 – Размерная цепь технологического процесса сборки средства измерений для контроля соосности вкладышей моторно-осевых подшипников ТЭД локомотивов: *а* – измерительная головка; *б* – шарнирное соединение измерительного мостика; *в* – схема размерной сборочной цепи

При составлении размерной цепи в качестве замыкающего звена $[A]$ был установлен зазор в отверстии измерительного мостика 24 между стенками отверстия и цилиндрической поверхностью оси 27, поскольку ось 27 запрессовывается при сборке в отверстие вилки 34 с гарантированным натягом по посадке $H7/p6$, а в отверстие измерительного мостика 24 вводится с гарантированным зазором по посадке $H11/g6$ для свободного вращения измерительного мостика при выполнении измерений и передаче силового воздействия на измерительный стержень индикатора часового типа 1.

Кроме того, к составным звеньям размерной сборочной цепи относятся следующие параметры:

- 1) A_1 – результирующий размер, расстояние от оси симметрии вала 7 до контролируемой поверхности вкладыша МОПа;
- 2) A_2 – расстояние от оси симметрии вала 7 до наружного диаметра подшипника 5;
- 3) A_3 – расстояние от наружного диаметра подшипника 5 до оси симметрии резьбового отверстия под установку фиксатора 28;
- 4) A_4 – расстояние от оси симметрии резьбового отверстия под установку фиксатора 28 до плоской опорной поверхности вилки 34;
- 5) A_5 – расстояние от плоской опорной поверхности вилки 34 до оси симметрии отверстия в измерительном мостике 24 под ось 27.

При условии, что номинальный диаметр оси составляет 8,1 мм, при посадке оси в отверстие измерительного мостика по посадке H11/g6 с гарантированным зазором, равным 0 мм, величина максимального $[A_{\max}]$ и минимального $[A_{\min}]$ зазоров в сопряжении будет рассчитываться следующим образом [6]:

$$ES(A) = [A_{\max}] = ES(H11) - EI(g6); \quad (2)$$

$$EI(A) = [A_{\min}] = EI(H11) - ES(g6), \quad (3)$$

где $ES(H11)$, $EI(H11)$ – верхнее и нижнее отклонения поля допуска H11 номинального размера отверстия измерительного мостика, мм;

$ES(g6)$, $EI(g6)$ – верхнее и нижнее отклонения поля допуска g6 номинального размера оси, мм;

$$[A_{\max}] = 0,09 - (-0,014) = 0,104 \text{ мм};$$

$$[A_{\min}] = 0 - (-0,005) = 0,005 \text{ мм}.$$

Таким образом, был рассчитан размер замыкающего звена $[A] = 0^{+0,104}_{+0,005}$ мм.

Рассмотрена последовательность расчетов размерной сборочной цепи по методу «максимума-минимума» на примере модели размерной цепи спроектированного средства измерений, представленной на рисунке 2.

Установлено, что при назначении допусков на размеры $A_1 - A_5$, образующие рассматриваемую размерную цепь, колебания указанных размеров в пределах интервалов этих допусков будут вызывать колебание размера замыкающего звена $[A]$.

Для определения предельных значений этих колебаний было введено обозначение верхнего предельного отклонения размера A_i через $ES(A_i)$ и его нижнего предельного отклонения через $EI(A_i)$, тогда предельные отклонения для размеров $A_1 - A_5$ были записаны следующим образом:

- 1) для размера $A_1 - ES(A_1)$ и $EI(A_1)$;
- 2) для размера $A_2 - ES(A_2)$ и $EI(A_2)$;
- 3) для размера $A_3 - ES(A_3)$ и $EI(A_3)$;
- 4) для размера $A_4 - ES(A_4)$ и $EI(A_4)$;
- 5) для размера $A_5 - ES(A_5)$ и $EI(A_5)$.

Далее определялись граничные значения колебаний перечисленных размеров с использованием модели размерной цепи, которая приведена на рисунке 2, в.

В рассматриваемой размерной цепи начало системы координат Б-Б располагается сверху замыкающего звена $[A]$.

Из рисунка 2, в следует, что наибольший размер замыкающего звена $[A]$ будет получен при наибольшем предельном размере звена A_1 и наименьших предельных размерах звеньев $A_2 - A_5$ и, наоборот, минимальный размер замыкающего звена будет достигнут при наименьшем предельном размере звена A_1 и наибольших предельных размерах звеньев $A_2 - A_5$.

Эти определения были формализованы при помощи двух зависимостей следующего вида:

$$[A] + ES[A] = (A_1 + ES(A_1)) - ([A_2 + EI(A_2)] + [A_3 + EI(A_3)] + [A_4 + EI(A_4)] + [A_5 + EI(A_5)]); \quad (4)$$

$$[A] + EI[A] = (A_1 + EI(A_1)) - ([A_2 + ES(A_2)] + [A_3 + ES(A_3)] + [A_4 + ES(A_4)] + [A_5 + ES(A_5)]). \quad (5)$$

Далее было выполнено вычитание уравнения (5) из уравнения (4), что позволило получить следующее уравнение:

$$ES[A] - EI[A] = (ES(A_1) - EI(A_1)) + (ES(A_2) - EI(A_2)) + (ES(A_3) - EI(A_3)) + (ES(A_4) - EI(A_4)) + (ES(A_5) - EI(A_5)). \quad (6)$$

В левой и правой частях уравнения (6) находились допуски на соответствующие звенья A_i размерной цепи в соответствии с рисунком 2, что позволило записать зависимость (6) в более компактном виде:

$$T_{\Sigma} = T(A_1) + T(A_2) + T(A_3) + T(A_4) + T(A_5). \quad (7)$$

Далее, с использованием выражения (1) решалась проектная задача, которая заключалась в следующем: по известному допуску замыкающего звена $[A]$ и его предельным отклонениям рассчитать точность составляющих звеньев $A_1 - A_5$ размерной цепи.

При расчете сборочных размерных цепей авторы оперировали допусками на размеры звеньев, образующих данную цепь.

Таким образом, допуск на размер замыкающего звена $[A]$ в соответствии с формулами (2) и (3) составил

$$T_{[A]} = [A_{\max}] - [A_{\min}] = 0,104 - 0,005 = 0,099 \text{ мм}. \quad (8)$$

Из зависимости (1) следует, что при заданном допуске на замыкающее звено $[A]$ величины допусков на составляющие звенья $A_1 - A_5$ в цепи будут тем меньше, чем большее их количество будет в данной размерной цепи. Это значит, что детали спроектированного средства измерений должны обрабатываться с более высокой точностью [7, 8].

В полученном выше уравнении (7) все параметры представляют собой допуски без указания на значения, а также на знаки предельных отклонений соответствующих размеров. Следовательно, они представляют абсолютные величины допусков. Значит, зависимость (7) в единственном виде рационально использовать в случаях, когда поля допусков на составляющие звенья располагаются симметрично относительно своего номинала и значения их предельных отклонений очевидны.

Таким образом, было отмечено, что суммарный допуск звеньев $A_1 - A_5$ размерной цепи не должен превышать 0,099 мм, а уравнение рассматриваемой размерной цепи приняло вид:

$$[A] = A_{1EI(A_1)}^{ES(A_1)} - \left(A_{2EI(A_2)}^{ES(A_2)} + A_{3EI(A_3)}^{ES(A_3)} + A_{4EI(A_4)}^{ES(A_4)} + A_{5EI(A_5)}^{ES(A_5)} \right), \quad (9)$$

откуда были выражены значения верхнего ES и нижнего EI предельных отклонений соответствующих звеньев $A_1 - A_5$, которые обеспечивают допуски звеньев размерной цепи, в сумме удовлетворяющих условию (1).

Исходя из поставленной задачи был выполнен подбор полей допусков на звенья размерной цепи $A_1 - A_5$ [9, 10]:

1) Для размера $A_1 - 136,35 \text{ js6 } (\pm 0,0125)$:

$ES(A_1) = +0,0125 \text{ мм}; EI(A_1) = -0,0125 \text{ мм}.$

Величина допуска на звено A_1

$$T_{A_1} = 0,0125 - (-0,0125) = 0,025 \text{ мм};$$

2) Для размера A_2 – по диаметру подшипника $60 k6^{+0,021}_{+0,002}$:

$ES(A_2) = +0,021 \text{ мм}; EI(A_2) = +0,002 \text{ мм}.$

Величина допуска на звено A_2 рассчитывалась как половина допуска на общий диаметр наружного кольца подшипника:

$$T_{A_2} = \frac{0,021 - 0,002}{2} = 0,0095 \text{ мм}.$$

1) Для размера $A_3 - 59,4 \text{ js6 } (\pm 0,0095)$:

$ES(A_3) = +0,0095 \text{ мм}; EI(A_3) = -0,0095 \text{ мм}.$

Величина допуска на звено A_3

$$T_{A_3} = 0,0095 - (-0,0095) = 0,019 \text{ мм.}$$

2) Для размера $A_4 - 10,8 \text{ мм}^{+0,018}_{+0,007}$:

$$ES(A_4) = +0,018 \text{ мм; } EI(A_4) = +0,007 \text{ мм.}$$

Величина допуска на звено A_4

$$T_{A_4} = 0,018 - 0,007 = 0,011 \text{ мм.}$$

3) Для размера $A_5 - 36,4 \text{ Н7}^{+0,025}$:

$$ES(A_5) = +0,025 \text{ мм; } EI(A_5) = 0 \text{ мм.}$$

Величина допуска на звено A_5

$$T_{A_5} = 0,025 - 0 = 0,025 \text{ мм.}$$

После выбора квалитетов точности и определения допусков звеньев размерной цепи $A_1 - A_5$ был выполнен расчет суммарного допуска T_Σ размерной цепи по формуле (7):

$$T_\Sigma = 0,025 + 0,0095 + 0,019 + 0,011 + 0,025 = 0,0895 \text{ мм.}$$

Далее была проведена проверка неравенства (1):

$$T_\Sigma \leq T[A],$$

$$0,0895 \leq 0,099.$$

Полученные в работе результаты позволили определить допуски и предельные отклонения звеньев размерной цепи $A_1 - A_5$, обеспечивающие требуемое значение замыкающего звена $[A]$ для правильного функционирования собираемого приспособления для контроля соосности и радиального биения МОПов и обеспечения единства и точности измерений, а также составить практические рекомендации по обеспечению качества обработки отдельных поверхностей деталей приспособления при их изготовлении.

Таким образом, рассчитанный допуск замыкающего звена сборочной размерной цепи приспособления, равный 0,099 мм, обеспечивает требуемую точность измерений при контроле соосности и радиального биения МОПов, составляющую 0,14 мм [1].

Список литературы

1. Муравьев, Д. В. Методика контроля соосности и радиального биения вкладышей моторно-осевых подшипников тяговых электродвигателей локомотивов / Д. В. Муравьев, О. П. Супчинский. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 3 (47). – С. 78–89.
2. Морозов, И. М. Основы технологии сборки в машиностроении : учебное пособие. / И. М. Морозов, В. Ю. Шамин. – Челябинск : Южно-Уральский государственный университет, 2006. – 72 с. – Текст : непосредственный.
3. Маталин, А. А. Технология машиностроения : учебник / А. А. Маталин. – Санкт-Петербург : Лань, 2020. – 512 с. – Текст : непосредственный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/143709> (дата обращения: 01.12.2022).
4. Белишкіна, Т. А. Обработка результатов многократных измерений : методические указания / Т. А. Белишкіна, А. Г. Вяткин. – Санкт-Петербург : Петербургский государст-

венный университет путей сообщения, 2017. – 23 с. – Текст : непосредственный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/111767> (дата обращения: 01.12.2022).

5. Перемитина, Т. О. Метрология, стандартизация и сертификация : учебное пособие / Т. О. Перемитина. – Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2016. – 150 с. – Текст : непосредственный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/110248> (дата обращения: 01.12.2022).

6. РД 50-635–87. Цепи размерные. Основные понятия. Методы расчета линейных и угловых цепей. – Москва : Издательство стандартов, 1987. – 46 с. – Текст : непосредственный.

7. Проектирование технологических процессов машиностроительных производств : учебник / В. А. Тимирязев, А. Г. Схиртладзе, Н. П. Солнышкин, С. И. Дмитриев. – Санкт-Петербург : Лань, 2021. – 384 с. – Текст : непосредственный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/168684> (дата обращения: 01.12.2022).

8. Должиков, В. П. Технологии наукоемких машиностроительных производств : учебное пособие / В. П. Должиков. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 304 с. – Текст : непосредственный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/212423> (дата обращения: 01.12.2022).

9. Анализ качества изделия транспортного машиностроения : учебное пособие / И. А. Иванов, С. В. Урушев, Д. П. Кононов [и др.]. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения, 2018. – 74 с. – Текст : непосредственный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/138100> (дата обращения: 01.12.2022).

10. Гущин, С. Н. Технические измерения : учебно-методическое пособие / С. Н. Гущин. – Киров : Вятская государственная сельскохозяйственная академия, 2017. – 102 с. – Текст : непосредственный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/129608> (дата обращения: 01.12.2022).

References

1. Muravyov D.V., Supchinsky O.P. Method of control of alignment and radial runout of inserts of motor-axial bearings of traction electric motors of locomotives. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 3 (47), pp. 78-89 (In Russian).

2. Morozov I.M., Shamin V.Yu. *Osnovy tekhnologii sborki v mashinostroyenii* [Fundamentals of assembly technology in mechanical engineering]. Chelyabinsk, South Ural State University Publ., 2006, 72 p. (In Russian).

3. Matalin A.A. *Tekhnologiya mashinostroyeniya* [Technology of mechanical engineering]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2020, 512 p. (In Russian). Available at: <https://e.lanbook.com/book/143709> (accessed 01.12.2022).

4. Belishkina T.A., Vyatkin A.G. *Obrabotka rezultatov mnogokratnykh izmereniy* [Processing of the results of multiple measurements]. St. Petersburg, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University Publ., 2017, 23 p. (In Russian). Available at: <https://e.lanbook.com/book/111767> (accessed 01.12.2022).

5. Peremitina T.O. *Metrologiya. standartizatsiya i sertifikatsiya* [Metrology, standardization and certification]. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics Publ., 2016, 150 p. (In Russian). Available at: <https://e.lanbook.com/book/110248> (accessed 01.12.2022).

6. Guidance document № 50-635–87. Dimensional chains. Basic concepts. Methods for calculating linear and angular chains. Moscow, Publishing House of Standards, 1987, 46 p. (In Russian).

7. Timiryazev V.A., Skhirtladze A.G., Solnyshkin N.P., Dmitriev S.I. *Proyektirovaniye tekhnologicheskikh protsessov mashinostroitelnykh proizvodstv* [Designing technological processes of machine-building industries]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2021, 384 p. (In Russian). Available at: <https://e.lanbook.com/book/168684> (accessed 01.12.2022).

8. Dolzhikov V.P. *Tekhnologii naukoemkikh mashinostroitelnykh proizvodstv* [Technologies of high-tech machine-building industries]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2022, 304 p. (In Russian). Available at: <https://e.lanbook.com/book/212423> (accessed 01.12.2022).

9. Ivanov I.A., Urushev S.V., Kononov D.P. and others. *Analiz kachestva izdeliya transportnogo mashinostroyeniya* [Analysis of the quality of a transport engineering product]. St. Petersburg, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University Publ., 2018, 74 p. (In Russian). Available at: <https://e.lanbook.com/book/138100> (accessed 01.12.2022).

10. Gushchin S.N. *Tekhnicheskiye izmereniya* [Technical measurements]. Kirov, Vyatka State Agricultural Academy Publ., 2017, 102 p. (In Russian). Available at: <https://e.lanbook.com/book/129608> (accessed 01.12.2022).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Муравьев Дмитрий Валерьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: mdvomsk@yandex.ru

Артюхов Кирилл Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Заведующий лабораториями кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: kirill_a3_1997@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Муравьев, Д. В. Обеспечение точности сборки приспособления для контроля соосности моторно-осевых подшипников локомотивов методами размерного анализа / Д. В. Муравьев, К. В. Артюхов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 4 (52). – С. 48 – 57.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Muravyov Dmitry Valerievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Technologies of transport engineering and repair of rolling stock», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: mdvomsk@yandex.ru

Artyukhov Kirill Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Head of laboratories of the department «Technologies of transport engineering and repair of rolling stock», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: kirill_a3_1997@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Muravyov D.V., Artyukhov K.V. Ensuring the accuracy of the assembly of the device for monitoring the alignment of motor-axial bearings of locomotives methods of dimensional analysis. Journal of Transsib Railway Studies, 2022, no. 4 (52), pp. 48-57 (In Russian).

УДК 656.2:629.424.1:621.316

Г. Ю. Кузнецов, Е. Ю. Логинова

Российский университет транспорта (РУТ(МИИТ)), г. Москва, Российская Федерация

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОНОМНЫХ ЛОКОМОТИВОВ ЛИТИЙ-ИОННОЙ ТЯГОВОЙ БАТАРЕЕЙ

Аннотация. В настоящей статье рассматривается возможность применения в энергетической схеме автономного локомотива (тепловоза) гибридного источника энергии, который представляет собой дизельный двигатель внутреннего сгорания и тяговый накопитель энергии, выполненный в исполнении литий-ионной аккумуляторной батареи.

Цель работы заключается в описании эффективности работы тягового накопителя энергии в режиме тяги и в режиме запуска дизельного двигателя внутреннего сгорания. При этом штатная свинцово-кислотная аккумуляторная батарея исключается из схемы вагона и заменяется тяговой аккумуляторной батареей.

Методами численного моделирования в статье рассмотрены возможность запуска дизельного двигателя внутреннего сгорания тяговой литий-ионной аккумуляторной батареи, возможность увеличения момента тяговых электродвигателей и технические характеристики локомотива при включении литий-ионной тяговой аккумуляторной батареи в качестве дополнительного источника энергии в режимах тяги.

Актуальность полученных результатов заключается в получении данных по увеличению весовой нормы поезда при использовании на тепловозе гибридного источника энергии.

Результаты работы демонстрируют эффективность применения тяговой аккумуляторной батареи при использовании в режиме тяги и при запуске дизельного двигателя и улучшение при этом эксплуатационных характеристик локомотива.

Выводы работы содержат в себе анализ полученных результатов математического моделирования применения тяговой аккумуляторной батареи.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, тяговый подвижной состав, гибрид, тяговая аккумуляторная батарея, повышение эксплуатационных характеристик.

Grigorii Yu. Kuznetsov, Elena Yu. Loginova

Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, the Russian Federation

INCREASING THE TECHNICAL CHARACTERISTICS OF AUTONOMOUS LOCOMOTIVES BY A LITHIUM-ION TRACTION ACCUMULATOR BATTERY

Abstract. The main subject of this article is consideration of the possibility of applying in electric circuit of the diesel locomotive hybrid power source, that consists of diesel internal combustion engine and traction energy storage (li-ion accumulator battery).

The main target of this work is to describe the effectiveness of the applying Li-ion energy storage in traction and diesel internal combustion engine start modes.

At the same time, the regular used lead-acid battery is excluded from the locomotive circuit and replaced by a traction accumulator battery.

By using numerical simulation methods, the article considers the possibility of starting a diesel internal combustion engine with a traction li-ion accumulator battery and possibility of the increasing the torque of electric traction motors and technical characteristics of the locomotive when the li-ion traction accumulator battery is turned on as an additional source of energy.

The relevance of the results is to get data about increasing carrying mass of the train when using a hybrid energy source on a diesel locomotive.

The results of the work demonstrate the effectiveness of the use of a traction battery in traction and engine start modes, while improving the performance of the locomotive.

The conclusions of the work contain an analysis of the results of mathematical modeling of the use of a traction battery.

Keywords: railways, traction rolling stock, hybrid, traction accumulator battery, performance improvement.

Современные железные дороги Российской Федерации выполняют большой объем перевозочной работы, поэтому тяговые свойства локомотивов имеют определяющее значение в эффективности работы железнодорожного транспорта в целом. Задача повышения тяговых свойств локомотивов обосновывает применение на них перспективного оборудования с большим прогнозируемым ресурсом. Особенно важна эта задача для автономных локомотивов, поскольку многие удаленные участки протяженных железных дорог России не электрифицированы и обслуживаются тепловозами. Возможность повысить силу тяги тепловоза на сложных участках профиля увеличивает эффективность работы железной дороги, снижает потребность в подвижном составе, повышает технические характеристики эксплуатации поездов.

Указанная тема в настоящее время является актуальной по причине необходимости сокращения потребления топливно-энергетических ресурсов и, соответственно, снижения загрязнения окружающей среды выхлопными газами дизельного топлива.

Китайская компания CRRC, которая является одним из крупнейших производителей тягового подвижного состава, в 2021 г. спроектировала и поставила в Европу свой первый гибридный локомотив. Данный локомотив способен проехать на одном заряде около 10 км [1].

Компанией АО «Трансмашхолдинг» в партнерстве с группой компаний Ctrl2GO представили на выставке 1520 «PRO//Движение.Экспо» гибридный автономный маневровый локомотив ТЭМ5Х с номинальной мощностью накопителя энергии 240 кВт с дистанционным управлением и системой машинного зрения и экономией топлива до 30 % [2].

Производитель подвижного состава CZ LOKO в настоящее время на своих производственных территориях изготавливает первый в своей линейке гибридный локомотив DualShunter 2000. Ориентировочная готовность локомотива – 2023 год [3].

Принципиальная схема тягового привода. В настоящее время рассматривается вопрос применения на тепловозах гибридных источников энергии, состоящих из дизеля – как основного источника и тягового накопителя энергии (НЭТа), аккумуляторной батареи большой емкости – как вспомогательного источника энергии [4]. Алгоритм работы энергетической системы предусматривает использование на тяжелых режимах работы мощности обоих источников – дизеля и батареи, а на частичных или режиме выбега – только дизеля. Энергетическая цепь гибридного тепловоза предусматривает работу двух источников энергии на тяговые электродвигатели (рисунок 1).

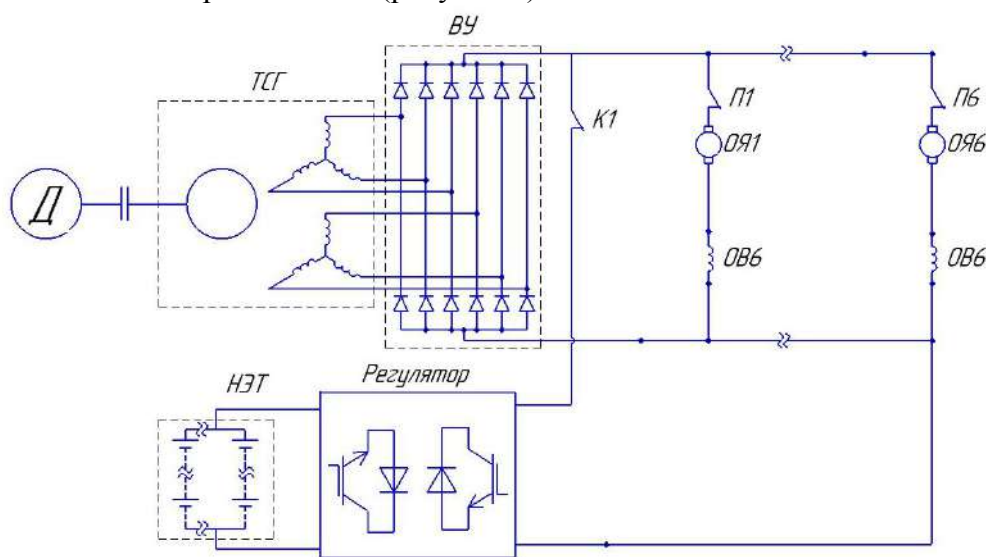


Рисунок 1 – Принципиальная схема гибридной энергетической установки тепловоза

Применительно к тепловозу с энергетической системой переменного-постоянного тока основной источник энергии состоит из дизеля Д, тягового синхронного генератора (ТСГ) с комбинированной системой управления, выпрямительной установки (ВУ) и тяговых электродвигателей (ТЭД) 1 – 6, электрически состоящих из обмоток якорей (ОЯ) 1 – 6 и обмоток возбуждения (ОВ) 1 – 6, а также поездных контакторов (П) 1 – 6 для подключения тяговых электродвигателей к силовой цепи. Дополнительный источник энергии состоит из НЭТа и регулятора, включающего в себя устройство регулирования заряда/разряда с системой управления. Процесс заряда НЭТ осуществляется на тормозных режимах работы тепловоза включением НЭТ на напряжение ТЭД, а также во время работы дизельного двигателя на холостом ходу.

Установка дополнительного энергетического оборудования на тепловозе связана с техническими трудностями его размещения и повышения нагрузки на ось. Поэтому была поставлена задача замещения стартерной аккумуляторной батареи, используемой при пуске дизеля, на тяговую литий-ионную батарею. Однако такая замена требует подтверждения возможности использования тяговой батареи для создания стартером момента преодоления сухого трения коленчатого вала дизеля, образования масляного клина и раскручивания его до пусковых оборотов, когда в цилиндрах происходят устойчивые вспышки топлива.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Применение литий-ионного НЭТа. Задача определения возможности повышения эффективности тепловоза с гибридным источником энергии разделилась на две:

определение эксплуатационных технических характеристик тепловоза с гибридной энергетической установкой;

исследование возможности использования тяговой литий-ионной батареи в системе стартерного пуска дизеля.

Названные задачи решались в комплексе применительно к тепловозу 2ТЭ116 по причине массового характера эксплуатации тепловоза, его пригодности к модернизациям (восемь различных модификаций) и освоению его капитального ремонта Брянским машиностроительным заводом (БМЗ) [5]. Технические характеристики тепловоза 2ТЭ116 приведены в таблице 1 [6].

Таблица 1 – Технические характеристики тепловоза 2ТЭ116

Наименование параметра	Величина
Масса локомотива, т	276
Расчетная скорость v_p , км/ч	24,2
Расчетная сила тяги $F_{кр} \cdot 10^3$, Н	506
Сцепной вес $P_{сц}$, кН	2760
Конструкционная скорость V_k , км/ч	100

На первом этапе была исследована возможность замены на тепловозе штатной стартерной аккумуляторной батареи тяговой литий-ионной батареей.

При стартерном пуске номинальное напряжение аккумуляторной батареи должно составлять 96 В. Поэтому в штатной системе пуска тепловоза 2ТЭ116 используется кислотная батарея 48ТН-450-У2, состоящая из 24 отдельных секций по два аккумулятора в каждой. Последовательное соединение между собой аккумуляторов и секций осуществлено с помощью медных оцинкованных перемычек, которые поставляются в комплекте с запасными частями для тепловозных батарей. Каждая секция батареи размещена в ящике из ударопрочного полипропилена. Герметичность аккумуляторов 48ТН-450-У2 обеспечивается контактно-тепловой сваркой крышки с моноблоком.

Задача замены аккумуляторной батареи включает в себя определение необходимого количества элементов. Сравнение характеристик одной ячейки свинцовой аккумуляторной батареи 48ТН-450-У2 и литий-ионного аккумулятора LT-LFP70M производства ООО «Лиотех» приведено в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение номинальных параметров ячеек аккумуляторных батарей 48ТН-450-У2 и LT-LFP70M

Наименование параметра	Ячейка АКБ 48ТН-450-У2	Ячейка АКБ LT-LFP70M
Номинальная емкость, А·ч	450	73
Номинальное напряжение, В	2	3
Габариты секции, В × Ш × Д, мм	375 × 387 × 510	222 × 135 × 30
Напряжение на аккумуляторе при разряде 10-часовым током, В	1,8	3,2
Масса, кг	4,1	1,8
Ток длительного разряда, А	0,9	146
Допустимый ток кратковременного разряда, А	36	219
Максимальный ток заряда, А	35	73
Диапазон рабочих температур при разряде, °С	–40 – +60	–30 – +50

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

При расчете пуска дизельного двигателя с помощью тяговой аккумуляторной батареи не учитывались энергозатраты электродвигателей маслопрокачивающего и топливопрокачивающих насосов по причине сравнительно малых значений токов электрических машин.

Для описания переходного процесса в системе пуска дизель-генераторной установки 1А-9ДГ в модели использовалось основное динамическое уравнение электропривода:

$$J_{\text{ст}} \cdot \frac{dw}{dt} = M_{\text{ст}} - M_{T\text{ст}}, \quad (1)$$

где $J_{\text{ст}}$ – приведенный к валу стартера момент инерции всех вращающихся и движущихся масс; dw – частота вращения вала; t – время; $M_{\text{ст}}$ и $M_{T\text{ст}}$ – приведенные к валу стартера вращающий момент и момент сопротивления дизель-генераторной установки.

Вращающий момент стартера $M_{\text{ст}}$ описывается зависимостью:

$$M_{\text{ст}} = M_{\text{ст}}(i, \Phi, \Delta P_{\text{пот}}), \quad (2)$$

где i – ток стартера; Φ – магнитный поток; $\Delta P_{\text{пот}}$ – магнитные, вентиляционные и механические потери в стартере и редукторе [7].

Момент сопротивления дизель-генератора $M_{T\text{д}}$ представляется сложной функциональной зависимостью от параметров режима работы дизеля:

$$M_{T\text{д}} = M_{T\text{д}}(V, w, \nu, p_{\text{нас}}, p_{\text{доп}}), \quad (3)$$

где V – параметр, характеризующий особенности конструкции дизеля; ν – вязкость масла, Па · с; $p_{\text{нас}}$ – потери, обусловленные сопротивлением всасывания и выталкивания воздуха из цилиндров; $p_{\text{доп}}$ – дополнительное сопротивление, вызванное потерями воздушного заряда через неплотности и его дополнительным охлаждением.

На основании формул (1) – (3) в математическом пакете LabView сформирована математическая модель. Сравнительные результаты математического моделирования пуска дизельного двигателя с применением литий-ионной тяговой аккумуляторной батареи и штатного пуска представлены на рисунке 2.

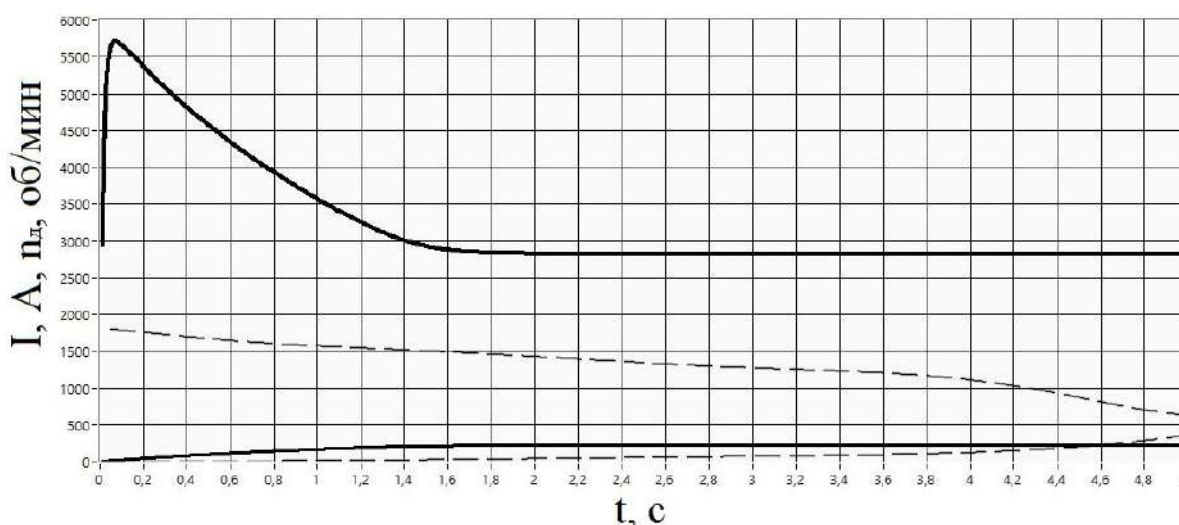


Рисунок 2 – Сравнение пуска дизельного двигателя от штатной аккумуляторной батареи и литий-ионной тяговой аккумуляторной батареи (— — тяговая аккумуляторная батарея LT-LFP70M, ----- — аккумуляторная батарея 48ТН-450-У2)

Расчеты показали, что тяговая аккумуляторная батарея осуществляет успешный пуск дизель-генераторной установки 1А-9ДГ при использовании 18 ячеек LT-LFP770Р. Время

пуска дизеля выдерживается таким же, как и при стартерном пуске от штатной кислотной батареи 48ТН-450 и составляет около 4 с. Это обеспечивает нужную скорость протекания процессов маслопрокачки, топливopодачи в системы дизеля, а также наполнение цилиндров дизеля свежим воздушным зарядом и горения топлива, что крайне важно для процесса выхода на пусковые обороты и получения устойчивых вспышек в цилиндрах.

Важно отметить, что наряду с успешным пуском дизеля предлагаемая модернизация позволит обеспечить большее число последовательных пусков от одного аккумулятора по причине более высокой суммарной емкости ячеек литий-ионной батареи, что с большей вероятностью предотвратит глубокие разряды и увеличит срок их службы.

Поскольку на первом этапе исследования была подтверждена возможность успешного пуска дизеля от тяговой литий-ионной аккумуляторной батареи, стало целесообразным проверить ее возможности при работе в гибридном источнике энергии.

В основу модели положено динамическое движение поезда:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_k(v) - W'_0(v, i, R) - W''_0(v, i, R)}{P + Q}, \quad (4)$$

где P и Q – соответственно масса локомотива и состава; v , t – текущие значения скорости движения поезда и времени; $F_k(v)$ – текущее значение силы тяги; $W'_0(v, i, R)$, $W''_0(v, i, R)$ – текущие значения сил сопротивления, действующих на локомотив и состав; i, R – текущие значения уклона и радиуса кривизны участка пути.

Сила тяги в модели определялась токами двигателей гибридного источника энергии $I_{\text{д(акб)}}$, А:

$$I_{\text{д(акб)}} = I_{\text{д}} + \frac{I_{\text{разряда}}}{n_{\text{oc}}}, \quad (5)$$

где $I_{\text{д}}$ – ток, подаваемый на ТЭД от ТСГ; $I_{\text{разряда}}$ – ток разряда тяговой аккумуляторной батареи.

Характеристики сопротивлений движению поезда принимались на основании Правил тяговых расчетов для поездной работы [8].

Моделирование движения поезда выполнялось по обобщенному профилю III класса в соответствии с классификацией ВНИИЖТа (Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта), для которого расчетный подъем i_p составляет 9 ‰ [9]. При этом выполнялся расчет текущей температуры обмоток якорей ТЭД в соответствии с методикой, приведенной в Правилах тяговых расчетов для поездной работы [8].

Поскольку увеличение массы поезда неизбежно приведет к увеличению сопротивления движению и снижению развиваемой скорости, то необходимо увеличить значение силы тяги локомотива и не допустить снижения скорости ниже расчетной. В данных целях принято условие, что если скорость локомотива будет ниже 26 км/ч, то в работу совместно с тяговым синхронным генератором подключается тяговая аккумуляторная батарея, увеличивающая силу тяги тепловоза на тяжелых участках пути.

Сравнение кинематических характеристик движения поездов, ведомых локомотивами со штатной и гибридной энергетическими установками, приведено на рисунке 3.

Дополнительно в рамках анализа работы тяговой аккумуляторной батареи проведено исследование уровня заряда в целях рассмотрения возможных случаев появления глубокого разряда. График кривой скорости и кривой заряда тяговой аккумуляторной батареи (SOC – State Of Charge, англ. уровень заряда) тепловоза 2ТЭ116 расчетной массой 5750 т представлен на рисунке 4, из которого видно, что тяговая аккумуляторная батарея подключается в работу на тяжелых участках пути, поддерживает скорость движения тепловоза в районе 27 км/ч и переходит в режим заряда после прохождения тяжелых участков пути. Также из указанного графика видно, что уровень заряда (SOC) тяговой аккумуляторной батареи не снижается ниже 50 %.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Анализ работы тягового электропривода локомотива с гибридной энергетической установкой позволил рассчитать рациональные параметры тяговой батареи для повышения эксплуатационных характеристик локомотива без потери ресурса тяговых электродвигателей от повышения тока обмоток.

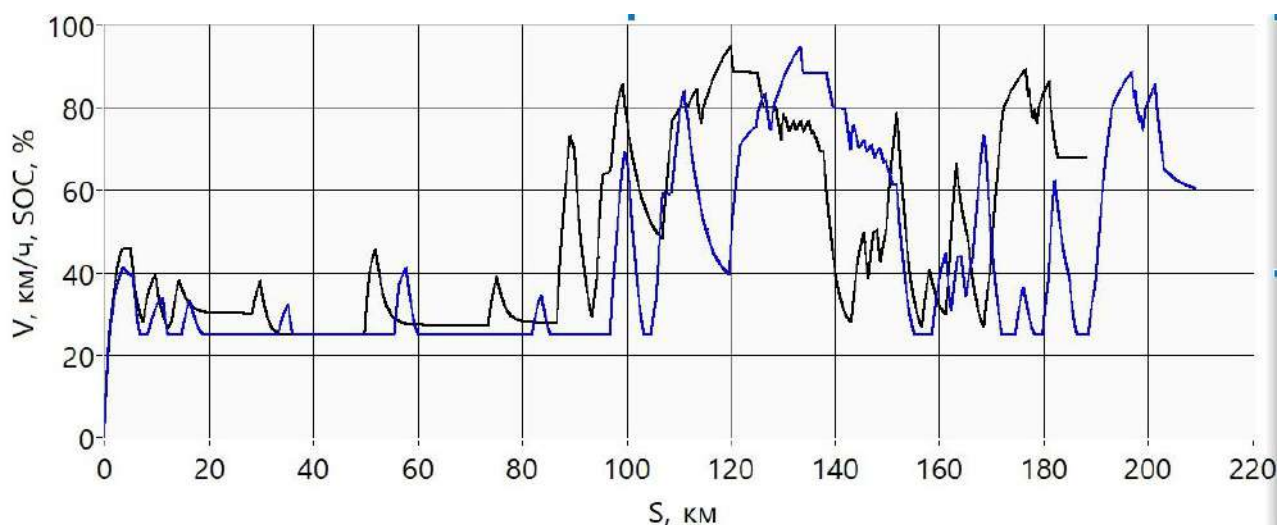


Рисунок 3 – Изменение скорости поезда при движении по профилю пути III класса в зависимости от времени хода $V = f(t)$: 1 – локомотив 2ТЭ116 со штатной энергетической установкой и с составом расчетной массы 4413 т; 2 – локомотив 2ТЭ116 с гибридной энергетической установкой и с составом массой 5750 т

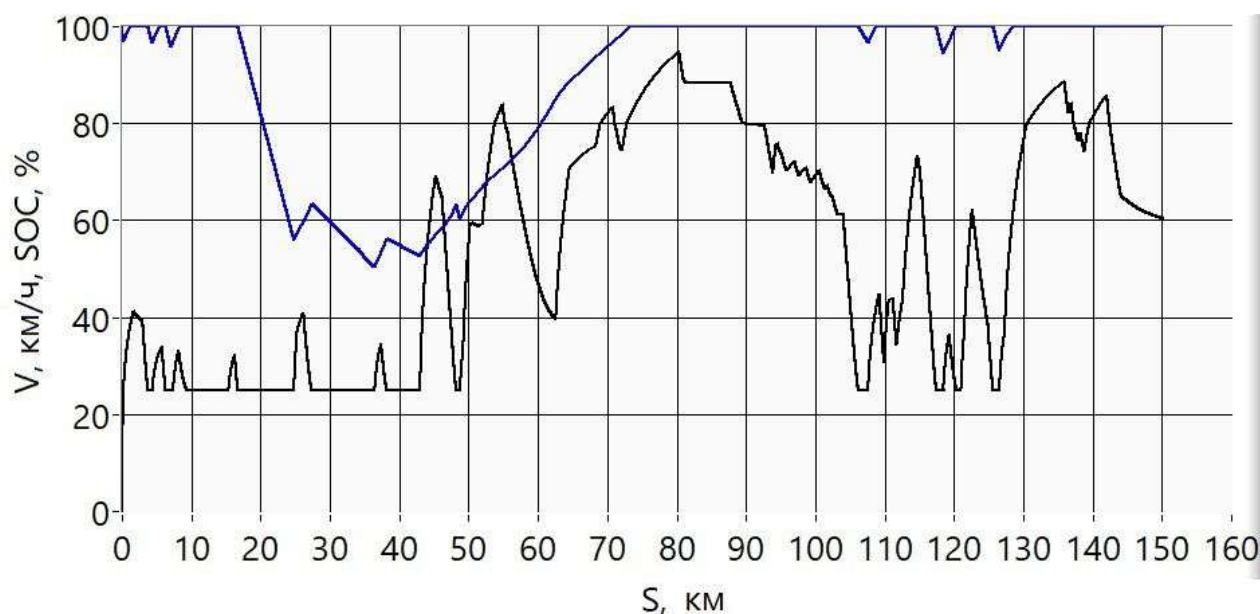


Рисунок 4 – График, отражающий степень разряда аккумуляторной батареи: 1 – кривая скорости гибридного тепловоза 2ТЭ116 расчетной массой 5750 т; 2 – кривая уровня заряда тяговой аккумуляторной батареи (SOC) гибридного тепловоза 2ТЭ116 расчетной массой 5750 т

Установлено, что выбор рационального числа ячеек литий-ионной тяговой аккумуляторной батареи позволяет выполнить запуск дизельного двигателя и обеспечить движение локомотива на заданном участке на расчетном подъеме в 9 % с расчетной скоростью ($V_p = 24,2$ км/ч) даже при весе состава, превышающем расчетный на 30 %.

Рациональное число ячеек тяговой аккумуляторной батареи определяется ограничениями на работу энергетического оборудования:

1) в целях сохранения заданного срока службы ячеек тяговой аккумуляторной батареи в тяговых режимах работы НЭТ не должны допускаться режимы глубокого разряда и повышенного заряда;

2) весовая норма поезда с гибридным локомотивом будет выше, чем для серийного локомотива; при этом требуется обеспечить заданные кинематические характеристики движения поезда исходя из условия режимной карты и исключить перегрев обмоток тяговых электродвигателей.

3) для нормальной работы тягового электрического оборудования системой автоматического управления тепловоза должен предусматриваться контроль значения скорости тепловоза и не допускать падения скорости ниже расчетной.

Резюмируя изложенное выше, можно сделать вывод о том, что применение гибридных силовых установок на тепловозах при тщательном и точном конструкторском расчете при проектировании позволит обеспечить увеличение эксплуатационной и, соответственно, экономической эффективности тягового привода [10].

Список литературы

1. DB тестирует первый китайский гибридный электровоз. – Текст : электронный. – URL: <https://www.railway.supply/db-testiruet-pervyj-kitajskij-gibridnyj-elektrovoz/> (дата обращения: 10.12.2022).
2. Маневровый гибридный тепловоз ТЭМ5Х. – Текст : электронный. – URL: <https://sitmag.ru/article/25569-manetroviy-gibridnyj-teplovov-tem5h-gibridnyj-avtonomniy-lokomotiv-obrel-plot> (дата обращения: 11.12.2022).
3. CZ LOKO строит свой первый гибридный локомотив. – Текст : электронный. – URL: <https://www.railway.supply/cz-loko-stroit-svoj-pervyj-gibridnyj-lokomotiv/> (дата обращения: 12.12.2022).
4. Kuznetsov G.U., Loginova E.U. The energy system of an autonomous vehicle with electric energy storages. *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020*, art. no. 9271262.
5. БМЗ освоил ремонт тепловозов 2ТЭ116. – Текст : электронный. – URL: <https://tmholding.ru/media/events/19432.html> (дата обращения: 09.12.2022).
6. Тепловоз 2ТЭ116 /С. П. Филонов, А. И. Гибалов, В. Е. Быковский [и др.]. – Москва : Транспорт, 1985. – 328 с. – Текст : непосредственный.
7. Электрооборудование тепловозов : справочник / под ред. В. С. Марченко. – Москва : Транспорт, 1981. – 287 с. – Текст : непосредственный.
8. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – Москва : Транспорт, 1985. – 287 с. – Текст : непосредственный.
9. Режимы работы магистральных электровозов / О. А. Некрасов, Л. А. Лисицын, Л. А. Мугинштейн, В. И. Рахманинов. – Москва : Транспорт, 1983. – 231 с. – Текст : непосредственный.
10. Проекты гибридных локомотивов // Железные дороги мира. – 2015. – № 4. – С. 56–60. – Текст : непосредственный.

References

1. *DB testiruet pervyj kitajskij gibridnyj elektrovoz* [DB is testing the first Chinese hybrid electric locomotive]. Available at: <https://www.railway.supply/db-testiruet-pervyj-kitajskij-gibridnyj-elektrovoz/> (accessed 10.12.2022).
2. *Manetroviy gibridnyj teplovov TEM5H* [Shunting hybrid diesel locomotive TEM5X]. Available at: <https://sitmag.ru/article/25569-manetroviy-gibridnyj-teplovov-tem5h-gibridnyj-avtonomniy-lokomotiv-obrel-plot> (accessed 11.12.2022).

3. CZ LOKO stroit svoj pervyj gibridnyj lokomotiv [CZ LOKO builds its first hybrid locomotive]. Available at: <https://www.railway.supply/cz-loko-stroit-svoj-pervyj-gibridnyj-lokomotiv/> (accessed 12.12.2022).

4. Kuznetsov G.U., Loginova E.U. The energy system of an autonomous vehicle with electric energy storages. *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020*, art. no. 9271262.

5. BMZ osvoil remont teplovozov 2TE116 [BMZ has mastered the repair of diesel locomotives 2TE116]. Available at: <https://tmholding.ru/media/events/19432.html> (accessed 09.12.2022).

6. Filonov S.P., Gibalov A.I., Bykovsky V.E. and others. *Lokomotiv 2TE116* [Locomotive 2TE116]. Moscow, Transport Publ., 1985, 328 p. (In Russian).

7. Verkhoglyad V.E., Vilkevich B.I., Marchenko V.S. and others, ed. Marchenko V.S. *Elektrooborudovanie teplovozov : spravochnik* [Electrical equipment of diesel locomotives: a handbook]. Moscow, Transport Publ., 1981, 287 p. (In Russian).

8. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty* [Rules for traction calculations for train operation]. Moscow, Transport Publ., 1985, 287 p. (In Russian).

9. Nekrasov O.A., Lisitsyn L.A., Muginstein L.A., Rakhmaninov V.I. *Rezhimy raboty magistralnykh elektrovozov* [Operating modes of main electric locomotives]. Moscow, Transport Publ., 1983, 231 p. (In Russian).

10. Projects of hybrid locomotives. *Zheleznye dorogi mira – Railways of the world*, 2015, no. 4, pp. 56-60 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Григорий Юрьевич

Российский университет путей сообщения (РУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, Москва, 127994, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электропоезда и локомотивы», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (977) 507-70-73.

E-mail: kuznetsov_gy@mail.ru

Логинава Елена Юрьевна

Российский университет путей сообщения (РУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, Москва, 127994, Российская Федерация

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (915) 439-13-74.

E-mail: ejy-loginova@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кузнецов, Г. Ю. Повышение технических характеристик автономных локомотивов литий-ионной тяговой батареей / Г. Ю. Кузнецов, Е. Ю. Логинава. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 4 (52). – С. 57 – 65.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Kuznetsov Grigoriy Yurevich

Russian University of transport (RUT (MIIT)).

9, b. 9, Obrazcova st., Moscow, 127994, the Russian Federation.

Posgraduate student of the department «Electric rolling stock and locomotives», RUT (MIIT).

Phone: +7 (977) 507-70-73.

E-mail: kuznetsov_gy@mail.ru

Loginova Elena Yurevna

Russian University of transport (RUT (MIIT)).

9, b. 9, Obrazcova st., Moscow, 127994, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «Electric rolling stock and locomotives», RUT (MIIT).

Phone: +7 (915) 439-13-74.

E-mail: ejy-loginova@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kuznetsov G.Yu., Loginova E.Yu. Increasing the technical characteristics of autonomus locomotives by a lithium-ion traction accumulator battery. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 4 (52), pp. 57-65 (In Russian).

О. С. Аблялимов, А. Т. Лесов

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ), г. Ташкент, Республика Узбекистан

К ИССЛЕДОВАНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛОКОМОТИВОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ НА УЧАСТКЕ КОКАНД – АНДИЖАН УЗБЕКСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Аннотация. Предметом исследований является оценка эффективности разных режимов энергооптимального управления движением грузового поезда унифицированной массы грузовыми электровозами переменного тока серии «Uz-El» с асинхронными электродвигателями на равнинном участке Коканд – Андижан Узбекской железной дороги. Цель исследования: обоснование основных показателей эффективности локомотивов электрической тяги с учетом заданного графика движения при помощи различных вариантов оптимального режима управления движением грузового поезда с унифицированной массой состава на реальном равнинном участке Узбекской железной дороги. Методы и методологию исследования составляют теоретические основы локомотивной тяги, математическая теория оптимального управления объектом, а также язык программирования C# (C Sharp) с разработкой макетных приложений в среде программирования Microsoft Visual Studio 12.0. В результате проведенного исследования получены энергооптимальные кривые, кинематические параметры движения грузового поезда и параметры основных показателей энергетической эффективности исследуемого электровоза для разных вариантов тягового расчета на реальном равнинном участке Коканд – Андижан Узбекской железной дороги. Полученные кинематические параметры движения грузовых поездов с унифицированной массой состава и параметры показателей эффективности использования исследуемых электровозов могут быть использованы в локомотивном депо Коканд, которые позволят разработать режимные карты вождения грузовых поездов этими электровозами в зависимости от уровня сложности профиля пути и различных условий организации железнодорожных перевозок грузов.

Ключевые слова: электровоз, расход энергии, скорость, энергетическая эффективность, режим ведения, математическая модель, грузовой поезд.

Oleg S. Ablyalimov, Altinbek T. Lesov

Tashkent State Transport University (TSTU), Tashkent, Republic of Uzbekistan

TO THE STUDY OF THE EFFICIENCY OF LOCOMOTIVES OF ELECTRIC TRACTION IN THE KOKAND – ANDIJAN SECTION OF THE UZBEK RAILWAY

Abstract. The subject of research is the evaluation of the effectiveness of different modes of energy-optimal control of the movement of a freight train of a unified mass by AC freight electric locomotives of the Uz-El series with asynchronous electric motors on the flat section of Kokand – Andijan of the Uzbek railway. Purpose of the study: substantiation of the main performance indicators of electric traction locomotives, taking into account the given traffic schedule, using various options for the optimal mode of controlling the movement of a freight train with a unified train mass on a real flat section of the Uzbek railway. The methods and methodology of the research are the theoretical foundations of locomotive traction, the mathematical theory of optimal object control, as well as the C # programming language (C Sharp) with the development of mock-up applications in the Microsoft Visual Studio 12.0 programming environment. As a result of the study, energy-optimal curves, kinematic parameters of the movement of a freight train and parameters of the main indicators of the energy efficiency of the investigated electric locomotive for different options for traction calculation on the real flat section of Kokand – Andijan of the Uzbek railway were obtained. The obtained kinematic parameters of the movement of freight trains with a unified mass of the train and the parameters of the efficiency indicators for the use of the studied electric locomotives can be used in the Kokand locomotive depot, which will allow developing regime maps for driving freight trains by these electric locomotives, depending on the level of complexity of the track profile and various conditions for organizing rail transportation of goods.

Keywords: the electric locomotive, power consumption, speed, energy efficiency, driving mode, mathematical model, the freight train.

За последние пять лет суммарная перевозочная работа эксплуатируемого парка магистральных локомотивов АО «Ўзбекистон темир йўллари» составляет 151,713 млн ткм брутто, при этом на долю локомотивов электрической тяги приходится 73,09 % всего перевозимого груза со среднегодовым ежегодным ростом железнодорожных перевозок грузов

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

приблизительно в 6,1 %. Оставшаяся доля грузооборота в 40,824 млн ткм брутто, или 26,91 %, реализуется магистральными локомотивами дизельной тяги на фоне его ежегодного снижения в среднем приблизительно на 7,16 %.

Динамика численных значений и характер изменения величины общего (суммарного) грузооборота в миллионах тонно-километров брутто с учетом дифференциации по виду локомотивной тяги показаны на рисунке 1 [1], анализ данных которых подтверждает цифры, обозначенные выше. В последнее время указанные цифры обуславливают необходимость в приоритетном направлении развития электрической тяги, которое напрямую связано не только и не столько с увеличением протяженности общей длины электрифицированных узбекских железных дорог, сколько с пополнением локомотивного парка АО «Ўзбекистон темир йўллари» новыми китайскими электровозами.

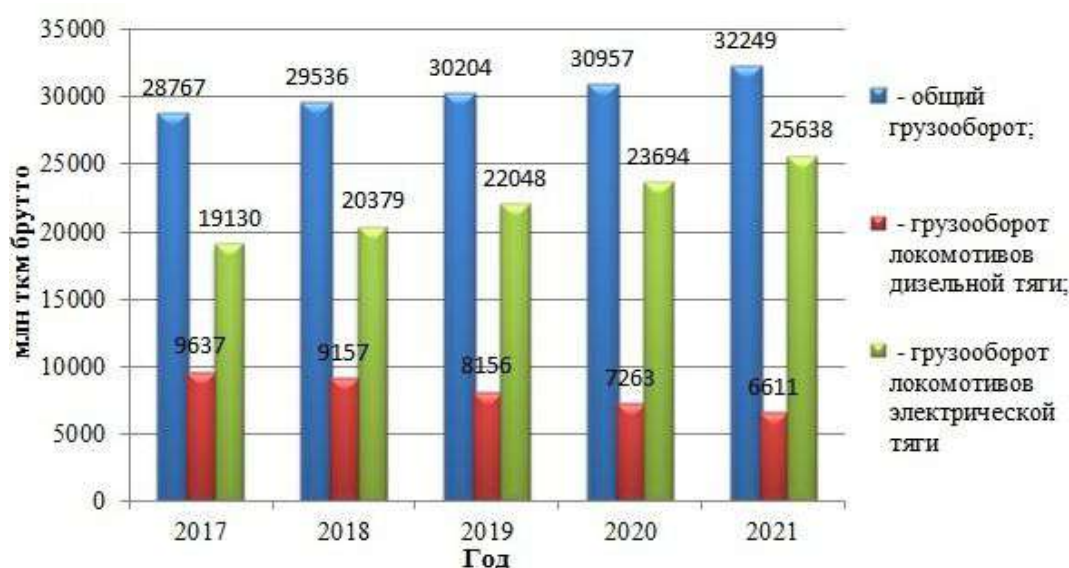


Рисунок 1 – Диаграмма ежегодного распределения грузооборота по данным Управления по эксплуатации локомотивов АО «Ўзбекистон темир йўллари»

Таким образом, сказанное предопределяет проведение исследований, результаты которых будут направлены на обоснование эффективности перевозочной работы локомотивов электрической тяги в реальных условиях организации грузового движения на разных по сложности участках узбекских железных дорог, в том числе равнинных.

Обозначим краткий обзор научных исследований ученых дальнего зарубежья по изучению эффективности использования различных локомотивов, их систем и аппаратов в условиях эксплуатационной деятельности железных дорог.

Авторы работ [2, 3] предлагают экономию расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов осуществлять путем оптимизации режимов работы силовых энергетических установок локомотивов.

В работах [4 – 6] приведены результаты исследования по повышению качества токосъема путем нормирования верхнего и нижнего пределов сил контактного нажатия токоприемника с помощью механических и электрических средств защиты, предотвращающих возникновение резонансных колебаний напряжения в тяговой (контактной) сети.

В исследовании [7] авторы, моделируя разнообразные технологические процессы прохождения электровозом нейтральных вставок контактной сети, предложили рекомендации по исключению возникновения любого перенапряжения в ней с обеспечением повышения условий безопасной эксплуатации электропоезда в пути следования.

Авторы исследования [8] для сокращения общего времени в пути следования грузового поезда и обеспечения своевременной доставки грузов рекомендуют моделировать планирование грузовых железнодорожных перевозок путем перераспределения заданного

вагонопотока по критерию времени доставки и отправления грузов между смежными поездами.

Анализ исследований [2 – 8] и многих других, в том числе отечественных исследований, говорит о недостаточной степени изученности вопросов по оптимизации перевозочной работы локомотивов и обоснованию кинематических параметров движения грузовых поездов на различных по сложности виртуальных и реальных участках железных дорог, в том числе узбекских.

Исследования, описываемые в настоящей статье, проводились параллельно с работой авторов источников [1, 11, 15], при этом их целью являлось обоснование основных кинематических параметров движения грузовых поездов с унифицированной массой состава и параметров показателей эффективности использования электровозов «Uz-El» с учетом различных эксплуатационных условий организации железнодорожных перевозок грузов на указанные параметры посредством выполнения серии тягово-энергетических расчетов на реальном равнинном участке Узбекской железной дороги.

Для реализации сформулированной цели исследований авторы опираются на разработанный ими [9, 10] компьютерный аппаратно-программный комплекс для выполнения энергооптимальных тяговых расчетов и известную [11] программу расчета тягового электрического снабжения «КОРТЭС» с учетом методов и способов теории электрической тяги, объекта и предмета исследований.

Указанный аппаратно-программный комплекс для получения энергооптимальных кривых движения с тремя предложенными вариантами режимов ведения поезда на исследуемом участке Коканд – Андижан Узбекской железной дороги разработан на языке программ C# (C Sharp), который предусматривает расчеты выполнять в виде блоков с исходными данными параметров для исследуемых объектов и позволяет автоматизировать решение задач для различных условий выбора энергооптимальных режимов движения поезда на полигоне железных дорог, в том числе узбекских, с учетом определения ускоряющих и замедляющих сил, режимов разгона и торможения поезда. Основу указанного аппаратно-программного комплекса составляют разработанные авторами [9, 10] математическая модель объекта исследования и алгоритм формирования энергооптимальных кривых движения для электровозов с асинхронными тяговыми электродвигателями, которые подробно освещены в упомянутых исследованиях.

Объектом исследования являются грузовые поезда с унифицированной массой состава при постоянном числе осей в составе, грузовые электровозы переменного тока серии «Uz-El» с асинхронными электродвигателями и спрямленный профиль пути реального равнинного участка железной дороги.

Предмет исследования составляют основные кинематические параметры движения грузовых поездов с унифицированной массой состава и количественные параметры показателей перевозочной работы исследуемых электровозов «Uz-El» на заданном (принятом) реальном равнинном участке железной дороги.

Электровозы переменного тока серии «Uz-El» с асинхронными электродвигателями, предназначенные для вождения грузовых и пассажирских поездов, разработаны на основе базовой модели электровоза HXD3C Даляньской локомотиво-, вагоностроительной компании (Китайская народная республика) совместно с японской компанией Toshiba, их конструктивные особенности подробно освещены в литературе [12].

Протяженность участка железнодорожного пути Коканд – Андижан составляет 132,8 км. Данный участок содержит 78 элементов и характеризуется как равнинный участок I типа профиля пути, потому что доля элементов с крутизной уклонов в интервале от +3,0 ‰ до –3,0 ‰ с учетом площадок $i = 0$ ‰ составляет 68,9 % от общей длины рассматриваемого участка [13]. Характеристика каждого элемента профиля пути по длине и величине крутизны уклона и параметры (длина и радиус кривой) кривых этого участка железной дороги приведены в монографии [14].

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

С целью реализации изложенного выше изначально авторами была выполнена серия тягово-энергетических расчетов разными компьютерными аппаратно-программными комплексами для различных вариантов режимов управления движением грузовых поездов с унифицированной массой состава посредством грузовых электровозов «Uz-El» на реальном равнинном участке Коканд – Андижан Узбекской железной дороги.

Авторами было предложено анализировать следующие три варианта предполагаемых энергооптимальных режимов управления движением указанных грузовых поездов исследуемыми электровозами «Uz-El», графическая иллюстрация и теоретическое обоснование которых обозначено в работе [15], а именно: 1-й вариант – по времени переключения различных режимов ведения поезда; 2-й вариант – по использованию пограничных условий для скорости движения поезда с учетом средней скорости движения поезда по перегону; 3-й вариант – с учетом средней скорости движения поезда, которая определяется графиком движения поездов.

Графики кривых скоростей движения грузового поезда с унифицированной массой состава $Q = 3200$ т, полученные для первого (а), второго (б) и третьего (в) вариантов предполагаемых энергооптимальных режимов вождения таких грузовых поездов исследуемыми электровозами «Uz-El» на равнинном участке Коканд – Андижан Узбекской железной дороги, приведены на рисунке 2.

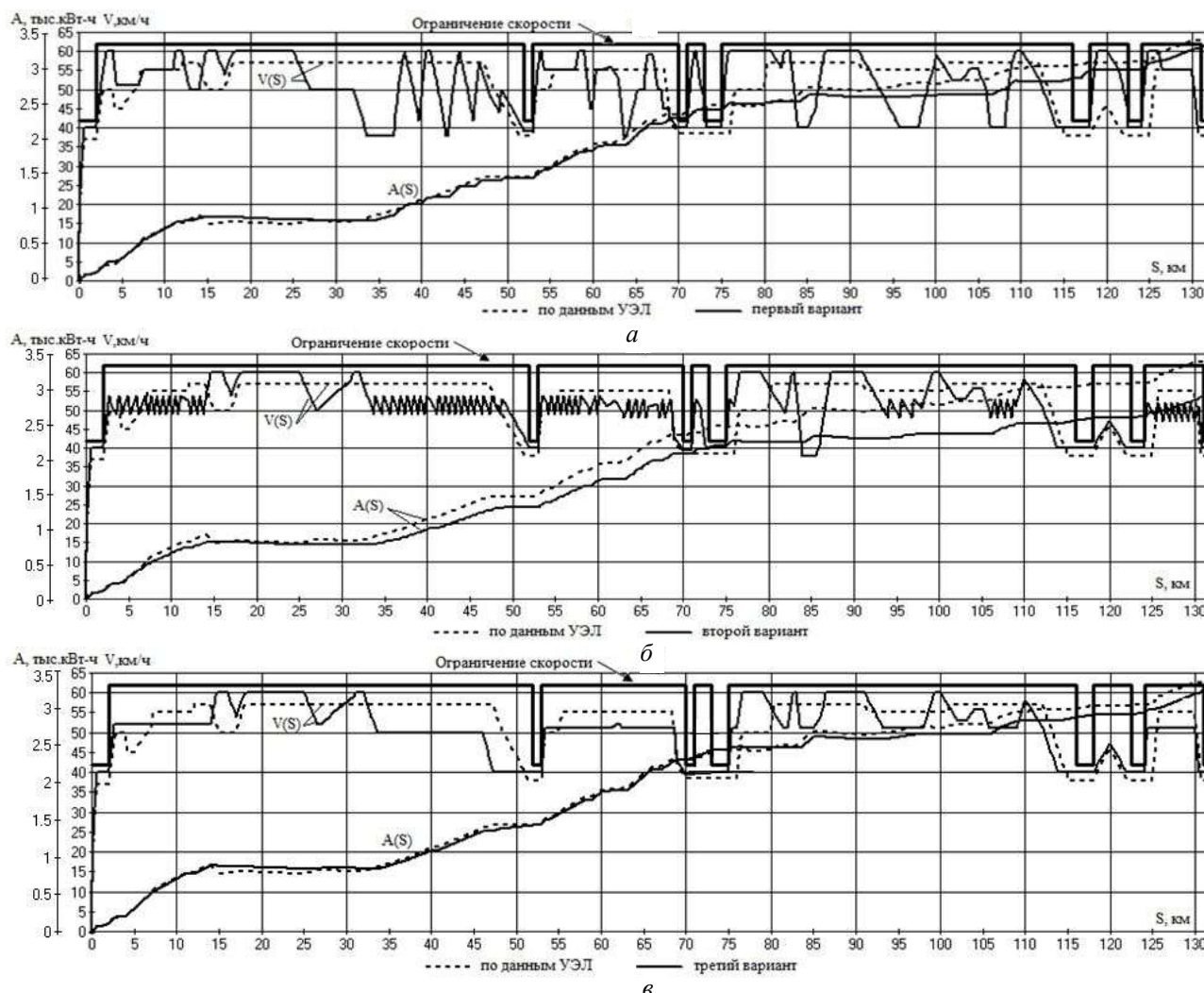


Рисунок 2 – Графические зависимости энергооптимального тягового расчета на участке Коканд – Андижан Узбекской железной дороги

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

На рисунке 2 точками обозначены кривые скорости движения грузового поезда данной массы состава по режимным картам вождения грузовых поездов локомотивного депо Коканд АО «Ўзбекистон темир йўллари» и показаны кривые расхода электрической энергии исследуемыми электровозами «Uz-El» без учета ее рекуперации. Упомянутый расход по данным локомотивного депо Коканд обозначен точками, а полученный расчетным путем – сплошной линией.

Как видно из анализа полученных графических зависимостей, приведенных на рисунке 2, динамика количественного изменения энергетических затрат в виде минимального расхода электрической энергии будет способствовать обеспечению экономии денежных средств у второго варианта предложенного энергооптимального управления движением грузового поезда в пути следования.

В таблице 1 представлены результаты тягового расчета для грузовых поездов с унифицированной массой $Q = 3200$ т при постоянном числе осей состава и исследуемыми электровозами «Uz-El» по трем вариантам предполагаемых энергооптимальных режимов управления их движением последними на равнинном участке Коканд – Андижан Узбекской железной дороги.

Таблица 1 – Показатели перевозочной работы грузовых электровозов серии «Uz-El» на участке Коканд – Андижан Узбекской железной дороги, масса поезда $Q = 3200$ т

Перегон	Длина, км	Время хода, мин	Расход электрической энергии A , кВт-ч	Рекуперация электрической энергии A_p , кВт-ч
Вариант: первый				
Коканд – Какир	10,5	14,8	854,2	–
Какир – Фуркат	15,3	15,4	82,8	47,7
Фуркат – Алтыарык	26,0	33,6	609,3	5,3
Алтыарык – Маргилан	18,6	21,9	855,9	–
Маргилан – Ахунбабаев	3,9	5,1	111,3	5,6
Ахунбабаев – Кува	29,0	31,4	247,9	66,4
Кува – Асака	15,2	18,7	257,5	–
Асака – Ахтачи	9,1	7,9	106,5	3,8
Ахтачи – Андижан	8,8	9,4	350,6	–
Коканд – Андижан	136,4	158,2	3476,0	128,8
Вариант: второй				
Коканд – Какир	10,5	15,6	733,7	–
Какир – Фуркат	15,3	15,7	93,5	45,2
Фуркат – Алтыарык	26,0	31,1	551,9	5,3
Алтыарык – Маргилан	18,6	21,9	788,3	–
Маргилан – Ахунбабаев	3,9	5,4	105,4	5,6
Ахунбабаев – Кува	29,0	29,5	234,3	64,2
Кува – Асака	15,2	18,6	226,0	–
Асака – Ахтачи	9,1	10,0	34,9	–
Ахтачи – Андижан	8,8	10,0	315,8	–
Коканд – Андижан	136,4	157,8	3083,8	120,3
Вариант: третий				
Коканд – Какир	10,5	17,9	810,7	–
Какир – Фуркат	15,3	13,3	112,6	44,8
Фуркат – Алтыарык	26,0	31,9	623,8	6,0
Алтыарык – Маргилан	18,6	21,9	894,6	–
Маргилан – Ахунбабаев	3,9	5,3	114,2	5,6
Ахунбабаев – Кува	29,0	29,3	292,1	68,5
Кува – Асака	15,2	18,4	249,1	–
Асака – Ахтачи	9,1	10,0	34,8	–
Ахтачи – Андижан	8,8	10,0	346,3	–
Коканд – Андижан	136,4	158,0	3478,2	124,9

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Данные таблицы 1 наряду с укрупненной характеристикой исследуемого участка железной дороги содержат сведения о времени движения указанных грузовых поездов по перегонам и участку в целом и количественные параметры энергетической эффективности электровозов переменного тока серии «Uz-El» в виде расхода электрической энергии на тягу поездов и ее рекуперации в контактную сеть. При этом возвращение определенного количества электрической энергии обратно в контактную сеть происходит на пяти (1-й вариант) и четырех (2-й и 3-й варианты) перегонах из возможных девяти перегонов исследуемого равнинного участка Коканд – Андижан АО «Ўзбекистон темир йўллари». Видно, что большая часть рекуперации электрической энергии в контактную сеть осуществляется на двух перегонах – Какир – Фуркат и Ахунбабаев – Кува, величина которой приблизительно в 10 – 12 раз выше, чем на других трех перегонах – Фуркат – Алтыарык, Маргилан – Ахунбабаев и Асака – Ахтачи (первый вариант).

На рисунке 3 показана динамика изменения величины общего количества израсходованной электрической энергии исследуемыми электровозами «Uz-El» без учета ее рекуперации в контактную сеть в зависимости от применяемого варианта энергооптимального тягового расчета, полученная авторами в результате моделирования технологического процесса движения грузового поезда с унифицированной массой состава $Q = 3200$ т при постоянном числе осей в составе на равнинном участке Коканд – Андижан Узбекской железной дороги.

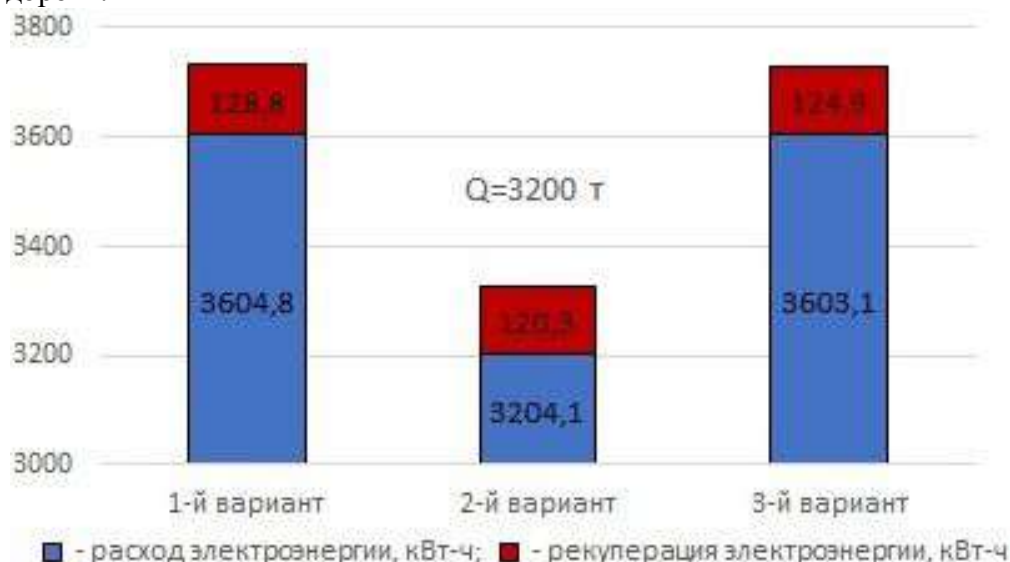


Рисунок 3 – Диаграмма потребления и рекуперации электрической энергии электровозами «Uz-El» на участке Коканд – Андижан Узбекской железной дороги

В таблице 2 приведены численные значения параметров скорости и времени движения указанного грузового поезда, а также количественные параметры показателей энергетической эффективности электровозов переменного тока серии «Uz-El» с асинхронными тяговыми электродвигателями, представляющими величину израсходованной электрической энергии на тягу поездов на равнинном участке Коканд – Андижан Узбекской железной дороги. Здесь же обозначена величина рекуперации электрической энергии обратно в контактную сеть электроснабжения АО «Ўзбекистон темир йўллари».

Сопоставительный анализ графических зависимостей, приведенных на рисунках 2 и 3, и данных таблицы 2 показывает, что второй вариант энергооптимального тягового расчета обеспечивает наименьшее количество расходуемой электрической энергии электровозами «Uz-El» на равнинном участке Коканд – Андижан АО «Ўзбекистон темир йўллари». Сказанное является результатом правильно выбранного диапазона варьирования скоростей движения поезда ($\Delta V = \pm 3$ км/ч) и наличия на перегонах Какир – Фуркат и Ахунбабаев – Кува крутых спусков [1] большой протяженности.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 2 – Показатели перевозочной работы грузовых электровозов переменного тока серии «Uz-El» на равнинном участке Узбекской железной дороги

Вариант тягового расчета	Скорость движения и время хода поезда			Расход электрической энергии		
	ходовая скорость V_x , км/ч	общее t_x мин	расхождение Δt_x , мин / %	полный за поездку A , кВт-ч	удельный a , Вт-ч/ткм брутто	экономия по удельному Δa , %
Участок Коканд – Андижан, $L = 132,8$ км						
По данным депо Коканд	50,30	158,4	–	3433,0	8,08	–
По программе «КОРТЭС»	51,60	154,4	4,0/2,52	3368,6	7,93	+1,86
1-й вариант	50,36	158,2	0,2/0,13	3476,0	8,18	–1,23
2-й вариант	50,49	157,8	0,6/0,38	3083,8	7,26	+10,15
3-й вариант	50,43	158,0	0,4/0,25	3478,2	8,18	–1,24

Расхождение численных значений времени хода грузовых поездов по данным таблицы 2 относительно аналогичных данных цеха эксплуатации локомотивного депо Коканд в среднем составляет 0,4 мин, или 0,253 %, и это приблизительно в 10 раз точнее указанных численных значений, полученных посредством компьютерного аппаратно-программного комплекса «КОРТЭС». Кроме того, режимы управления движением грузового поезда с унифицированной массой состава исследуемыми электровозами «Uz-El», рассчитанные по 2-му варианту энергооптимального тягового расчета и компьютерным аппаратно-программным комплексом «КОРТЭС», обеспечивают экономию потребляемого ими количества электрической энергии соответственно на 10,15 и 1,86 %. В то же время для 1-го и 3-го вариантов энергооптимального тягового расчета перерасход электрической энергии составит 1,23 – 1,24 %.

В результате оценки эффективности предложенных энергооптимальных технологий управления движением грузовых поездов было доказано, что второй вариант энергооптимального режима ведения грузового поезда позволит минимизировать величину израсходованного количества электрической энергии исследуемыми электровозами «Uz-El» на тягу поездов, что в свою очередь приведет к снижению эксплуатационных расходов на железнодорожные перевозки грузов.

Авторами были получены (обоснованы) численные значения параметров скорости движения и времени хода грузового поезда, а также количественные параметры показателей энергетической эффективности грузовых электровозов переменного тока серии «Uz-El» с асинхронными электродвигателями на реальном электрифицированном равнинном участке Коканд – Андижан Узбекской железной дороги.

Однако такие научные исследования необходимо продолжить для более широкого диапазона варьирования указанных масс составов, опираясь на заданные ограничения по длине приемоотправочных путей и весовым нормам грузовых поездов с последующей разработкой оптимальных режимных карт вождения грузовых поездов электровозами «Uz-El» на равнинном участке Коканд – Андижан Узбекской железной дорог.

Полученные перегонные количества израсходованной величины электрической энергии на тягу поездов исследуемыми электровозами «Uz-El» позволят специалистам регионального железнодорожного узла Коканд, связанным с перевозочным процессом и грузовым движением, обосновать тяговые свойства (качества) профиля пути равнинного участка Коканд – Андижан Узбекской железной дорог и определить уровень степени трудности каждого из его девяти перегонов.

1. Абляимов, О. С. К эффективности локомотивов электрической тяги на участке Коканд – Андижан Узбекской железной дороги / О. С. Абляимов, А. Т. Лесов. – Текст : непосредственный // Наука и образование транспорту : материалы XV междунар. науч.-практ. конф. – Самара : Самарский государственный университет путей сообщения, 2022. – С. 57–61.
2. Naidoo P.N., Mulder J.M. (2017) Improved distributed power train handling strategies. *11th International Heavy Haul Association Conference*. Cape Town, 2017, pp. 1118-1124.
3. Mayet C., Pouget J., Bouscayrol A., Lhomme W. (2014) Influence of an Energy Storage System on the Energy Consumption of a Diesel-Electric Locomotive. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, vol. 63, no. 3, pp. 1032-1040, <https://www.doi.org/10.1109/TVT.2013.2284634>.
4. Michal G, Huynh N, Shukla N, Munoz A, Barthelemy J (2017) RailNet: A simulation model for operational planning of rail freight. *Transportation Research Procedia* 25: pp. 461-473.
5. Jiang X., He Z., Hu H., Zhang Y. (2013) Analysis of the Electric Locomotives Neutral-section Passing Harmonic Resonance. *Energy and Power Engineering*, 2013, vol. 5, no. 4B, pp. 546-551, <https://www.doi.org/10.4236/epe.2013.54B104>.
6. Liu Y.J., Chang G.W., Huang H.M. (2010) Mayr's Equation-Based Model for Pantograph Arc of High-Speed Railway Traction System, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, vol. 25, no. 3, pp. 2025-2027. doi:10.1109/TPWRD.2009.2037521.
7. Fang Z.G. (2010) Application of Transient Over-voltage Suppression Technique for EMU Auto-passing the Neutral Section with On-board Switch Closed, *Railway Technical Innovation*, 2010, vol. 1, pp. 44-46.
8. Li S., Lv H., Xu C., Chen T., Zou C. (2020). Optimized Train Path Selection Method for Daily Freight Train Scheduling 8: pp. 40777-40790 DOI: 10.1109/access.2020.2976904.
9. Лесов, А. Т. Оптимизация кривой движения поезда для минимизации энергопотребления на базе железной дороги Узбекистана / А. Т. Лесов, В. О. Иващенко. – Текст : непосредственный // Бюллетень результатов научных исследований. – 2022. – Вып. 1. – С. 68–79. – DOI: 10.20295/2223-9987-2022-1-68-79.
10. Лесов, А. Т. Энергооптимизация режимов движения поезда на языке программы C# (C Sharp) / А. Т. Лесов, В. О. Иващенко. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2021. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 480–490.
11. Абляимов, О. С. Тяговые расчеты для электровозов «Uz-El» на участке Коканд – Андижан Узбекской железной дороги / О. С. Абляимов, А. Т. Лесов // Universum: Технические науки: электрон. науч. журнал. – 2022. – № 11 (104). – Текст : электронный. – URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/14558> (дата обращения: 21.11.2022).
12. О мощном электрическом локомотиве с приводом переменного тока типа СКЕ 1 : учебные материалы для подготовки. – Ташкент: Узбекская государственная железная дорога. Далянская локомотиво-, вагоностроительная компания ЛТД CNR, 2013. – 484 с. – Текст : непосредственный.
13. Основы тяги поездов : учебник / под общ. ред. О. С. Абляимова. – Ташкент : Complex Print nashriyoti, 2020. – 662 с. – Текст : непосредственный.
14. Абляимов, О. С. Оптимизация перевозочной работы локомотивов: вопросы теории, методы, расчеты, результаты : монография / О. С. Абляимов // Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта. – Ташкент : Complex Print nashriyoti, 2020. – 488 с. – Текст : непосредственный.
15. Абляимов, О. С. К обоснованию оптимального режима управления движением грузового поезда на участке Коканд – Андижан Узбекской железной дороги / О. С. Абляимов, А. Т. Лесов // Universum: Технические науки: электрон. науч. журнал. – 2022. – № 11(104). – Текст : электронный. – URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/14619> (дата обращения: 21.11.2022).

References

1. Ablyalimov O.S., Lesov A.T. [On the efficiency of electric traction locomotives on the Kokand-Andijan section of the Uzbek railway]. *Nauka i obrazovanie transportu: materialy XV mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Science and Education for Transport: materials of the XV International Scientific and Practical Conference]. Samara, 2022, pp. 57-61 (In Russian).
2. Naidoo P.N., Mulder J.M. (2017) Improved distributed power train handling strategies. *11th International Heavy Haul Association Conference*. Cape Town, 2017, pp. 1118-1124
3. Mayet C., Pouget J., Bouscayrol A., Lhomme W. (2014) Influence of an Energy Storage System on the Energy Consumption of a Diesel-Electric Locomotive. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, vol. 63, no. 3, pp. 1032-1040, <https://www.doi.org/10.1109/TVT.2013.2284634>.
4. Michal G, Huynh N, Shukla N, Munoz A, Barthelemy J (2017) RailNet: A simulation model for operational planning of rail freight. *Transportation Research Procedia* 25: pp. 461-473.
5. Jiang X., He Z., Hu H., Zhang Y. (2013) Analysis of the Electric Locomotives Neutral-section Passing Harmonic Resonance. *Energy and Power Engineering*, 2013, vol. 5, no. 4B, pp. 546-551, <https://www.doi.org/10.4236/epe.2013.54B104>.
6. Liu Y.J., Chang G.W., Huang H.M. (2010) Mayr's Equation-Based Model for Pantograph Arc of High-Speed Railway Traction System, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, vol. 25, no. 3, pp. 2025-2027, doi:10.1109/TPWRD.2009.2037521.
7. Fang Z.G. (2010) Application of Transient Over-voltage Suppression Technique for EMU Auto-passing the Neutral Section with On-board Switch Closed, *Railway Technical Innovation*, 2010, vol. 1, pp. 44-46.
8. Li S., Lv H., Xu C., Chen T., Zou C. (2020). Optimized Train Path Selection Method for Daily Freight Train Scheduling 8: pp. 40777-40790 DOI: 10.1109/access.2020.2976904.
9. Lesov A.T., Ivashchenko V.O. Optimization of the train movement curve to minimize energy consumption on the basis of the railway of Uzbekistan. *Biulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy – Bulletin of scientific research result*, 2022, no. 1, pp. 68-79, doi: 10.20295/2223-9987-2022-1-68-79 (In Russian).
10. Lesov A.T., Ivashchenko V.O. Energy optimization of train movement modes in the C# program language. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia – Proceedings of Petersburg transport university*, 2021, vol. 18, no. 4, pp. 480-490 (In Russian).
11. Ablyalimov O.S., Lesov A.T. Traction calculations for electric locomotives «Uz-El» on the Kokand – Andijan section of the Uzbek railway. *Universum: Tekhnicheskie nauki: elektronnyi nauchnyi zhurnal – Universum: Technical Sciences: electronic scientific journal*, 2022, no. 11 (104). Available at: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/14558> (accessed 21.11.2022) (In Russian).
12. On a powerful electric locomotive with an AC drive type SKE 1: training materials for training, Uzbek State Railways. Dalian Locomotive Car Building Company LTD CNR. Tashkent, 2013. 484 p. (In Russian).
13. Ablyalimov O.S., Kurilkin D.N., Kamalov I.S., Kasimov O.T. *Osnovy tyagi poezdov* (Basics of train traction). Tashkent, Complex Print nashriyoti Publ., 2020, 662 p. (In Russian).
14. Ablyalimov O.S. *Optimizatsiya perevozochnoy raboty lokomotivov: voprosy teorii, metody, paschyoty, rezultaty: monografiya* [Optimization of the transportation work of locomotives: questions of theory, methods, calculations, results: monograph]. Tashkent, Complex Print nashriyoti Publ., 2020, 488 p. (In Russian).
15. Ablyalimov O.S., Lesov A.T. To substantiate the optimal mode of controlling the movement of a freight train on the section Kokand – Andijan of the Uzbek railway. *Universum: Tekhnicheskie nauki: elektronnyi nauchnyi zhurnal – Universum: Technical Sciences: electronic scientific journal*, 2022, no. 11 (104). Available at: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/14619> (accessed 21.11.2022) (In Russian).

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Абляимов Олег Сергеевич

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Адылходжаева ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, профессор, кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство», ТГТУ.

Тел. +998-90-975-59-43.

E-mail: o.ablyalimov@gmail.com

Лесов Алтынбек Талгат угли

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Адылходжаева ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Ассистент кафедры «Электрический подвижной состав» ТГТУ.

Тел.: +998-95-044-23-09.

E-mail: altin_goal91@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ablyalimov Oleg Sergeyevich

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Adilhodjayev st., 100167, Republic of Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, professor of the department «Locomotives and locomotive economy», TSTU.

Phone. +998-90-975-59-43.

E-mail: o.ablyalimov@gmail.com

Lesov Altinbek Talgat ugli

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Adilhodjayev st., 100167, Republic of Uzbekistan.

Assistent of the department «Electric rolling stock», TSTU.

Phone: +998-95-044-23-09.

E-mail: altin_goal91@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Абляимов, О. С. К исследованию эффективности локомотивов электрической тяги на участке Коканд – Андижан Узбекской железной дороги / О. С. Абляимов, А. Т. Лесов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 4 (52). – С. 66 – 75.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Ablyalimov O.S., Lesov A.T. To the study of the efficiency of locomotives of electric traction in the Kokand – Andijan section of the Uzbek railway. Journal of Transsib Railway Studies, 2022, no. 4 (52), pp. 66-75 (In Russian).

УДК 621.333.2

В. И. Киселев, А. И. Федянин

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), г. Москва, Российская Федерация

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВОЗОВ

Аннотация. Предметом рассмотрения настоящей статьи является тяговый электродвигатель тепловоза. Тяговый электродвигатель (ТЭД) – основной элемент передачи мощности, следовательно, от его надежности зависит и надежность тепловоза в целом. Рассмотрены основные причины отказов тяговых электродвигателей в эксплуатации. На основании анализа статистических данных можно утверждать, что наиболее повреждаемой частью тягового электродвигателя является его якорь. В условиях введения новых классов нагревостойкости изоляции новым стандартом – ГОСТ 2582–2013 – обеспечение надежности якоря особенно актуально. Установлены причины наиболее распространенных отказов ТЭД в эксплуатации: нарушение целостности изоляции обмотки острыми краями крайних листов пакета железа сердечника якоря при укладке обмотки в пазы сердечника, вибрация крайних листов пакета железа сердечника якоря при воздействии электромагнитных сил с частотой, кратной числу полюсов электродвигателя, несовершенство системы крепления лобовых частей обмотки якоря, несоответствие коэффициентов температурных линейных удлинений меди обмоток, изолирующих ее материалов и стального сердечника якоря. Результатом анализа конструкции серийных ТЭД явились предложения по совершенствованию конструкции узлов, наиболее подверженных отказам. Для устранения пробоев изоляции якорей в эксплуатации предложены новая конструкция нажимных шайб и усовершенствованная технология пропитки якорей серийно выпускаемых тяговых электродвигателей тепловозов. Предлагаемые конструктивные решения могут быть использованы как при создании новых конструкций ТЭД для перспективных тепловозов, так и при модернизации серийных конструкций. Таким образом, применение предложенных конструктивных и технологических решений позволит повысить надежность ТЭД тепловозов.

Ключевые слова: тепловоз, тяговый электродвигатель, отказ ТЭД, коэффициент линейного теплового расширения, изоляция, надежность.

Valentin I. Kiselev, Alexei I. Fedianin

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, the Russian Federation

IMPROVEMENT THE DESIGN AND TECHNOLOGY OF REPAIR THE DIESEL LOCOMOTIVES TRACTION ELECTRIC MOTORS

Abstract. The subject of consideration of this article is the traction electric motor of a diesel locomotive. Traction electric motor (TED) is the main element of power transmission, therefore, the reliability of the locomotive as a whole depends on its reliability. The main causes of failures of traction motors in operation are considered. Based on the analysis of statistical data, it can be argued that the most damaged part of the traction motor is its armature. In the context of the introduction of new classes of insulation heat resistance by the new standard - GOST 2582-2013 – ensuring the reliability of the anchor is especially important. The causes of the most common failures of TED in operation have been established: violation of the integrity of the insulation of the winding by the sharp edges of the extreme sheets of the anchor core iron package when laying the winding in the grooves of the core, vibration of the extreme sheets of the anchor core iron package when exposed to electromagnetic forces with a frequency multiple of the number of poles of the electric motor, imperfection of the fastening system of the frontal parts of the armature winding, mismatch of the coefficients of temperature linear elongations copper windings, insulating materials and steel core of the armature. The result of the analysis of the design of serial TED were proposals to improve the design of the nodes most prone to failures. To eliminate breaks in the insulation of anchors in operation, a new design of pressure washers and an improved technology for impregnating anchors of commercially produced traction electric motors of locomotives are proposed. The proposed design solutions can be used both when creating new TED designs for promising locomotives and when upgrading serial designs. Thus, the application of the proposed design and technological solutions will increase the reliability of the diesel locomotives.

Keywords: diesel locomotive, traction electric motor, TED failure, coefficient of linear thermal expansion, insulation, reliability.

В процессе эксплуатации тяговые электродвигатели (ТЭД) локомотивов подвергаются механическим (вибрации), электродинамическим (броски тока), электрическим (перенапряжения) и тепловым нагрузкам (при больших токах в силовой цепи). Компенсировать отрицательное воздействие указанных факторов можно обоснованным выбором изоляционных материалов, соблюдением технологии их изготовления, оптимальной работой систем охлаждения электродвигателей.

На долю ТЭД приходится от 20 до 30 % отказов от общего числа неисправностей локомотивов. При этом стоимость устранения последствий отказов превышает аналогичной показатель практически всех видов оборудования (за исключением дизеля и трансформаторов). Нормы пробега электрических машин, заложенные в технических требованиях, не выполняются. ТЭД, особенно их якоря, капитально обновляются через 300 – 500 тыс. км пробега.

По данным статистики наиболее повреждаемой частью ТЭД является якорь по причине снижения сопротивления изоляции с последующим ее пробоем. Среди основных причин такого положения вещей можно выделить следующие:

- нарушение целостности изоляции обмотки острыми краями крайних листов пакета железа сердечника якоря при укладке обмотки в пазы сердечника;

- вибрация крайних листов пакета железа сердечника якоря при воздействии электромагнитных сил с частотой, кратной числу полюсов электродвигателя;

- несовершенство системы крепления лобовых частей обмотки якоря;

- несоответствие коэффициентов температурных линейных удлинений меди обмоток, изолирующих ее материалов и стального сердечника якоря.

Повышение ресурса электрических машин может быть достигнуто использованием новых электроизоляционных материалов, имеющих класс нагревостойкости до 220 °С, факт создания которых отражен в новом ГОСТе 2582–2013 (таблица).

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Классы нагревостойкости изоляции в соответствии с ГОСТ 2582–2013

Стандарт	Узлы электрических машин	Класс нагревостойкости изоляции							
		А	Е	В	Ф	Н	200	220	250
	Электрические машины постоянного тока, допускаемые значения превышения температуры обмоток якорей, °С								
ГОСТ 2582–2013	Обмотки полюсов	–	115	130	155	180	200	220	250
	Обмотки якорей	–	105	120	140	160	180	200	220
	Коллекторы	–	105	120	120	120	120	120	120

В производстве ТЭД используются две системы изоляции:

система на основе сухих и предварительно пропитанных стеклослюдинитовых лент с пропиткой готовых узлов (изделия) в эпоксидном компаунде («Монолит-2» и «Монолит-4»), соответствующих классу нагревостойкости F;

системы на основе сухих лент и пленок с пропиткой в кремнийорганическом лаке КО-916к, соответствующие классу Н по ГОСТ 2582–2013.

Вторая система (на основе полиамидных пленок с пропиткой в кремнийорганическом лаке) характеризуется более высокой электрической прочностью, но может использоваться только для обмоток, укладываемых в пазах.

Изоляция типа «Монолит» может использоваться как для пазовых, так и для полюсных обмоток.

В перспективе должна быть разработана такая технология нанесения изоляции на токопроводящие части обмоток, которая исключила бы применение ручного труда в данном технологическом процессе.

На качество депоовского и заводского ремонтов ТЭД существенное влияние оказывает соблюдение технологии пропитки якорей. Мнение о том, что воздействия во время эксплуатации на изоляцию обмоток ТЭД неблагоприятных эксплуатационных факторов приводят к постепенному старению и, как результат, к пробоям, в принципе верно. Однако считать указанные факторы главной причиной возникновения трещин в изоляции обмоток якорей не совсем правильно, так как реальные причины сложившейся ситуации с надежностью изоляции несколько иные.

По нашему мнению, основной причиной возникновения трещин в изоляции обмоток электрических машин является разность температурных удлинений материала проводников (меди) и изолирующих их слюдосодержащих материалов: коэффициент линейного температурного удлинения меди ($16,6 \cdot 10^{-6} \text{°C}^{-1}$) по сравнению с изолирующим ее материалом – слюдой ($3 \cdot 10^{-6} \text{°C}^{-1}$) в пять раз выше. Следовательно, по причине выделения в проводниках при протекании по ним тока тепла (закон Джоуля – Ленца) происходит удлинение меди, а изолирующая ее слюдосодержащая конструкция из-за отставания в удлинении в пять раз трескается. Прочие факторы негативного воздействия нагрузок только усугубляют процесс развития трещин. Эта гипотеза была высказана более 50 лет назад конструктором НЭВЗ [5, с. 13].

В связи с изложенным выше предлагается ряд рекомендаций, которые будут способствовать повышению надежности эксплуатируемых ТЭД.

Анализ состояния изоляции якорей ТЭД, поступающих на капитальный ремонт, показал, что «прогары» изоляции – это сочетание электрического пробоя с тепловым, которые происходят в тех местах, где вентиляционные каналы сердечника якоря забиты продуктами износа коллекторно-щеточного узла и в микротрещинах изоляционной основы обмоток находится графитовая пыль от щеток.

Существовавшая конструкция нажимной шайбы – реберная – в процессе эксплуатации показала недостаточную прочность ребер. С целью устранения отказов по излому ребер была разработана новая конструкция с утолщением ребер в средней части сечения, что привело к

частичному перекрытию вентиляционных каналов в сердечнике якоря и, как следствие, уменьшило объем охлаждающего воздуха, проходящего через якорь. Данная конструкция выпускается и в настоящее время.

Существующую конструкцию нажимной шайбы якоря ТЭД (рисунок 1) нельзя признать совершенной, так как ее ребра перекрывают более 10 % вентиляционных каналов сердечника якоря, ухудшая тем самым условия охлаждения якорной обмотки электродвигателя.

Изготовленная в свое время в качестве эксперимента опытная партия ТЭД, оснащенных дисковыми нажимными шайбами (рисунок 2) с отверстиями, соосными с вентиляционными каналами в сердечнике якоря, позволила повысить надежность изоляции в эксплуатации.

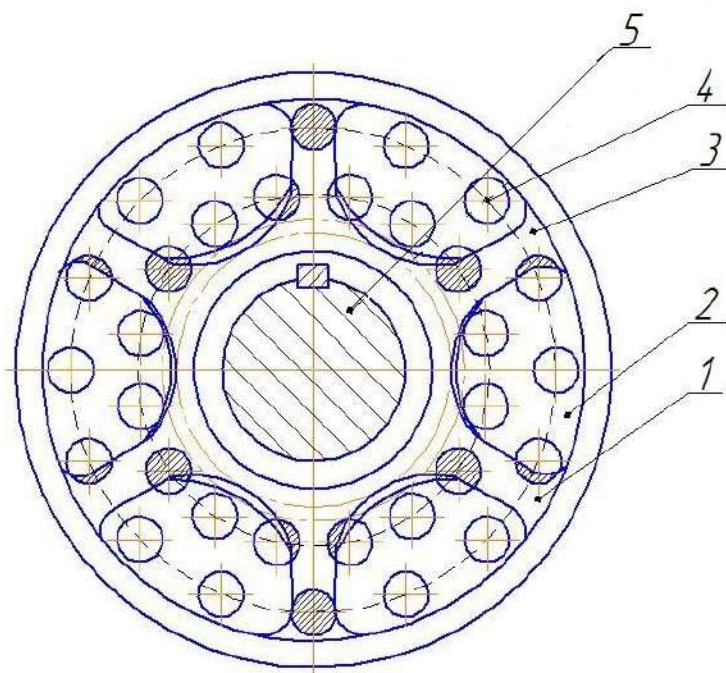


Рисунок 1 – Схема перекрытия каналов в сердечнике якоря ребрами нажимной шайбы серийной конструкции:

1 – нажимная шайба; 2 – сердечник якоря; 3 – ребро нажимной шайбы;
4 – вентиляционный канал в сердечнике якоря; 5 – вал якоря

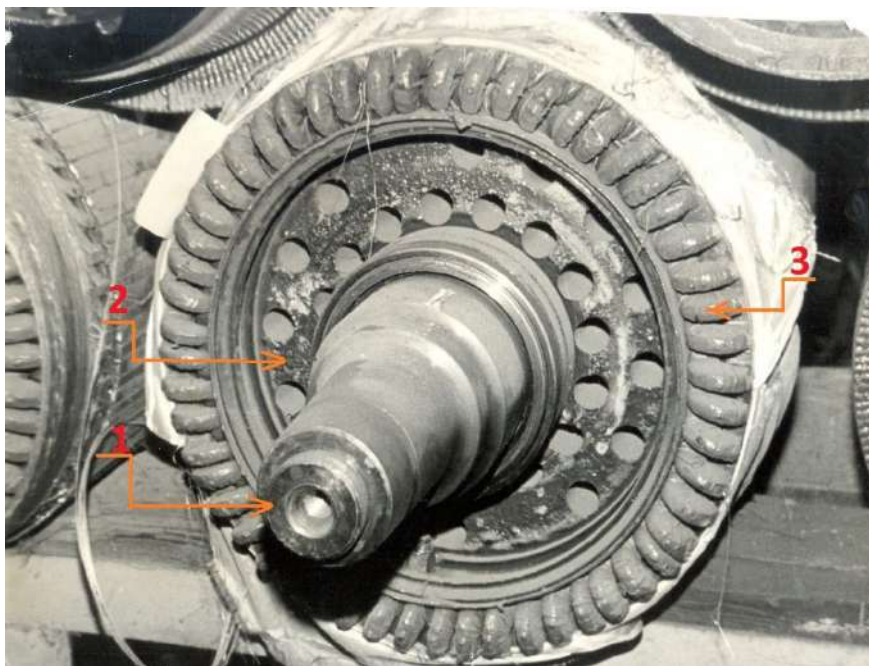


Рисунок 2 – Якорь ТЭД с дисковой нажимной шайбой:

1 – вал якоря; 2 – нажимная шайба; 3 – лобовые части обмотки якоря

Исследования показывают, что наибольшие температуры нагрева в эксплуатации наблюдаются в зоне задних лобовых частей обмотки якоря, охлаждаемых воздухом, поступающим после коллекторно-щеточного узла. В связи с этим предлагается изменить направление движения охлаждающего воздуха, а именно: направить его со стороны задней нажимной шайбы к коллектору. Исследования ученых различных организаций подтверждают необходимость этих изменений.

Для повышения эффективности технологического процесса пропитки якорей в депо и на заводах разработано несколько вариантов данной операции. Схема одного из них представлена на рисунке 3. Однако всем им присущ один и тот же недостаток – после пропитки якоря в автоклаве вводится операция по ожиданию стекания лака, не застывшего в якоре, под действием гравитационных сил.

Предлагаемое повторное вакуумирование якоря после его пропитки в автоклаве без лака преследует цель скорейшего устранения из лака растворителей – ксилола или толуола, за счет чего повышается скорость набора вязкости лака.

Это, как показали наши исследования, позволяет увеличить наполняемость якоря ТЭД ЭД118Б на 1 кг, что даст возможность повысить электрическую прочность изоляции на 8 – 10 % (рисунок 4).

Для повышения надежности крепления лобовых частей обмотки якоря предлагается внедрить стеклометаллические бандажные взамен применяющихся в настоящее время конструкций из лент ЛСБ-Ф.

В процессе эксплуатации в якорях электродвигателей, лобовые части которых закреплены стеклобандажными, из-за радиального перемещения лобовых частей под действием центробежных сил происходит их отрыв от наружной поверхности задней нажимной шайбы якоря. В образующийся при этом зазор между задней нажимной шайбой и приподнятыми лобовыми частями проникают пыль, влага, масляные пары, что негативно влияет на срок службы изоляции обмотки.

Радиальные перемещения задних лобовых частей, а также воздействие грязевой массы на обмотку вызывают пробой изоляции в местах выхода обмотки из пазов сердечника. Предотвратить повреждения изоляции можно устранением радиальных перемещений лобовых частей обмотки, что может быть достигнуто путем повышения прочности бандажей и увеличением жесткости проводников обмотки якоря.

Этим целям отвечает конструкция стеклометаллического бандаж (СМБ), объединяющая преимущества проволочных бандаж (прочность на растяжение) и стеклобандаж (технологичность изготовления). СМБ представляет собой бандаж, намотанный из слоев стеклоленты, внутри которого размещена намотанная вперекрест со стеклолентой металлическая лента размером $0,1 \times 20$ мм из стали У-10А.

Намотку бандаж якоря производят на серийных бандажировочных станках. Якорь размещают в центрах станка, на каретке которого расположен механизм натяжения стеклоленты. Установленный в центрах якорь вращается приводным двигателем через коробку скоростей и шпиндель.

Натяжение первых слоев стеклоленты на лобовые части якоря производится механизмом натяжения.

Намотку бандаж осуществляют в следующей последовательности. При неполном натяжении стеклоленты наматывают на лобовую часть обмотки якоря 1,5 – 2 витка (для ее закрепления). Последующие витки стеклоленты наматывают с натяжением, соответствующим техническим требованиям. После намотки по всей длине бандаж нескольких слоев стеклоленты на расстоянии 5 – 8 мм от края сердечника устанавливают под стеклоленту металлическую ленту. Конструкция защищена патентом на изобретение и показала надежность в эксплуатации опытной партии двигателей.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

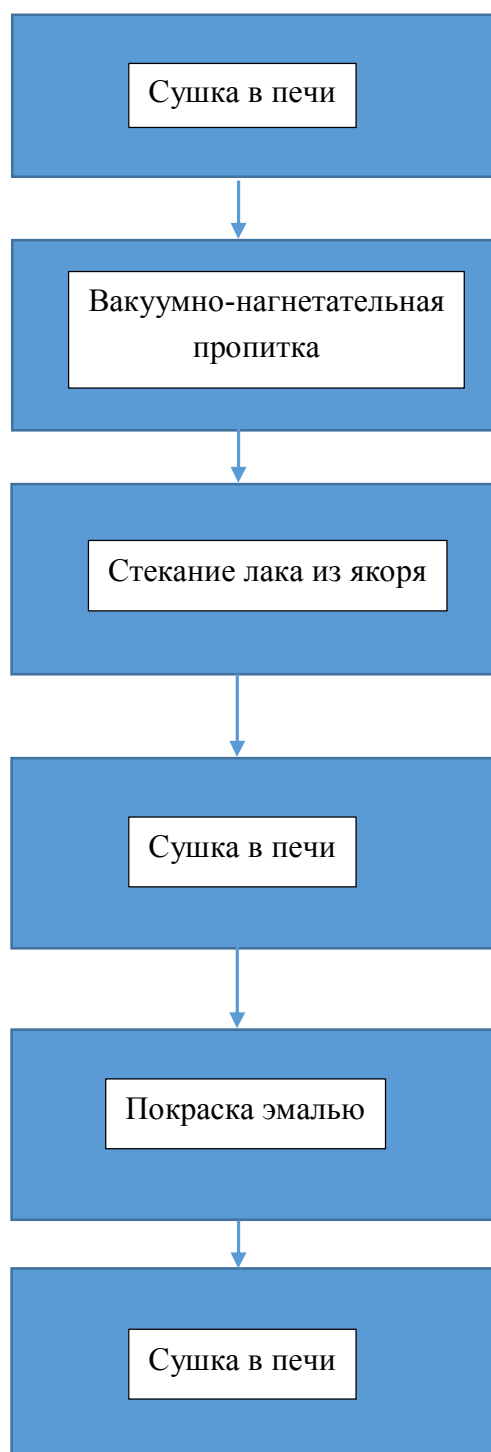


Рисунок 3 – Существующая технология пропитки



Рисунок 4 – Предлагаемая технология пропитки

Внедрение предлагаемых конструкций:

- нажимной шайбы якоря ТЭД;
- стеклометаллического бандажа;
- изменения направления движения потока охлаждающего воздуха;

– и технологического решения – пропитки якорей с двойным вакуумированием – позволит повысить надежность ТЭД за счет снижения числа их отказов в эксплуатации.

Список литературы

1. Рахматуллин, М. Д. Технология ремонта тепловозов : учебник / М. Д. Рахматуллин. – Москва : Транспорт, 1983. – 447 с. – Текст : непосредственный.
2. Винокуров, В. А. Электрические машины железнодорожного транспорта : учебник / В. А. Винокуров, Д. А. Попов. – Москва : Транспорт, 1986. – 511 с. – Текст : непосредственный.
3. Курбасов, А. С. Проектирование тяговых электрических машин : учебное пособие / А. С. Курбасов, В. И. Седов, Л. Н. Сорин. – Москва : Транспорт, 1987. – 536 с. – Текст : непосредственный.
4. Тяговые электрические машины : учебник / В. Г. Щербаков, А. Д. Петрушин [и др.]. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2016. – 641 с. – Текст : непосредственный.
5. Исследование высоковольтных электрических машин постоянного и пульсирующего тока / А. Л. Курочка, А. А. Суриков [и др.]. – Москва : Энергия, 1975. – 192 с. – Текст : непосредственный.
6. Данковцев, В. Т. Техническое обслуживание и ремонт локомотивов : учебник / В. Т. Данковцев, В. И. Киселев, В. А. Четвергов. – Москва : Маршрут, 2007. – 570 с. – Текст : непосредственный.
7. Алексеев, Б. А. Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов / Б. А. Алексеев. – Москва : Энас, 2002. – 139 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Rakhmatullin M.D. *Tehnologija remonta teplovozov: uchebnik* [Technology of repair of locomotives: Textbook]. Moscow, Transport Publ., 1983, 447 p. (In Russian).
2. Vinokurov V.A., Popov D.A. *Jelektricheskie mashiny zheleznodorozhnogo transporta: uchebnik* [Electric machines of railway transport: textbook]. Moscow, Transport Publ., 1986, 511 p. (In Russian).
3. Kurbasov A.S., Sedov V.I., Sorin L.N. *Proektirovanie tjagovyh jelektricheskikh mashin: uchebnoe posobie* [Design of traction electric machines: textbook]. Moscow, Transport Publ., 1987, 536 p. (In Russian).
4. Shcherbakov V.G., Petrushin A.D. et al. *Tjagovye jelektricheskie mashiny: uchebnik* [Traction electric machines: textbook]. Moscow, Educational and Methodological Center for education in railway transport Publ., 2016, 641 p. (In Russian).
5. Kurochka A.L. et al. *Issledovanie vysokovol'nykh jelektricheskikh mashin postojannogo i pul'sirujushhego toka* [Research of high-voltage electric machines of direct and pulsating current]. Moscow, Energiia Publ., 1975, 192 p. (In Russian).
6. Dankovtsev V.T., Kiselev V.I., Chetvergova V.A. *Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont lokomotivov: uchebnik* [Maintenance and repair of locomotives: textbook]. Moscow, Marchrut Publ., 2007, 570 p. (In Russian).
7. Alekseev B. A. *Opreделение sostoyaniya (diagnostika) krupnykh gidrogeneratorov* [Determination of the condition (diagnostics) of large hydro generators]. Moscow, Enas Publ., 2002, 139 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Киселев Валентин Иванович

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы», РУТ (МИИТ).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kiselev Valentin Ivanovich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

9, b. 9, Obraztcova st., Moscow, 127994, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «Electrical trains and locomotives», RUT (MIIT).

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Тел.: +7 (495) 684-21-51.
E-mail: kiselev40@mail.ru

Phone: +7 (495) 684-21-51.
E-mail: kiselev40@mail.ru

Федянин Алексей Игоревич

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр.9, г. Москва, 127994, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электропоезда и локомотивы», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (495) 684-21-51.

E-mail: pereyezd2@gmail.com

Fedianin Alexei Igorevich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

9, b. 9, Obraztcova st., Moscow, 127994, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Electrical trains and locomotives», RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 684-21-51.

E-mail: pereyezd2@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Киселев, В. И. Совершенствование конструкции и технологии ремонта тяговых электродвигателей тепловозов / В. И. Киселев, А. И. Федянин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 4 (52). – С. 75 – 82.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kiselev V.I., Fedianin A.I. Improvement the design and technology of repair the diesel locomotives traction electric motors. Journal of Transsib Railway Studies, 2022, no. 4 (52), pp. 75-82 (In Russian).

УДК 629.4.027

В. Ф. Кузнецов, С. Г. Шантаренко, С. В. Савинкин

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ИЗНОС МАТЕРИАЛА ГРЕБНЯ БАНДАЖА КОЛЕСА ЛОКОМОТИВА

Аннотация. В настоящей статье рассмотрен процесс изнашивания материала гребня бандажа колеса при движении локомотива в кривой заданного радиуса.

Методология проведения рассматриваемого в данной статье исследования заключалась в том, что на основе выражения для глубины проникновения головки рельса в материал гребня бандажа было рассмотрено движение колеса по внутреннему рельсу в кривой. При этом учитывалось, что точка контакта на гребне бандажа будет двигаться по грани рельса с проскальзыванием и что область контакта является довольно узкой поверхностью с границей, близкой к эллипсу. Получены формулы для расчета скорости и пути проскальзывания точки контакта гребня бандажа колеса локомотива с рельсом.

В результате исследования были выведены уравнения для оценки таких величин, как объем, интенсивность и скорость изнашивания бандажа (в расчете на один оборот колеса).

Показано, что полученные в результате проведенной работы выражения могут быть использованы для расчета интенсивности износа гребня бандажа при движении локомотива в кривой заданного радиуса.

Величина износа материала гребней бандажей колесных пар может определяться на основе полученных уравнений индивидуально для конкретной серии локомотива и заданного полигона его эксплуатации.

Ключевые слова: гребень бандажа, головка рельса, силовой контакт, глубина проникновения, скорость проскальзывания, интенсивность и скорость изнашивания.

Victor F. Kuznetsov, Sergey G. Shantarenko, Sergey V. Savinkin

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

WEAR OF THE MATERIAL OF THE LOCOMOTIVE WHEEL TIRE FRESH

Abstract. In this article, the process of wear of the material of the ridge of the wheel brace during the movement of the locomotive in a curve of a given radius is considered.

The methodology of the study considered in this article was that, based on the expression for the depth of penetration of the rail head into the material of the bandage ridge, the movement of the wheel along the inner rail in the curve was considered. It was taken into account that the contact point on the ridge of the bandage will move along the edge of the rail with slippage and that the contact area is a fairly narrow surface with a border close to an ellipse. Formulas for

calculating the speed and the slip path of the contact point of the ridge of the locomotive wheel brace with the rail are obtained.

As a result of the study, equations were derived to estimate such quantities as the volume, intensity and wear rate of the bandage (per revolution of the wheel).

It is shown that the expressions obtained as a result of the work carried out can be used to calculate the intensity of wear of the brace ridge when the locomotive is moving in a curve of a given radius.

The amount of the ridges material wear of the wheelset bandages can be determined on the basis of the equations obtained individually for a specific locomotive series and a given range of its operation.

Keywords: bandage ridge, rail head, force contact, penetration depth, slip rate, intensity and wear rate.

Теоретической основой взаимодействия движущего колеса с опорной поверхностью, являющегося реализацией сил трения в специфических условиях постоянно меняющегося контакта обеих поверхностей, принимается адгезионно-деформационная, или молекулярно-механическая теория трения. Сущность указанной теории заключается в признании того факта, что в создании силы трения участвуют силы деформации от взаимного внедрения соприкасающихся тел и силы межмолекулярных связей, называемых адгезионными [1].

В условиях подвижного силового контакта силы взаимодействия могут существовать как проявление внешнего трения, они значительно меньше сил внутреннего трения, что теоретически объясняется освободившимися межмолекулярными связями на поверхности материала в отличие от предельно больших молекулярных связей в его глубинных слоях.

Теоретически возможна такая степень очистки контактирующих поверхностей, когда их межмолекулярные связи достигают усилий объемной структуры, но в этом случае внешнее трение должно уступить место внутреннему.

В реальных условиях эксплуатации переход от внешнего трения к внутреннему или своеобразное холодное сваривание материалов осуществлять не удастся по крайней мере по двум причинам: невозможности получения идеально гладких поверхностей и полного удаления пленок окислов. Образование пленок на так называемых ювенильных поверхностях, оказавшихся в окружении воздуха, происходит очень быстро, для этого требуется время от сотых до тысячных долей секунды. Таким образом, поверхность металла всегда покрыта окислами, имеющими ослабленные межмолекулярные связи по сравнению с объемной структурой. Этот поверхностный слой часто называют «третьим телом», и именно в среде этого «третьего тела» реализуется внешнее трение [2].

Второй причиной является то, что на поверхности контактирующих тел всегда имеются неровности. Под действием нормального давления происходит смятие наиболее выступающих неровностей и внедрение одного тела в другое.

Таким образом, при силовом контакте рельса и гребня бандажа колеса локомотива происходит взаимное проникновение материалов этих тел [3]. Наибольшее внедрение будет происходить в центре области контакта.

Приняты следующие размерности: длина – в миллиметрах, сила – в тонна-силах, время – в секундах.

Глубина проникновения рельса в материал гребня бандажа колеса и глубина проникновения гребня бандажа в материал рельса определяются по выражениям:

$$h_p = \frac{\delta R_r \tau}{(R_p \tau + R_r \tau)}; \quad (1)$$

$$h_r = \frac{\delta R_p \tau}{(R_p \tau + R_r \tau)}, \quad (2)$$

где R_{rr} , $R_{p\tau}$ – соответственно радиусы кривизны поверхностей гребня бандажа и рельса в точке их контакта, мм;

δ – сближение контактирующих тел, мм.

Проникновение рельса в гребень бандажа под действием сжимающей силы P сопровождается упругим или пластическим смятием материала гребня (P – нормальная составляющая силы прижатия гребня бандажа к рельсу) [4, 5].

Как показали расчеты, в центре области контакта пластическая деформация материала начинает происходить при довольно малых значениях сжимающих сил ($P \geq 0,6$ т) [3].

Точка контакта на гребне бандажа будет двигаться по грани рельса с проскальзыванием. Величина пути и скорости проскальзывания будет различной для колес колесной пары,двигающихся по внутреннему и внешнему рельсу в кривых участках пути.

Рассмотрим движение колеса по внутреннему рельсу в кривой радиуса $R_{кр}$. Радиус кривой считаем до середины головки внешнего рельса (рисунок 1).

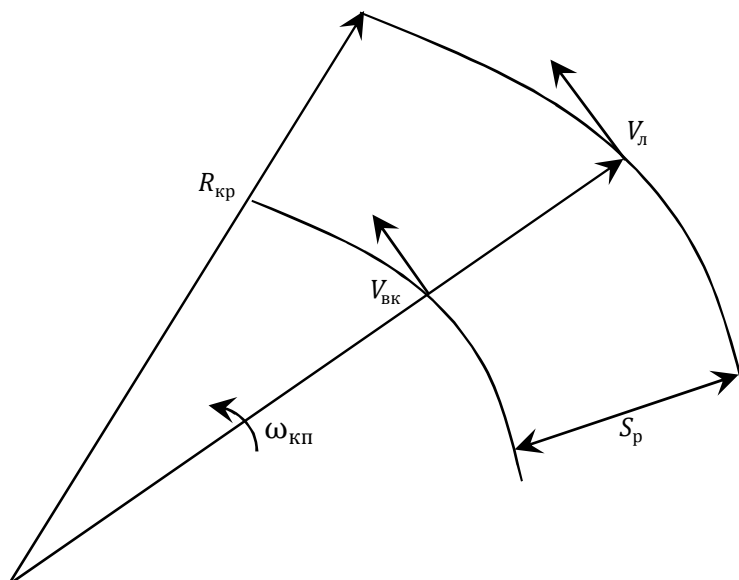


Рисунок 1 – Расчетная схема движения колесной пары в кривой

Мгновенный центр вращения колеса сместится в сторону оси колесной пары. Определим положение этого центра.

Угловая скорость вращения колесной пары вокруг оси определяется по формуле:

$$\omega_{к. п} = \frac{V_{л}}{R_{кл}}, \quad (3)$$

где $V_{л}$ – скорость локомотива, м/с.

Угловую скорость вращения колесной пары относительно центра кривой определим по формуле:

$$\omega_{кр} = \frac{V_{л}}{R_{кр}}. \quad (4)$$

Линейную скорость внутреннего колеса найдем по уравнению:

$$V_{вк} = V_{л} \left(1 - \frac{S_p}{R_{кр}} \right), \quad (5)$$

где S_p – расстояние между средними линиями головок рельсов в кривой, мм.

Радиус r мгновенного центра скорости внутреннего колеса найдем по формуле:

$$r = \frac{V_{вк}}{\omega} = R_{кл} \left(1 - \frac{S_p}{R_{кр}} \right). \quad (6)$$

Скорость проскальзывания внутреннего колеса по кругу катания

$$V_{пр} = \omega(R_{кл} - r) = R_{кл} \left(\frac{S_p}{R_{кр}} \right) \omega. \quad (7)$$

Скорость проскальзывания точки К контакта гребня колеса с гранью рельса (рисунок 2) определим по выражению:

$$V_{K1} = \omega H_K, \quad (8)$$

где $H_K = \left(R_{кл} \left(\frac{s_p}{R_{кр}} \right) + h_K \right)$, мм;

h_K – расстояние от точки К до линии круга катания, мм.

Путь проскальзывания, пройденный точкой К за один оборот колеса,

$$L_{пр1} = 2\pi H_K. \quad (9)$$

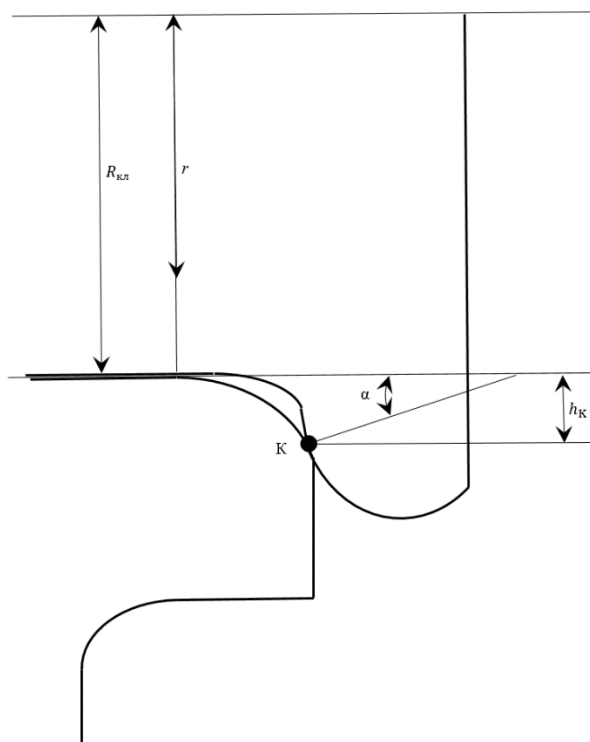


Рисунок 2 – Схема для расчета пути проскальзывания точки К

Рассмотрим движение колеса по внешнему рельсу. Примем, что движение происходит без проскальзывания.

Мгновенный центр вращения находится в точке контакта колеса с головкой рельса по кругу катания, поэтому $r = R_{кл}$.

Выражения для скорости проскальзывания точки К и пройденного ею пути за один оборот колеса имеют вид:

$$V_{K2} = \omega h_K; \quad (10)$$

$$L_{пр2} = 2\pi h_K. \quad (11)$$

В процессе относительного движения будет происходить пластическое оттеснение материала гребня бандажа в области контакта с рельсом и частичное микрорезание за счет внедрения неровностей шероховатости рельса в материал гребня.

Область контакта является довольно узкой поверхностью с границей, близкой к эллипсу.

Размеры полуосей эллипса зависят от величины сжимающей силы P [3, 4]:

$$a = 7,7317 \sqrt[3]{P}; \quad (12)$$

$$b = 0,3456 \sqrt[3]{P}. \quad (13)$$

При движении локомотивов в кривых силы прижатия гребня бандажа к рельсу могут достигать величины до 10 тс. Площадка контакта может быть в длину до 30 мм, а в ширину –

до 1,5 мм. Для рельса допускается шероховатость третьего класса ($R_a = 0,04$ мм, $R_z = 0,08$ мм, $l = 8$ мм) (рисунок 3) [6]. На площадке контакта могут одновременно разместиться до 18 неровностей по длине и одна неровность по ее ширине.



Рисунок 3 – Шероховатость рельса

Одна неровность, имеющаяся на рельсе, проникает в материал гребня на глубину

$$h_p = 0,0086 \sqrt[3]{P^2}. \quad (14)$$

Площадь сечения, перпендикулярного к направлению перемещения неровности,

$$S_{сч} = 0,5\pi b h_p = 0,00467P. \quad (15)$$

В каждый момент времени в точке контакта образуется некоторая область, которая перемещается вдоль рельса со скоростью движения локомотива. В границах этой области происходит перемещение материала гребня бандажа относительно рельса со скоростью проскальзывания. Получается, что неровность рельса, расположенная в центре области, как бы перемещается по материалу гребня. На самом деле неровности в центре области постоянно меняют друг друга, а некоторая фиксированная точка гребня вращается вместе с колесом, попадая в область контакта один раз за один оборот колеса [7].

Неровности по длине области контакта располагаются случайным образом. Вероятность того, что две последовательные неровности будут перемещаться по одной и той же траектории, весьма мала. Можно считать, что весь материал гребня бандажа, подверженный пластическому выдавливанию за счет проникновения рельса, будет истираться при дальнейшем движении колеса по рельсу за счет неровностей на его поверхности [8, 9].

Объем изношенного материала гребня бандажа за один оборот колеса

$$\vartheta_{из} = S_{сч} L_{пр} = 0,00934\pi H_K P. \quad (16)$$

Для колеса, движущегося по внешнему рельсу, принимается $H_K = h_K$.

Интенсивность изнашивания

$$I = \frac{\vartheta_{из}}{2\pi R_{кл}} \left[\frac{\text{мм}^3}{\text{мм}} \right] = 0,00467 H_K P / R_{кл}. \quad (17)$$

Скорость изнашивания

$$V_i = \frac{\vartheta_{из}}{2\pi R_{кл}} V_L. \quad (18)$$

Таким образом, результатом проведенных исследований являются выражения для расчета интенсивности I и скорости V_i изнашивания материала гребня бандажа в зависимости от сжимающей силы (силы прижатия гребня бандажа к рельсу) P .

Эти формулы получены при условии непрерывного контакта гребня бандажа и головки рельса. Величина сжимающей силы зависит от конструктивных особенностей локомотива, от характера вписывания и движения колесных пар в кривых, от радиуса и протяженности кривых (для прямолинейных участков пути считаем $P = 0$).

Величина износа материала гребней бандажей колесных пар определяется индивидуально для конкретной серии локомотива и заданного полигона его эксплуатации на основе приведенных выше формул.

Список литературы

1. Лисунов, В. Н. Использование сил взаимодействия движущего колеса с рельсом в режимах тяги и электрического торможения : монография / В. Н. Лисунов. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2003. – 160 с. – Текст : непосредственный.
2. Буйносов, А. П. Влияние условий эксплуатации локомотивов на износ бандажей колесных пар / А. П. Буйносов, К. Н. Яковлев, А. В. Хваловский. – Текст : непосредственный // Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – № 3. – С. 46–49.
3. Определение напряжений и глубины взаимного проникновения материалов головки рельса и гребня бандажа колеса локомотива в области их силового контакта / В. Ф. Кузнецов, С. Г. Шантаренко, В. А. Болотюк, С. В. Савинкин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 3 (51). – С. 90–98.
4. Беляев, Н. М. Вычисление наибольших расчетных напряжений при сжатии соприкасающихся тел / Н. М. Беляев. – Текст : непосредственный // Сборник Ленинградского института инженеров путей сообщения. – 1929. – № 102. – С. 151–174.
5. Полюшкин, Н. Г. Основы теории трения, износа и смазки : учебное пособие / Н. Г. Полюшкин. – Красноярск : Красноярский гос. аграрный ун-т, 2013. – 192 с. – Текст : непосредственный.
6. Ильиных, А. С. Научно-методические основы высокопроизводительной технологии шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути / А. С. Ильиных – Текст : непосредственный // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 1. – № 1 (69). – С. 89–95.
7. Демкин, Н. Б. Контактное шероховатых поверхностей / Н. Б. Демкин. – Москва : Наука, 1970. – 227 с. – Текст : непосредственный.
8. Крагельский, И. В. Трение, изнашивание и смазка : справочник : в 3 томах / И. В. Крагельский, В. В. Алисин. – Москва : Машиностроение, 1978. – Т. 1. – 400 с. – Текст : непосредственный.
9. Крагельский, И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – Москва : Машиностроение, 1968. – 480 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Lisunov V.N. *Ispol'zovanie sil vzaimodeistviia dvizhushchego koleasa s rel'som v rezhimakh tiagi i elektricheskogo tormozheniia: monografiia* [The use of forces of interaction of the driving wheel with the rail in traction and electric braking modes: monograph]. Omsk, Omsk State Transport University Publ., 2003, 160 p. (In Russian).
2. Buinosov A.P., Yakovlev K.N., Khvalovskii A.V. Influence of operating conditions of locomotives on the wear of wheelset bandages. *Nauchno-tehnicheskii vestnik Povolzh'ia – Scientific and technical Volga region bulletin*, 2019, no. 3, pp. 46-49 (In Russian).
3. Kuznetsov V.F., Shantarenko S.G., Bolotyuk V.A., Savinkin S.V. Determination of stresses and the depth of mutual penetration of the materials of the rail head and the locomotive wheel tire fresh in the area of their force contact. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 3 (51), pp. 90-98 (In Russian).
4. Beliaev N.M. Calculation of the greatest design stresses during compression of contiguous bodies. *Sbornik Leningradskogo instituta inzhenerov putei soobshcheniia – Collection of the Leningrad Institute of Railway Engineers*, 1929, no. 102, pp. 151-174 (In Russian).

5. Poliushkin N.G. *Osnovy teorii treniia, iznosa i smazki: uchebnoe posobie* [Fundamentals of the theory of friction, wear and lubrication: textbook]. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State Agrarian University Publ., 2013, 192 p. (In Russian).

6. Il'nykh A.S. Scientific and methodological foundations of high-performance rail grinding technology in railway track conditions. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Saratov State Technical University*, 2013, vol. 1, no. 1 (69), pp. 89-95 (In Russian).

7. Demkin N.B. *Kontaktirovanie sherokhovatykh poverkhnostei* [Contacting rough surfaces]. Moscow, Nauka Publ., 1970, 227 p. (In Russian).

8. Kragel'skii I.V., Alisin V.V. *Trenie, iznashivanie i smazka: spravochnik: v 3 tomakh* [Friction, wear and lubrication: handbook: in 3 volumes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, vol. 1, 4007 p. (In Russian).

9. Kragel'skii I.V. *Trenie i iznos* [Friction and wear]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968, 480 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Виктор Федорович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Высшая математика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-13-44.

E-mail: krupskoi1-301@mail.ru

Шантаренко Сергей Георгиевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, проректор по научной работе, профессор кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-13-44.

E-mail: nauka@omgups.ru

Савинкин Сергей Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: +7 (923) 694-61-15.

E-mail: syava-sv@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кузнецов, В. Ф. Износ материала гребня бандажа колеса локомотива / В. Ф. Кузнецов, С. Г. Шантаренко, С. В. Савинкин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 4 (52). – С. 82 – 88.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov Victor Fedorovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Higher mathematics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-13-44.

E-mail: krupskoi1-301@mail.ru

Shantarenko Sergey Georgievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, vice-rector for scientific work, professor of the department «Technologies of transport engineering and rolling stock repair», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-13-44.

E-mail: nauka@omgups.ru

Savinkin Sergey Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Technologies of transport engineering and rolling stock repair», OSTU.

Phone: +7 (923) 694-61-15.

E-mail: syava-sv@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kuznetsov V.F., Shantarenko S.G., Savinkin S.V. Wear of the material of the locomotive wheel tire fresh. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 4 (52), pp. 82-88 (In Russian).

Г. Р. Хальфин

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ), г. Ташкент, Республика Узбекистан

КОНТРОЛЬ УСИЛИЙ НАЖАТИЯ КЛЕММ СКРЕПЛЕНИЯ PANDROL FASTCLIP НА ПОДОШВУ РЕЛЬСОВ

Аннотация. В данной статье рассмотрена проблема потери упругих свойств рельсовых креплений Pandrol Fastclip в процессе эксплуатации. Исследования связаны с прогнозированием динамики изменения упругих свойств прижимных клемм крепления Pandrol Fastclip в процессе их длительной эксплуатации и предусматривается создание методов управления (регулирования) нажатием клемм крепления на подошву рельсов, что гарантирует безопасность движения поездов с установленными скоростями. На базе проведенных исследований разработана конструкция устройства, повышающего усилие нажатия клемм крепления на подошву рельсов. Это устройство обеспечит получение оптимальных параметров прикрепления рельсов к подрельсовому основанию на всех этапах эксплуатации железнодорожного пути. При этом не будет необходимости проводить замену дорогостоящих импортных упругих клемм крепления Pandrol Fastclip в случаях снижения упругости клемм в действующем пути. Результаты исследований актуальны для десятков зарубежных железных дорог, где эксплуатируются модификации крепления Pandrol Fastclip: Pandrol Fastclip FC, Pandrol Fastclip FCA, Pandrol Fastclip FE, Pandrol 350, Pandrol SFC, Pandrol 1520 и др. Предлагаемая технология проведения работ по повышению уровня технического состояния конструкции промежуточного рельсового крепления не потребует предоставления «окон» в графиках движения поездов, что не повлияет на провозную и пропускную способность железнодорожного пути и не будет влиять на задержки графиковых поездов.

Ключевые слова: промежуточное рельсовое крепление, бесстыковой путь, сопротивление сдвигу, концевой изолятор, регулировочный элемент.

Gali-Askar R. Khalfin

Tashkent State Transport University (TSTU), Tashkent, Republic of Uzbekistan

CONTROL OF THE PRESSING FORCES OF THE PANDROL FASTCLIP FASTENING TERMINALS ON THE SOLE OF THE RAILS

Abstract. This article discusses the problem of loss of elastic properties of Pandrol Fastclip rail fasteners during operation. The research is related to predicting the dynamics of changes in the elastic properties of the Pandrol Fastclip clamping terminals during their long-term operation and provides for the creation of control methods (regulation) by pressing the fastening terminals on the sole of the rails, which guarantees the safety of trains with set speeds. On the basis of the conducted research, the design of a device that increases the pressing force of the fastening terminals on the sole of the rails has been developed. This device will provide optimal parameters for attaching rails to the sub-rail base at all stages of railway track operation. At the same time, there will be no need to replace the expensive imported elastic terminals of the Pandrol Fastclip fastening in cases of a decrease in the elasticity of the terminals in the current path. The research results are relevant for dozens of foreign railways where modifications of the Pandrol Fastclip fastener are operated: Pandrol Fastclip FC, Pandrol Fastclip FCA, Pandrol Fastclip FE, Pandrol 350, Pandrol SFC, Pandrol 1520, etc. The proposed technology for carrying out work to improve the technical condition of the intermediate rail fastening structure will not require the provision of "windows" in train schedules, which will not affect the carrying capacity and capacity of the railway track and will not affect the delays of scheduled trains.

Keywords: intermediate rail fastening, jointless track, shear resistance, end insulator, adjusting element.

Основной конструкцией верхнего строения на главных путях АО «Ўзбекистон темир йўллари», в том числе на участках скоростного и высокоскоростного движения поездов, является бесстыковой путь на железобетонных шпалах типа BF70 с промежуточным рельсовым креплением типа Pandrol Fastclip. Это крепление имеет упругую прутковую клемму, которая прижимает подошву рельса к шпалам. За счет этого обеспечивается удержание рельса на шпале от продольного перемещения под действием поездных нагрузок и температурных сил в плетях бесстыкового пути.

Действующим нормативным документом [1] установлено следующее требование к конструкции бесстыкового пути: «промежуточные рельсовые скрепления должны обеспечивать сопротивление сдвигу рельсов по шпале не менее 16,5 кН на узел скрепления».

Аналогичные требования установлены и для железных дорог России [2].

Сопротивление сдвигу рельсов по шпале в основном зависит от усилия нажатия клемм на подошву рельсов. Пружинные клеммы скрепления типа Pandrol Fastclip в процессе эксплуатации под действием знакопеременной динамической нагрузки от подвижного состава постепенно (как любые пружины, рессоры и пр.) утрачивают свои упругие свойства, что негативно проявляется на работе скреплений и всей конструкции верхнего строения пути. Скорость изменения упругих свойств клемм Pandrol Fastclip до сих пор не исследована и требует детального всестороннего изучения. Процесс снижения упругости клемм является неотъемлемым и объективным. Поэтому актуально выполнение комплекса исследований по установлению сроков (величины пропущенного по пути тоннажа) проведения работ по повышению усилий нажатия клемм на рельс.

Действующими на АО «Ўзбекистон темир йўллари» нормативными документами не регламентируются минимально допустимые усилия нажатия клемм скрепления Pandrol Fastclip на подошву рельсов. В связи с этим интерес представляют рекомендации ОСЖД [3], в которых сформулированы требования по усилию прижатия рельсов к основанию:

«Допускается (при положительных температурах рельсов) ослабление прижатия рельса к основанию, но не более чем на 40 %, по достижении которого необходимо восстановить первоначальное прижатие рельса к основанию (до наступления зимнего периода)».

При этом способы и методы контроля и восстановления усилия нажатия клемм скрепления Pandrol Fastclip на подошву рельсов отсутствуют.

Скрепление Pandrol Fastclip является не регулируемым и не обслуживаемым. Конструкция скрепления не позволяет на определенных этапах эксплуатации конструкции пути изменить в оптимальную сторону объективно утраченные характеристики и в первую очередь усилие нажатия клемм на подошву рельса, повысив тем самым погонное сопротивление продольному перемещению рельсовых плетей бесстыкового пути. До настоящего времени нет методов и технологий диагностики и повышения погонного сопротивления продольному перемещению рельсов за счет увеличения усилия нажатия клеем на рельс [6].

Сопротивление сдвигу рельсов является важнейшей характеристикой для любого вида скреплений, от выполнения которой зависит напряженно-деформированное состояние рельсовых плетей бесстыкового пути, а также общая устойчивость плетей продольному их перемещению под действием поездных нагрузок и температурных сил.

В Инструкции [1] в части приведенного норматива сопротивления сдвигу рельсов по шпале имеются следующие принципиальные недостатки, требующие скорейшего устранения:

в Инструкции полностью отсутствуют правила и методы измерения сопротивления сдвигу рельсов по шпалам, отсутствуют и ссылки на применяемые средства измерений;

отсутствуют рекомендации о способах увеличения сопротивления сдвигу рельсов по шпале в случае выявления дефицита сопротивления сдвигу;

нет правил эксплуатации бесстыкового пути при выявленном дефиците сопротивления сдвигу: в каких случаях необходимо введение ограничений скоростей движения поездов, а в каких движение поездов должно быть прекращено из-за угрозы безопасности.

Без решения этих вопросов невозможно гарантированно обеспечить безопасность эксплуатации бесстыкового пути.

Существующая конструкция концевой (опорной) изолятора (toe insulator) (рисунок 1) скреплений типа Pandrol Fastclip представляет собой объемный изолирующий элемент, изготовленный из диэлектрического материала, который монтируется на концевую часть упругой клеммы промежуточного рельсового скрепления. При нажатии клеммы на подошву рельса происходит выгиб упругой клеммы скрепления, за счет чего создается усилие,

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

прижимающее рельс к подрельсовому основанию. Усилие от упругой клеммы на рельс передается через концевой (опорный) изолятор.



Рисунок 1 – Клемма крепления Pandrol Fastclip с концевым изолятором типа Т 8494 (toe insulator)

Техническое решение по увеличению усилия нажатия клеммы промежуточного рельсового крепления типа Pandrol Fastclip базируется на увеличении отгиба упругой клеммы крепления за счет регулируемого увеличения толщины концевой изолятора. По данному техническому решению подана заявка IAP 2021 0216 в Агентство по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан на получение патента на изобретение «Концевой изолятор клеммы крепления с усилителем нажатия на подошву рельса». Предусматривается замена существующих концевых изоляторов типа Т 8494 (toe insulator) на изоляторы новой конструкции (рисунок 2).

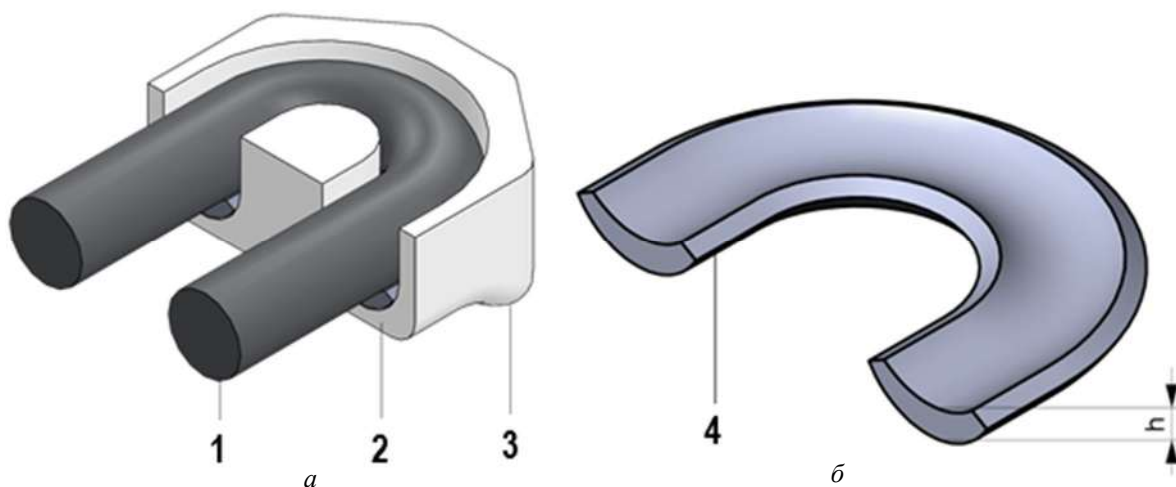


Рисунок 2 – Концевой изолятор с регулятором усилия нажатия клемм на подошву рельса:
1 – фрагмент концевой части клеммы крепления; 2 – концевой изолятор; 3 – опорная часть изолятора;
4 – регулировочный элемент

Предлагаемое техническое решение концевой (опорной) изолятора 2 (см. рисунок 2) представляет собой конструкцию, изготовленную из диэлектрического материала и имеющую опорную часть 3 для передачи усилия нажатия клеммы 1 на верх подошвы рельса. На верхней части изолятора имеется желобообразное углубление, в плане повторяющее конфигурацию концевой части упругой клеммы крепления. Глубина желоба должна быть достаточна для размещения в желобе клеммы крепления и регулировочного элемента 4, располагаемого при необходимости под упругой клеммой. Толщина регулировочного элемента h зависит от степени потери упругости клеммы рельсового крепления и находится в диапазоне от 1 до 10 мм. Регулировочный элемент в плане повторяет форму желобообразного углубления в теле концевой (опорной) изолятора 2. Нижняя часть концевой (опорной) изолятора 2 имеет выступающую опорную часть 3, по форме и размерам повторяющую концевой изолятор типа Т 8494 (toe insulator).

Предлагаемая конструкция концевого (опорного) изолятора может быть применена при монтаже новой рельсошпальной решетки. В этом случае концевой (опорный) изолятор применяется без регулировочных элементов, так как конструкция изолятора обеспечивает номинальное нажатие клемм скрепления на подошву рельса, поскольку высота выступающей опорной части изолятора соответствует высоте опорной части изоляторов скрепления Pandrol Fastclip. При использовании изоляторов при выполнении комплексов работ по содержанию и ремонту верхнего строения железнодорожного пути производится укладка концевых (опорных) изоляторов с регулировочными элементами. Толщина регулировочного элемента может быть определена с помощью специальных приборов (средств измерений), устанавливающих значение фактического нажатия упругих клемм на верх подошвы рельса. Регулировочные элементы могут укладываться в желоб изолятора по одному или по несколько в зависимости от величины необходимой компенсации усилия нажатия клемм. В качестве средства измерения может быть использовано диагностическое средство [4].

Диагностическое средство для измерения усилия нажатия клеммы скрепления Pandrol Fastclip на рельс эксплуатируемого железнодорожного пути разработано в целях прогнозирования надежности конструкции пути и повышения безопасности движения поездов.

Диагностическое средство ДС-F01 состоит из цилиндрического корпуса с вертикальным штоком с рукояткой для вращения штока (рисунок 3). В нижней части прибора имеется специальный захват, обеспечивающий возможность фиксации концевой части клеммы скрепления типа Pandrol Fastclip [6].

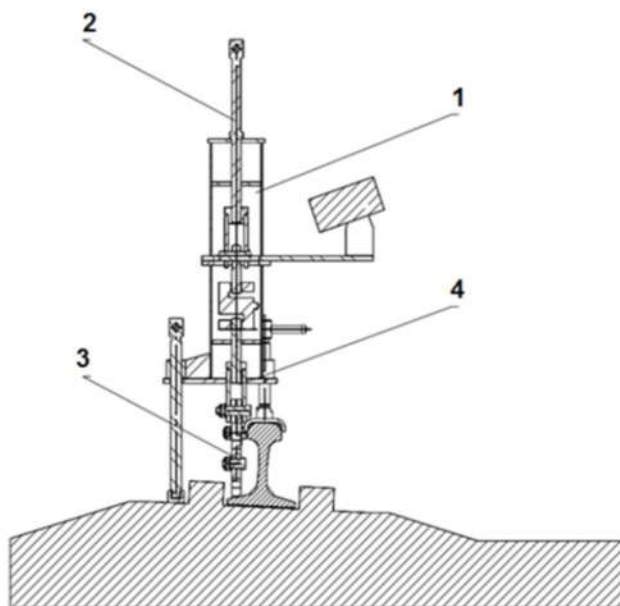


Рисунок 3 – Диагностическое средство ДС-F01 в разрезе:
1 – цилиндрический корпус; 2 – рукоятка; 3 – захват; 4 – система рычагов

Фиксация концевой части клеммы скрепления типа Pandrol Fastclip осуществляется через систему рычагов, привод которых связан с вращением вертикального штока диагностического средства ДС-F01.

ДС-F01 имеет три вертикальных винта для фиксации прибора на железобетонной шпале над клеммой скрепления, усилие нажатия которой на подошву рельса требуется измерить. Вращением винтов необходимо обеспечить вертикальное положение ДС-F01 до начала проведения измерений.

В нижней части прибора имеется консоль с пружиной, к которой прикреплен плоский щуп толщиной 0,1 – 0,2 мм. Конструкция диагностического средства ДС-F01 в сборе приведена на рисунке 2. Внутри цилиндрической части прибора располагается S-образный тензодатчик

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Zemic H3-C3-2.0t-6B, который является базой измерительной системы прибора. При вращении вертикального штока передается усилие подъема клеммы скрепления на тензодатчик, который генерирует электрический сигнал, пропорциональный приложенному к тензодатчику усилию [7]. Конструкция диагностического средства ДС-F01 в разрезе приведена на рисунке 4.

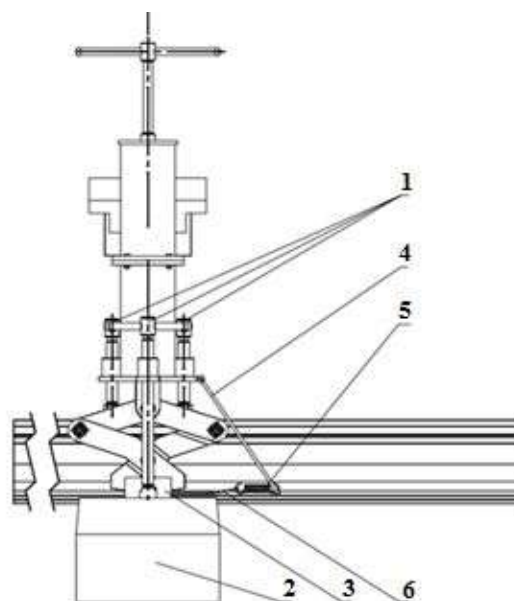


Рисунок 4 – Диагностическое средство ДС-F01 в сборе: 1 – вертикальные винты; 2 – железобетонная шпала; 3 – клемма скрепления; 4 – консоль; 5 – пружина; 6 – плоский шуп

Электрический сигнал от тензодатчика по кабелю передается на электронный индикатор Zemic HF-12 E, который расположен на консоли прибора. По цифровой шкале индикатора высвечивается значение вертикального усилия в килограммах силы, приложенного на концевую часть клеммы скрепления в процессе измерения усилия нажатия клеммы на подошву рельса.

Оценка состояния скреплений с диагностическим средством ДС-F01 проводилась на полигоне Ташкентской дистанции пути (ПЧ-2). В процессе проведения испытаний диагностического средства ДС-F01 проведено измерение усилий нажатия клемм скрепления Pandrol Fastclip на подошву рельса на трех шпалах – 12 клемм. Продолжительность одного измерения составляет от 5 до 7 мин. Для подтверждения стабильности показаний диагностического средства ДС-F01 измерения на трех клеммах повторены трижды. При этом было получено полное совпадение результатов измерений. Усилия нажатия 12 клемм находятся в диапазоне 900 – 1000 кгс, что соответствует исправному состоянию узлов скреплений. Результаты измерений приведены в таблице.

Результаты измерений усилий нажатия клемм

№ п/п	Левый рельс		Правый рельс	
	Наружная клемма	Внутренняя клемма	Внутренняя клемма	Наружная клемма
1	990	992	988	986
2	987	991	987	989
3	993	988	990	991
4	988	992	988	989
5	989	989	992	991
6	988	993	989	986
7	993	992	990	991
8	990	989	991	989
9	989	990	988	989
10	988	987	990	991
11	990	992	987	986
12	991	991	988	989

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

По результатам измерений усилия нажатия построен график, приведенный на рисунке 5.

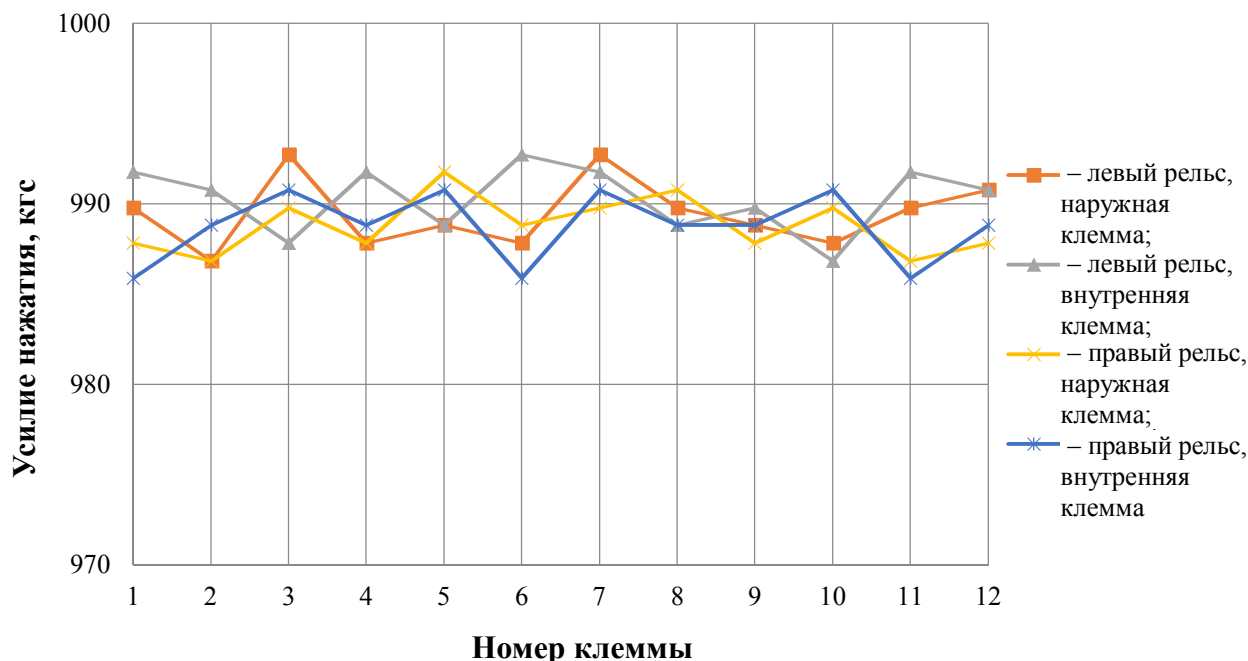


Рисунок 5 – График результатов измерения усилий нажатия диагностическим средством ДС-F01

Результаты измерений показали, что значения усилий нажатия клемм промежуточного рельсового крепления Pandrol Fastclip находятся в нормируемом диапазоне, установленном для данных креплений.

Была проведена оценка состояния креплений с диагностическим средством ДС-F01 «дышащих» концов плети исследуемого участка бесстыкового пути, расположенного в пределах ПК 14+651 – ПК 16+716 перегона Жалоир – Кучлук Ташкентской дистанции пути (ПЧ-2) АО «Ўзбекистон темир йўллари». По результатам оценки состояния креплений с диагностическим средством ДС-F01 построен график, показанный на рисунке 6.

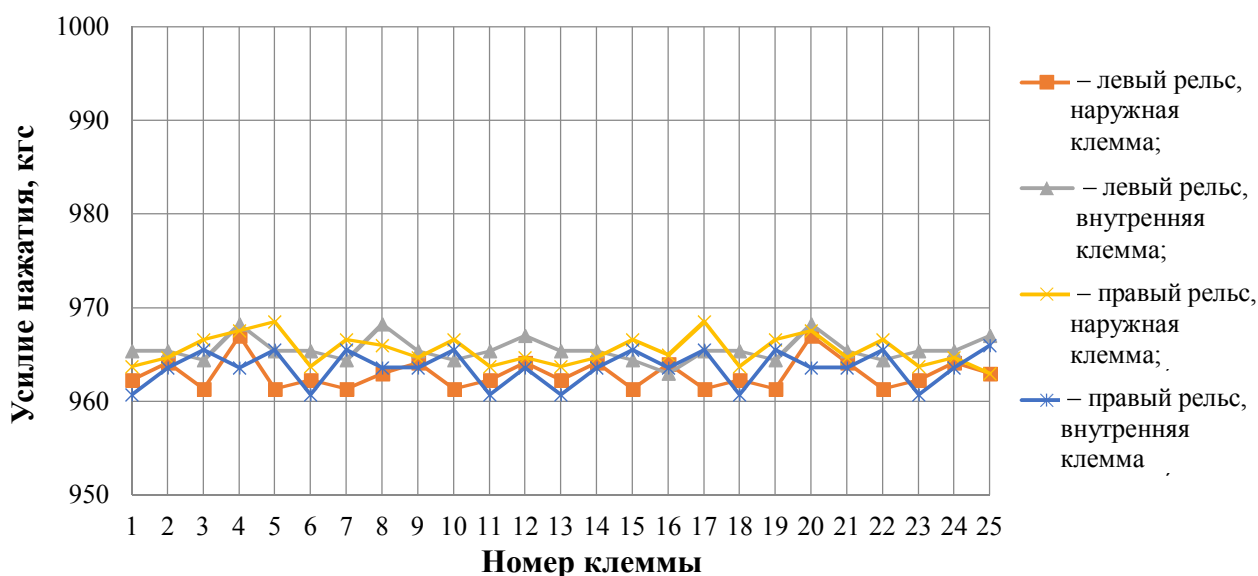


Рисунок 6 – График результатов измерения усилий нажатия диагностическим средством ДС-F01 в эксплуатируемом пути

Результаты оценки показывают, что после пропущенного тоннажа по исследуемому участку бесстыкового пути усилия нажатия клемм скреплений Pandrol Fastclip уменьшились по сравнению с нормативным усилием нажатия клеммы скрепления на 3 %.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

Предлагаемая конструкция концевой (опорной) изолятора и диагностического средства может быть применена во всех модификациях скрепления: Pandrol Fastclip FC, Pandrol Fastclip FCA, Pandrol Fastclip FE, Pandrol 350, Pandrol SFC, Pandrol 1520 и др.

Диагностическое средство ДС-F01 для измерения усилия нажатия клемм скрепления Pandrol Fastclip на подошву рельса является работоспособным и функциональным. Подтверждена высокая точность получаемых результатов измерений, сравнимая с измерением усилия нажатия клемм различными средствами. Сходимость результатов составила 96 %.

По результатам оценки состояния промежуточных рельсовых скреплений на исследуемом участке бесстыкового пути было установлено уменьшение усилия нажатия клемм скреплений Pandrol Fastclip по сравнению с нормативным усилием нажатия клеммы скрепления на 3 %.

При этом гарантируются отсутствие угона рельсовых плетей и обеспечение безопасности движения поездов.

Список литературы

1. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути – Ташкент : АО «УТЙ», 2019. – Текст : непосредственный.
2. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. № 2544 р. – Москва : ОАО «РЖД», 2016. – Текст : непосредственный.
3. Рекомендации по конструкции, укладке и содержанию бесстыкового пути. ОСЖД, Р 778. – Варшава, 2015. – Текст : непосредственный.
4. Патент № IAP 05742 Республики Узбекистан, МПК Е 01 В 35/00. Устройство для измерения силы прижатия клеммы скрепления к рельсу : № IAP 20160168 : заявлено 10.05.2016 : опубликовано 29.12.2018 / Мамадалиев А. Ю., Досметов С. К., Эргашев У. З., Бегматов Н. И., Хальфин Г. Р. – 6 с.: ил. – Текст : непосредственный.
5. Хальфин, Г. Р. Оценка погонного сопротивления продольному перемещению рельсовых плетей / Г. Р. Хальфин, И. Б. Пурцеладзе. – Текст : непосредственный // Universum: технические науки. – 2021. – № 6-2 (87). – С. 13–15.
6. Лесов, К. С. Диагностическое средство для оценки состояния промежуточных рельсовых скреплений / К. С. Лесов, Г. Р. Хальфин. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство и дизайн. – 2022. – № 3. – С. 155–158.
7. Lesov Kuvandik, Halfin Gali-Askar. Assessment of the Condition of Intermediate Rail Fasteners by Diagnostic Tools. Published in *International Journal of Trend in Scientific Research and Development* (ijtsrd), ISSN: 2456-6470, Special Issue | Integrated Innovation on Technical Science and Economic Development, April 2022, pp. 82-84.

References

1. Instructions for the device, installation, maintenance and repair of a jointless track. Tashkent, JSC «UTY», 2019 (In Russian).
2. Instructions for the device, installation, maintenance and repair of a jointless track. Approved by the Order of JSC «Russian Railways» dated December 14, 2016, No. 2544p (In Russian).
3. Recommendations on the design, installation and maintenance of a jointless track. OSJD, R 778. Warsaw, 2015 (In Russian).
4. Mamadaliev A.Yu., Dosmetov S.K., Ergashev U.Z., Begmatov N.I., Khalfin G.R. *Patent UZ IAP 05742*, 29.12.2018.

5. Khalfin G.R., Purtseladze I.B. Estimation of linear resistance to longitudinal movement of rail lashes. *Universum: Tekhnicheskie nauki: elektronnyi nauchnyi zhurnal – Universum: Technical Sciences: electronic scientific journal*, 2021, no. 6-2 (87), pp. 13-15 (In Russian).

6. Lesov K.S. Halfin G.R. Diagnostic tool for assessing the condition of intermediate rail fasteners. *Arkhitectura, stroitel'stvo i dizain – Architecture, construction and design*, 2022, no. 3, pp. 155-158 (In Russian).

7. Lesov Kuvandik, Halfin Gali-Askar. Assessment of the Condition of Intermediate Rail Fasteners by Diagnostic Tools. Published in *International Journal of Trend in Scientific Research and Development (ijtsrd)*, ISSN: 2456-6470, Special Issue | Integrated Innovation on Technical Science and Economic Development, April 2022, pp. 82-84.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Хальфин Гали-Аскар Рустамович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Темирйулчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерия железных дорог», ТГТУ.

Тел.: +998 (99) 869-73-38.

E-mail: galiaskar1991@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Khalfin Gali-Askar Rustamovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Temiryolchilar st., Tashkent, 100167, Republic of Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Railway Engineering», TSTU.

Тел.: +998 (99) 869-73-38.

E-mail: galiaskar1991@bk.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Хальфин, Г. Р. Контроль усилий нажатия клемм скрепления Pandrol Fastclip на подошву рельсов / Г. Р. Хальфин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 4 (52). – С. 89 – 96.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Khalfin G.R. Control of the pressing forces of the Pandrol Fastclip fastening terminals on the sole of the rails. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 4 (52), pp. 89-96 (In Russian).

УДК 539.3, 625.03

А. В. Сычева, А. А. Локтев, В. П. Сычев

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), г. Москва, Российская Федерация

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОЛЕСА И РЕЛЬСА ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ ОПЕРАТИВНОГО РАЗВЕРТЫВАНИЯ

Аннотация. На основе предложения формирования железнодорожного пути оперативного разворачивания без балласта с применением подрельсового основания с вязкоупругим элементом, принудительно наполняемым жидкостью Ньютона и укладываемым на неподготовленную поверхность без балласта, приводится пример расчета взаимодействия колеса и рельса с этим элементом на основе энергетического метода. Обосновывается возможность применения конструкции подрельсового устройства для оперативной укладки железнодорожного пути в сложных условиях на неподготовленную поверхность без балластного слоя пути. Рассматривается упругое динамическое воздействие колеса на рельс с начальными скоростями по подрельсовому основанию в виде короба с оболочками, уложенного на неподготовленную поверхность. Кинетическая энергия колеса, ударяющего о рельс, уложенный на предлагаемое подрельсовое основание, переходит не только в потенциальную энергию деформации, но и в энергию волновых и колебательных процессов. Для повышения точности решения задачи динамического воздействия учитывается переход части энергии в энергию местных деформаций в контактной области колеса с рельсом. В течение короткого промежутка времени после касания колеса с некоторой скоростью все элементы рельса приобретают некоторую скорость деформации. Предполагается, что в момент касания колеса рельс не изменяет свою первоначальную форму, а уменьшение скорости колеса происходит за счет местного деформирования контактирующих тел; данный период будет длиться до выравнивания скоростей двух тел, после чего начнется изменение формы срединной поверхности рельса, моделируемого балкой типа

Бернулли – Эйлера. Поскольку кинетическая энергия колеса переходит в потенциальную энергию изгиба, при расчете масса ударяемого тела учитывается как нагрузка колеса на рельс.

Ключевые слова: железнодорожный путь, подрельсовое основание, жидкость Ньютона, взаимодействие, упругость, закон Гука, энергия кинетическая.

Anna V. Sycheva, Aleksey A. Loktev, Vyacheslav P. Sychev

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, the Russian Federation

ENERGY APPROACH TO SOLVING THE PROBLEM OF INTERACTION BETWEEN A WHEEL AND A RAIL FOR AN OPERATIONAL DEPLOYMENT RAILWAY TRACK

Abstract. Based on the proposal for the formation of a railway track for operational deployment without ballast using a sub-rail base with a viscoelastic element forcedly filled with Newton's fluid and laid on an unprepared surface without ballast, an example of calculating the interaction of a wheel and a rail with this element based on the energy method is given. The possibility of using the design of the under-rail device for the operational laying of a railway track in difficult conditions on an unprepared surface without a track ballast layer is substantiated. The elastic dynamic impact of a wheel on a rail with initial speeds along a sub-rail base in the form of a box with shells laid on an unprepared surface is considered. The kinetic energy of a wheel hitting a rail laid on the proposed under-rail base passes not only into the potential energy of deformation, but also into the energy of wave and oscillatory processes. To improve the accuracy of solving the problem of dynamic impact, the transition of a part of the energy into the energy of local deformations in the contact area of the wheel with the rail is taken into account. Within a short period of time after touching the wheel at a certain speed, all elements of the rail acquire a certain strain rate. It is assumed that at the moment of contact with the wheel, the rail does not change its original shape, and the decrease in the speed of the wheel occurs due to local deformation of the materials of the contacting bodies; this period of impact will last until the velocities of the two bodies are equalized, after which the shape of the middle surface of the rail, modeled by a Bernoulli-Euler beam, will begin to change. Since the kinetic energy of the wheel is converted into the potential energy of bending, it is taken into account in the calculation to take into account the mass of the impacted body as the load of the wheel on the rail.

Keywords: railway track, under-rail foundation, Newton's fluid, interaction, elasticity, Hooke's law, kinetic energy.

Цель работы – обоснование конструкции подрельсового устройства для оперативной укладки железнодорожного пути в сложных условиях на неподготовленную поверхность без балластного слоя. При укладке железнодорожного пути оперативного развертывания [1] на неподготовленную поверхность отсутствует влияние вязкоупругого элемента в виде балласта на условия взаимодействия колеса и рельса. Рельсы на подрельсовом основании с демпфирующим элементом, уложенные на неподготовленной поверхности работают под воздействием поездной нагрузки иначе чем в традиционном железнодорожном пути [2]. Основным отличием такой транспортной системы от традиционного железнодорожного пути является то, что перемещения центра масс колесной пары по вертикали принимают существенные значения из-за упрощенных технологических процессов развертывания и установки элементов конструкции и отсутствия подготовительных земляных работ. Упомянутая особенность пути в свою очередь приводит к появлению дополнительных дефектов на поверхности катания как рельсов, так и колесных пар. На колесных парах образуются дефекты типа «ползун», которые приводят к дополнительным динамическим воздействиям высокой интенсивности при увеличении скорости экипажа, а следовательно, и угловой скорости пары.

В этом случае воздействие вертикально ударяющего на рельс массой G_0 колеса силой, эквивалентной весу G , может быть представлено для упругой системы (рисунок 1) в задаче ударного взаимодействия с грузом и в простой постановке можно представить в виде пружины с присоединенной точечной массой $M = G_0/g$ (рисунок 1, а), а массу груза, падающего с высоты h , – как $m = G/g$. Массой упругой конструкции пренебрегаем и считаем соударение тел с этими массами мгновенным ($\tau \rightarrow 0$) и идеально неупругим.

В момент контакта между этими телами развивается сила взаимодействия $P = P(t)$ и их контакт делится на два этапа:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2, \quad (1)$$

где τ_1 – фаза сближения центров этих тел за счет местных контактных деформаций; τ_2 – фаза их упругого отталкивания, после которой возникают второй отскок и вторичный удар падающего тела.

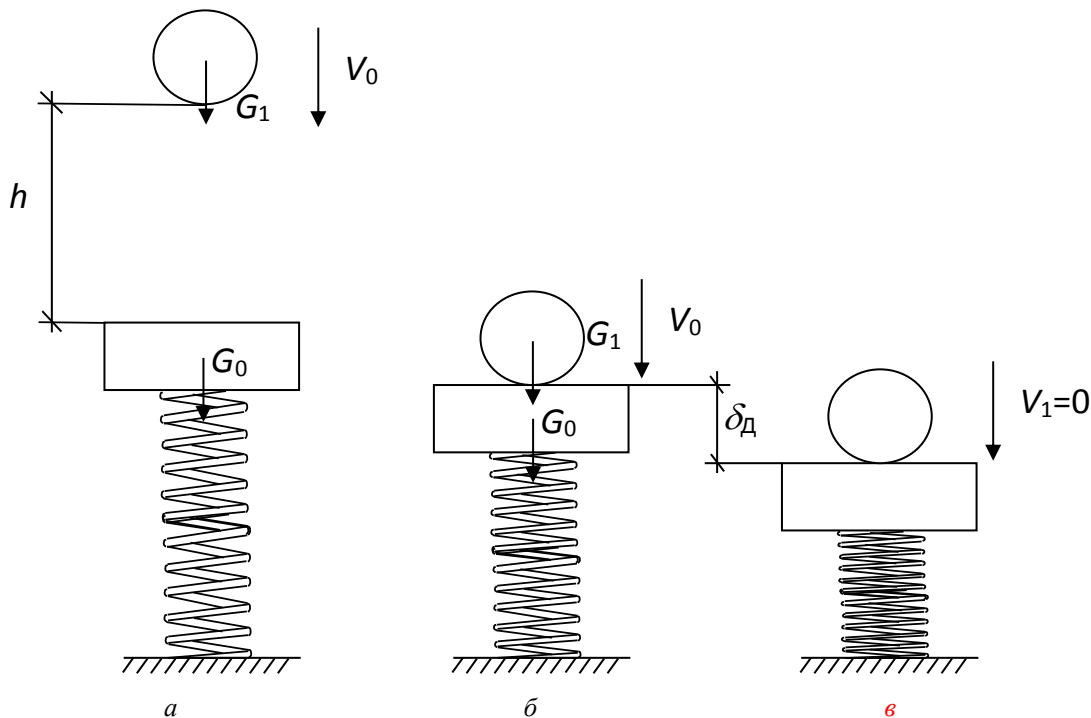


Рисунок 1 – Ударное воздействие колеса на рельс на упругой конструкции железнодорожного пути

Результатом удара будет возникновение движения ударяемой массы с конечной скоростью, а также изменение скорости падения груза на конечное значение. При значительных вертикальных перемещениях колеса можно считать, что кинетическая энергия колеса T полностью переходит в потенциальную энергию деформации рельса U_D . Наиболее простым способом решения этой задачи является энергетический метод [2], а именно:

$$T = U_D. \quad (2)$$

Подрельсовое основание для железнодорожного пути оперативного развертывания в упрощенном виде изображено на рисунке 2 и представляет собой короб с оболочками. Начальная вертикальная скорость динамического воздействия колеса на рельс в системе «колесо – рельс» зависит от угловой скорости колеса и его вертикального перемещения в отрыве от рельса, такой эффект может появиться как из-за галопирования, так и из-за дефектов в системе «колесо – рельс». Наличие оболочки в подрельсовом основании позволит создать эффект гистерезиса, обеспечить запаздывание восстановления прогиба рельса в зависимости от вязкости оболочки и за счет этого погасить ударные нагрузки P на рельс.

Рассматривается упругое динамическое воздействие колеса на рельс с начальными скоростями, определяемыми как

$$V \leq \sqrt{981 \cdot \delta_{ст}}, \quad (3)$$

где $\delta_{ст}$ – статическая деформация в нагруженном сечении, которая определяется в соответствии с законом Гука [3]. В случае растяжения или сжатия, т. е. при продольном ударе по рельсу, $\delta_{ст} = \frac{Ql}{EA}$; в случае изгиба, т. е. при поперечном нагружении рельса,

$$\delta_{ст} = \frac{Ql^3}{48EI}. \quad (4)$$

Нарастание деформаций при динамическом воздействии происходит быстро. Реакция рельса на динамическое действие колеса R_D с нагрузкой Q зависит от динамической деформации δ_D , которая увеличивается от нуля до максимальных значений [4, 5]. Если напряжения, появляющиеся вследствие деформаций δ_D , не превосходят предела пропорциональности, то поведение материала рельса подчиняется закону Гука:

$$\delta_D = \frac{R_D}{C_{pr}}. \quad (5)$$

Коэффициент пропорциональности C_{pr} остается таким же, как и в случае статического нагружения конструкции, т. е. $C_{pr} = \frac{EA}{l}$ при продольном ударе (статический аналог – растяжение-сжатие) или $C_{pr} = \frac{48EI}{l^3}$ при поперечном динамическом воздействии (статический аналог – изгиб).

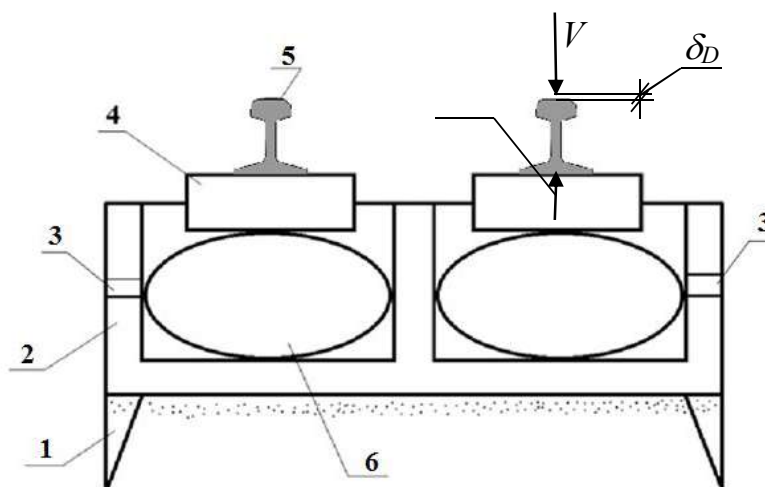


Рисунок 2 – Упрощенная схема подрельсового основания железнодорожного пути оперативного разворачивания: 1 – опоры закрепления в грунт; 2 – оболочка подрельсового основания; 3 – отверстие для впускного и выпускного клапанов; 4 – верхняя опорная плита; 5 – рельс; 6 – оболочка

Таким образом, в представленной постановке задачи предполагается, что колесо с дефектом ударяет о рельс условно равным падению груза с высоты H , связанной с радиусом колеса, дефектами и деформацией (перемещением) δ_D и тогда запас энергии будет равняться проделанной работе A_D

$$T = A_D = Q(H + \delta_D). \quad (6)$$

Из предположения, что закон Гука справедлив при динамическом нагружении [5 – 7] и постепенном росте нагрузки Q , напряжений и пропорциональных им деформаций, потенциальная энергия деформации рельса вычисляется по формуле:

$$U_D = \frac{Q}{2\delta_{ст}} \delta_D^2. \quad (7)$$

Приравнявая выражения (6) и (7) друг к другу, получим квадратное уравнение, из которого можно определить δ_D :

$$\delta_D = \delta_{ст} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_{ст}}} \right) = K_D \delta_{ст}, \quad (8)$$

где K_D – динамический коэффициент. Выразив высоту «падения» колеса через его скорость (линейную или угловую) в момент начала взаимодействия, получим:

$$K_D = \left(1 + \sqrt{1 + \frac{V^2}{g\delta_{ст}}} \right) \text{ или } K_D = \left(1 + \sqrt{1 + \frac{T_0}{U_{ст}}} \right), \quad (9)$$

где $T_0 = QH$ – энергия колеса в момент касания рельса. $U_{ст}$ – потенциальная энергия при статической деформации.

Выражение (8) может быть распространено на динамические напряжения и реакцию опоры рельса [8, 9]. Поскольку кинетическая энергия бьющего тела в реальности переходит не только в потенциальную энергию деформации, но и в тепловую энергию, в энергию неупругой деформации рельса, в энергию волновых и колебательных процессов, в энергию деформирования основания используемого короба, при точном решении задач динамического воздействия описанный подход имеет достаточно узкие рамки применения [10].

Однако не вся кинетическая энергия колеса переходит в потенциальную энергию ударяемого тела часть ее переходит в энергию местных деформаций в контактной области [11]. В течение короткого промежутка времени после касания колеса с некоторой скоростью все элементы рельса приобретают некоторую скорость деформации. Можно предположить, что в данный момент времени рельс не изменяет свою первоначальную форму, а уменьшение скорости колеса происходит за счет местного деформирования материалов контактирующих тел; данный период удара будет длиться до выравнивания скоростей двух тел V_1 , и только затем начнется изменение формы срединной поверхности рельса, моделируемого балкой типа Бернулли – Эйлера [12, 13]. Во второй период кинетическая энергия колеса переходит в потенциальную энергию изгиба. Для уточнения решения необходимо учесть массу ударяемого тела.

С учетом массы, сосредоточенной точно, формула (8) примет вид:

$$\delta_D = \delta_{ст} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_{ст}} \left(\frac{M}{M+m} \right)} \right). \quad (10)$$

Анализируя влияние массы колеса (здесь это не столько масса колесной пары, сколько масса вагона, приведенная в соответствие с геометрическими размерами к данной колесной оси), можно сделать вывод о том, что чем больше M , тем меньше динамический коэффициент; это связано с большими потерями кинетической энергии при неупругом ударе. Чтобы это подтвердить, достаточно сравнить энергию перед динамическим воздействием $T = mV_0^2/2$ и энергию T_0 после динамического воздействия. Их отношение представляется в виде:

$$\frac{T_0}{T} = \frac{m}{M+m} = \frac{1}{1+M/m} \leq 1. \quad (11)$$

Видно, что отношение (11) тем меньше, чем больше отношение M/m .

Пусть колесо с приведенным весом G бьет по консольному концу рельса, имеющего массу $m = \rho A$, где ρ – плотность материала стержня; A – площадь поперечного сечения. При ударе в таком рельсе возникает сложное движение в виде распространения волны изгибно-сдвиговых деформаций, переходящее в общие изгибные колебания рельса [14,15]. Для приближенного решения задачи заменим рельс с распределенной массой невесомым рельсом с одной сосредоточенной приведенной массой в точке удара M_{priv} :

$$M_{priv} = kml, \quad (12)$$

где ml – общая масса куска рельса; k – коэффициент приведения.

Коэффициент приведения определяется из условия равенства кинетической энергии распределенной массы рельса сосредоточенной приведенной массе M_{priv} :

$$\frac{M_{priv} \dot{f}^2}{2} = \frac{1}{2} \int_0^l \dot{w}^2 m dz, \quad (13)$$

где $\dot{f}$ и $\dot{w}$ – производные от прогибов по времени t , т. е. скорости движения соответствующих сечений рельса.

Предположим, что кривая $w(z)$ в каждый момент времени сохраняет неизменную форму, одинаковую с формой зависимости статических прогибов от силы P , действующей в направлении воздействия [9,16]. Применяя методы для определения прогиба от статической нагрузки [17], кривую $w(z)$ для консоли рельса найдем в виде:

$$w = \frac{1}{2} f \left(3 \frac{z^2}{l^2} - \frac{z^3}{l^3} \right). \quad (14)$$

Дифференцируя выражение (14) по t и подставляя в выражение (13), получим равенство

$$\frac{kml}{2} \dot{f}^2 = \frac{1}{2} \int_0^l m \dot{f}^2 \left(3 \frac{z^2}{l^2} - \frac{z^3}{l^3} \right) dz = \frac{33}{140} \frac{ml}{2} \dot{f}^2. \quad (15)$$

Отсюда для консоли получим $k = 33/140 = 0,236$. В работе [3] приводятся значения коэффициентов приведения массы для различных случаев закрепления стержней: для консольного и шарнирно-опертого при поперечном ударе и для консольного в случае продольного удара (это соответствует моменту взаимодействия колеса и стыка между рельсами), они соответственно равны 33/140, 17/35, 1/3.

Динамический коэффициент в случае распределенной массы определяется по формуле (9), в которой вместо величины M используется M_{priv} .

В начале первого этапа столкновения сила взаимодействия колеса как ударника и рельса равна силе падающего тела, т. е. $QV^2/2g$, в конце первого этапа сила действия колеса уменьшается до $QV_1^2/2g$. Исходя из предположения, что при ударе по середине рельса, лежащего на шпалах, сила действия колеса на рельс имеет такую же форму кривой, как и при статическом нагружении грузом Q [16, 18], упругая сила колеса в конце первого этапа взаимодействия равна $\frac{17\rho PIV_1^2}{70g}$.

Потерянная при динамическом воздействии кинетическая энергия вычислялась по формуле

$$T_{poter} = \frac{Q}{2g} \left[V^2 - V_1^2 \left(1 + \frac{17\rho Pl}{35Q} \right) \right], \quad (16)$$

а скорость

$$V_1 = \frac{V}{1 + \frac{17\rho Pl}{35Q}}. \quad (17)$$

Кинетическая энергия колеса, переходящая в потенциальную энергию изгиба балки, вычисляется согласно рекомендациям в работе [3] по выражению

$$T_{pot} = \frac{QV^2}{2g} \frac{1}{1 + \frac{17\rho Pl}{35Q}}. \quad (18)$$

Наибольшие динамические нормальные напряжения в рельсе вычислялись по формуле

$$\sigma_{D\max} = \sigma_{C\max} K_D = \sigma_{C\max} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{3EIQV^2\rho Pl}{glW^2\sigma_{C\max}^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{17\rho Pl}{35Q}}} \right]. \quad (19)$$

Разработана конструкция подрельсового устройства как жесткого короба с набором оболочек, заполненных газосодержащей смесью. При этом стенки короба ограничивают горизонтальные перемещения оболочек, создавая таким образом предварительное напряжение в конструкции основания рельсовых нитей в том числе и в вертикальном направлении [19]. При укладке короба на неподготовленную поверхность без балластного слоя обеспечивается возможность оперативного регулирования уровня рельсов и жесткости участка пути, преимущественно на переходных участках, примыкающих к искусственным сооружениям, и укладки железнодорожного пути без проведения большого объема строительно-монтажных работ.

Современные резинокордные материалы могут быть применены для изготовления накачиваемых оболочек и позволят выдержать внутреннее давление, которое в сочетании с нагрузкой на ось в 25 тс даст градиент абсолютных деформаций по вертикали, которые позволяют обосновывать применимость предлагаемой методики. Если ставить в соответствие традиционные типы конструкций железнодорожного пути и пути оперативного развертывания, реализованного пока только в виде имитационной модели, то можно предположить, что предлагаемый подход актуален для соответствующих скоростям движения транспортных средств со скоростями от 10 до 15 км/ч. Возникающие деформации во всех элементах предлагаемой конструкции железнодорожного пути должны быть проверены на выполнение условий совместности деформирования применительно к каждому конкретным случаям решения задачи оперативного развертывания пути. Предложенная в настоящем исследовании адаптация алгоритмов описания динамического поведения двух контактирующих тел позволила определить нормальные напряжения в рельсе при воздействии на него колесной пары.

Предлагаемый подход адаптирован для случая значительных вертикальных перемещений колесной пары по сравнению с существующими железнодорожными путями общего пользования, при этом упомянутые перемещения могут происходить и при отрыве поверхностей катания колеса и рельса. Максимальные значения динамических нормальных

напряжений в рельсе, уложенном на предлагаемое подрельсовое основание соответствуют нормативным значениям для традиционной конструкции железнодорожного пути при движении экипажа со скоростью до 20 км/ч.

Список литературы

1. Патент на изобретение № 2750544. Способ оперативного разворачивания железнодорожного пути и устройство подрельсового основания / Сычева А. В. – заявка 2020132129 от 29.09.2020 : опубликовано 29.06.2021. – Текст : непосредственный.
2. Schonberg W.P. Protecting spacecraft against orbital debris impact damage using composite materials. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2000, vol. 31, pp. 869-878.
3. Беляев, Н. М. Сопротивление материалов / Н. М. Беляев. – Москва : Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1965. – 884 с. – Текст : непосредственный.
4. Hess J. Rail expansion joints – the underestimated track work material. *Track-Bridge Interaction on High-Speed Railways*, Taylor & Francis Group, London, UK, 2009, pp. 149-164.
5. Иванченко, И. И. Динамика транспортных сооружений. Высокоскоростные подвижные, сейсмические и ударные нагрузки / И. И. Иванченко. – Москва, 2011. – 574 с. – Текст : непосредственный.
6. Matsumoto N., Asanuma K. Some experiences on track-bridge interaction in Japan. *Track-Bridge Interaction on High-Speed Railways*. Taylor & Francis Group, London, UK, 2009, pp. 80-97.
7. Fryba L. Dynamic of railway bridges. Academia, Praha, 1996, 330 p.
8. Барченков, А. Г. Динамический расчет автодорожных мостов / А. Г. Барченков. – Москва : Транспорт, 1976. – 200 с. – Текст : непосредственный.
9. Болотин, В. В. Динамическая устойчивость упругих систем / В. В. Болотин. – Москва : ГИТТЛ, 1956. – 600 с. – Текст : непосредственный.
10. Коган, А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом / А. Я. Коган. – Москва : Транспорт, 1997. – 325 с. – Текст : непосредственный.
11. Chen Y.H., Li C.Y. Dynamic response of elevated high-speed railway. *J. Bridge Eng., ASCE*, 2000, 5(2), pp. 124-130.
12. Kawatani M., Kim C.W. Computer simulation for dynamic wheel loads of heavy vehicles. *Struct. Eng. & Mech.*, 2001, 12(4), pp. 409-428.
13. Метод защиты сооружений от вибраций и сейсмических воздействий / Е. Н. Курбачкий, Е. Ю. Титов, О. А. Голосова, А. П. Косауров. – Текст : непосредственный // Строительство и реконструкция. – 2018. – № 1. – С. 55–67.
14. Loktev A.A. Non-elastic models of interaction of an impactor and an Uflyand-Mindlin plate. *International Journal of Engineering Science*, 2012, vol. 50, no. 1, pp. 46-55.
15. Loktev A.A. Dynamic contact of a spherical indenter and a prestressed orthotropic Uflyand-Mindlin plate. *Acta Mechanica*, 2011, vol. 222, no. 1-2, pp. 17-25.
16. Glusberg B., Savin A., Loktev A., Korolev V., Shishkina I., Alexandrova D., Loktev D. New lining with cushion for energy efficient railway turnouts. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 982, pp. 556-570.
17. Влияние высокочастотного нагружения на структуру малоуглеродистой стали / Е. А. Гридасова, П. А. Никифоров, А. А. Локтев [и др.]. – Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2017. – № 2. – С. 82–91.
18. Lyudagovsky A., Loktev A., Korolev V., Shishkina I., Alexandrova D., Geluh P., Loktev D. Energy efficiency of temperature distribution in electromagnetic welding of rolling stock parts. *E3S Web of Conferences. 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development*, SPbWOSCE 2018, 2019, pp. 01017.

19. Патент на изобретение № 2746554. Подрельсовое устройство железнодорожного пути и способ укладки по меньшей мере одного подрельсового устройства железнодорожного пути // Сычев В. П., Локтев А. А., Сычева А. В., Кузнецова Н. В., Сычев П. В. – № 2020124286 : заявлено 22.07.2020 : опубликовано 15.04.2021. – Текст : непосредственный.

References

1. Sycheva A.V. A method for the operational deployment of a railway track and a device for a sub-rail base, patent for invention 2750544 published on 29.06.2021 (In Russian).
2. Schonberg W.P. Protecting spacecraft against orbital debris impact damage using composite materials. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2000, vol. 31, pp. 869-878.
3. Belyaev N.M. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow, The main editorial office of the physics and mathematics literature of the publishing house «Nauka», 1965, 884 p. (In Russian).
4. Hess J. Rail expansion joints – the underestimated track work material. *Track-Bridge Interaction on High-Speed Railways*, Taylor & Francis Group, London, UK, 2009, pp. 149-164.
5. Ivanchenko I.I. *Dinamika transportnykh sooruzhenii. Vysokoskorostnye podvizhnye, seismicheskie i udarnye nagruzki* [Dynamics of transport facilities. High speed moving, seismic and shock loads]. Moscow, 2011, 574 p. (In Russian).
6. Matsumoto N., Asanuma K. Some experiences on track-bridge interaction in Japan. *Track-Bridge Interaction on High-Speed Railways*. Taylor & Francis Group, London, UK, 2009, pp. 80-97.
7. Fryba L. Dynamic of railway bridges. Academia, Praha, 1996, 330 p.
8. Barchenkov A.G. *Dinamicheskii raschet avtodorozhnykh mostov* [Dynamic calculation of road bridges]. Moscow, Transport Publ., 1976, 200 p. (In Russian).
9. Bolotin V.V. *Dinamicheskaya ustoychivost' uprugikh sistem* [Dynamic stability of elastic systems]. Moscow, GITTL Publ., 600 p. (In Russian).
10. Kogan A.Ya. *Dinamika puti i ego vzaimodeistvie s podvizhnym sostavom* [Dynamics of the track and its interaction with the rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1997, 325 p. (In Russian).
11. Chen Y.H., Li C.Y. Dynamic response of elevated high-speed railway. *J. Bridge Eng., ASCE*, 2000, 5(2), pp. 124-130.
12. Kawatani M., Kim C.W. Computer simulation for dynamic wheel loads of heavy vehicles. *Struct. Eng. & Mech.*, 2001, 12(4), pp. 409-428.
13. Kurbatsky E.N., Titov E.Yu., Golosova O.A., Kosaurov A.P. Method of protecting structures from vibrations and seismic impacts. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya – Building and reconstruction*, 2018, no. 1, pp. 55-67 (In Russian).
14. Loktev A.A. Non-elastic models of interaction of an impactor and an Uflyand-Mindlin plate. *International Journal of Engineering Science*, 2012, vol. 50, no. 1, pp. 46-55.
15. Loktev A.A. Dynamic contact of a spherical indenter and a prestressed orthotropic Uflyand-Mindlin plate. *Acta Mechanica*, 2011, vol. 222, no. 1-2, pp. 17-25.
16. Glusberg B., Savin A., Loktev A., Korolev V., Shishkina I., Alexandrova D., Loktev D. New lining with cushion for energy efficient railway turnouts. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 982, pp. 556-570.
17. Gridasova E.A., Nikiforov P.A., Loktev A.A., Grishin A.V., Suhorada A.E. Influence of high-frequency loading on the structure of low-carbon steel. *Nauka i tekhnika transporta – Science and technology of transport*, 2017, no. 2, pp. 82-91 (In Russian).
18. Lyudagovsky A., Loktev A., Korolev V., Shishkina I., Alexandrova D., Geluh P., Loktev D. Energy efficiency of temperature distribution in electromagnetic welding of rolling stock parts. *E3S Web of Conferences. 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development*, SPbWOSCE 2018, 2019, pp. 01017.

19. Sychev V.P., Loktev A.A., Sycheva A.V., Kuznetsova N.V., Sychev P.V. *Patent RU 2746554*, 15.04.2021 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сычева Анна Вячеславовна

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ПУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994, ГСП-4, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Здания и сооружения на транспорте», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (495) 649-19-34.

E-mail: anna@vpm770.ru

Локтев Алексей Алексеевич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ПУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994, ГСП-4, Российская Федерация.

Доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой «Транспортное строительство», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (495) 649-19-63.

E-mail: aaloktev@yandex.ru

Сычев Вячеслав Петрович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ПУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127994, ГСП-4, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Транспортное строительство», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (495) 649-19-63.

E-mail: vp@vpm770.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Сычева, А. В. Энергетический подход к решению задачи взаимодействия колеса и рельса для железнодорожного пути оперативного развертывания / А. В. Сычева, А. А. Локтев, В. П. Сычев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 4 (52). – С. 96 – 105.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sycheva Anna Vyacheslavovna

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Russian University of Transport» (RUT (MIIT)).

9, building 9, Obraztsova st., Moscow, 127994, GSP-4, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Buildings and structures on transport », RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 649-19-34.

E-mail: anna@vpm770.ru

Loktev Aleksey Alekseevich

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Russian University of Transport» (RUT (MIIT)).

9, building 9, Obraztsova st., Moscow, 127994, GSP-4, the Russian Federation.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, head of the Transport Construction Department, RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 649-19-63.

E-mail: aaloktev@yandex.ru

Sychev Vyacheslav Petrovich

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Russian University of Transport» (RUT (MIIT)).

9, building 9, Obraztsova st., Moscow, 127994, GSP-4, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the Transport Construction Department, RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 649-19-63.

E-mail: vp@vpm770.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sycheva A.V., Loktev A.A., Sychev V.P. Energy approach to solving the problem of interaction between a wheel and a rail for an operational deployment railway track. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 4 (52), pp. 96-105 (In Russian).

К. С. Лесов, А. Х. Абдужабаров, М. К. Кенжалиев

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ), г. Ташкент, Республика Узбекистан

ТЕХНОЛОГИЯ УСИЛЕНИЯ ОСНОВНОЙ ПЛОЩАДКИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА В ЗОНАХ РЕЛЬСОВЫХ СТЫКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕОТЕКСТИЛЯ

Аннотация. В данной статье приведены перспективные и широко используемые в транспортном строительстве способы усиления земляного полотна с применением геотекстиля в качестве армирующей и разделяющей прослойки. Предложено осуществить укладку покрытий из геотекстиля вручную в зонах рельсовых стыков уравнительного пролета бесстыкового пути по 6 – 10 шпал в каждую сторону от стыка, всего 12 – 20 шпал, где предусмотрено введение скоростного и высокоскоростного пассажирского движения.

Даны основные технические требования и ограничения по геометрическим размерам к геотекстилю при усилении основной площадки земляного полотна. Приведена технология укладки армирующих геотекстилей вручную при необходимости усиления небольшого участка железнодорожного пути при текущем обслуживании и ремонте железнодорожного пути. Описана последовательность выполнения основных работ по устройству покрытий из геотекстиля вручную в технологические «окна».

Экспериментально были проведены работы по устройству покрытий из геотекстиля вручную в зонах рельсовых стыков уравнительного пролета бесстыкового пути по 6 шпал в каждую сторону от стыка на железнодорожных участках Ташкентской дистанции пути (ПЧ-2).

Предложена конструкция по усилению основной площадки земляного полотна в зонах рельсовых стыков. Приведены основные требования по контролю качества выполнения строительных работ в конструкциях с применением прослойки из геотекстильных материалов.

Ключевые слова: рельсовый стык, основная площадка, земляное полотно, геотекстиль, усиление, конструкция, ремонт пути.

Kuvandik S. Lesov, Abdukhamid Kh. Abdujabarov, Mukhamedali K. Kenjaliyev

Tashkent State Transport University (TSTU), Tashkent, Republic of Uzbekistan

TECHNOLOGY FOR REINFORCING THE BASE OF THE SUBGRADE AT RAIL JOINTS USING GEOTEXTILES

Abstract. This article presents promising and widely used in transport construction methods of earth bed reinforcement with the use of geotextile as a reinforcing and separating layer. It was suggested to lay down geotextile coverings manually in the zones of rail joints of an equalizing span of a continuous-flow track by 6-10 sleepers in each side of the joint, in all, 12-20 sleepers where high-speed and high-speed passenger traffic is expected.

Basic technical requirements and restrictions on geometric dimensions for geotextile when reinforcing the main track bed are given. The technology of manual laying of reinforcing geotextiles when a small section of the railway track needs reinforcement during routine maintenance and repair of the railway track is given. The sequence of basic manual laying of geotextile coverings in the technological "windows" is described.

Experimentally conducted work on the device coatings of geotextile manually in the areas of rail joints equalizing span of permanent way for 6 sleepers on each side of the junction in the railway sections of the Tashkent railway station (PCH-2).

A design for reinforcement of the main ground in the areas of rail joints has been proposed. The basic requirements to quality control of construction works in structures with the use of a layer of geotextile materials are given.

Keywords: rail joint, main platform, subgrade, geotextile, reinforcement, construction, track repair.

В современных условиях строительства и эксплуатации железных дорог Узбекистана все возрастающую актуальность приобретает внедрение ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих продление срока эффективной службы технических средств. Развитие и совершенствование работы железнодорожного пути может быть обеспечено при эксплуатационной стабильности его несущего основания – земляного полотна, представляющего собой сложное техническое сооружение [1]. Сложной задачей при эксплуатации пути на железобетонных шпалах явилось обеспечение стабильности пути в зоне стыков уравнительных пролетов.

Воздействие подвижного состава на земляное полотно вызывает колебания (вибрации), которые приводят к временному снижению прочности грунтов. Степень снижения прочности увеличивается с повышением амплитуды и частоты вибрации. В свою очередь эти параметры увеличиваются с повышением скоростей движения поездов и ростом осевых нагрузок. При равных условиях эксплуатации интенсивность снижения прочности грунта резко увеличивается (в 1,5 – 2,0 раза) в зонах рельсовых стыков и неровностей пути. Степень снижения прочности грунта также больше на участках с железобетонными шпалами по сравнению с деревянными. Заметное влияние вибраций на снижение прочности грунта отмечается до глубины 1,5 – 2,0 м от верха балластной призмы.

Проблема обеспечения стабильности основной площадки особенно важна для линий, где предусматривается введение скоростного и высокоскоростного пассажирского движения. В данной проблеме основное внимание отечественных и зарубежных ученых уделяется совершенствованию конструкции и способов усиления земляного полотна, обеспечивающих его стабильность и устойчивость [2 – 4]. Между тем не менее важны задачи технологической надежности. Качество земляного полотна определяет уровень комфорта пользования железными дорогами. Долгий срок службы земляного полотна можно обеспечить, используя при строительстве современные инновационные технологии и материалы высокого качества [5].

Одним из перспективных и широко используемых в транспортном строительстве способов усиления земляного полотна стало применение различных видов геосинтетических материалов (геотекстили, геосетки, георешетки, геоячейки, геомембраны, геоматы, геокомпозиты различных видов). При выполнении работ по модернизации пути повышение стабильности пути обеспечивается применением геотекстиля. Геотекстили хорошо воспринимают высокие растягивающие усилия при небольшом удлинении и благодаря этому применяются при производстве земляных работ, текущем обслуживании и ремонте железнодорожного пути, когда необходимо устройство армирующей и разделяющей прослойки [6].

Усиление основной площадки земляного полотна с устройством защитных слоев геотекстиля. На отечественных железных дорогах общего пользования с грунтовым земляным полотном (более 99 % протяжения пути) верхнее строение пути с балластным слоем является единственной конструкцией, применяемой как по техническим, так и по экономическим показателям. От конструкции и качества балластного слоя зависят общее состояние железнодорожного пути, уровень допускаемых скоростей движения поездов, сроки службы всех элементов верхнего строения пути (рельсов, скреплений, шпал), затраты на текущее содержание пути и вся система его ремонтов.

На участках пути с неустойчивой основной площадкой земляного полотна при недостаточной толщине балластной подушки, а также при проникновении мелких частиц в нижние слои щебеночного балласта с образованием выплесков производят усиление с помощью либо широко применяемого геотекстиля, либо прослойки из пенополистирольных плит.

Покрытия из геотекстиля при усилении основной площадки земляного полотна устраиваются под балластным слоем с целью создания разделительного слоя. Разделительный слой из геотекстиля назначается при недостаточной прочности грунтов основной площадки земляного полотна или необходимости отделения очищенного слоя щебня от оставляемого ниже загрязненного балласта [7].

Покрытия устраиваются в ходе работ по глубокой очистке балластной призмы без снятия путевой решетки машинами, обеспечивающими необходимые глубину, ширину и ровность поверхности вырезки старого балласта, а также вручную при необходимости усиления небольшого участка железнодорожного пути. Укладка покрытий из геотекстиля вручную осуществляется в зонах рельсовых стыков уравнильного пролета бесстыкового пути по 6 – 10 шпал в каждую сторону от стыка, всего 12 – 20 шпал. Данное количество шпал обусловлено

распределением напряжений на основной площадке в зоне стыка рельсов [8]. После шестой шпалы напряжения на основной площадке постепенно стабилизируются в зависимости от скоростей движения и величины нагрузок от подвижного состава (рисунок 1).

Состояние пути, характеризуемое положением рельсовой колеи по уровню, в продольном профиле и плане, в значительной мере зависит от стабильности земляного полотна и балластного слоя. Влияние подвижной нагрузки на несущую способность подшпального основания особенно неблагоприятно сказывается на участках с интенсивным загрязнением пути.

Из-за снижения несущей способности подетального основания вследствие загрязнения щебня и засорителей в балласте возрастает интенсивность расстройств пути по уровню и в продольном профиле, особенно в местах с повышенным динамическим воздействием (уравнительные пролеты, стрелочные переводы, сварные стыки). Максимальные динамические воздействия наблюдаются в пределах 3 – 5 м в каждую сторону от стыка.

Геотекстиль должен иметь достаточную прочность на разрыв и продавливание щебнем, а по геометрическим размерам рулон геотекстиля должен иметь ширину 4,0 – 4,5 м (ширина покрытия), диаметр не более 38 см. Наилучшим образом поставленным условиям отвечает термоупрочненный геотекстиль из полипропилена (волокнистый нетканый материал из расплава полимеров).

К укладке допускается геотекстиль, который прошел сертификационные испытания и по всем показателям удовлетворяет требованиям, приведенным в таблице 1.

Таблица 1 – Требования к геотекстилю

№ п/п	Показатель	Размерность	Величина
1	Поверхностная плотность	г/м2	≥ 280 (250)*)
2	Механические свойства		
2.1	Разрывная нагрузка на полосу шириной 5 см в направлении минимального сопротивления	кН	≥ 0,8 (0,6)*)
2.2	Относительное удлинение при разрыве	%	< 80
2.3	Прочность при продавливании шариком	кН	≥ 1,2 (1,0)*)
3	Гидравлические свойства		
3.1	Коэффициент фильтрации через материал при давлении 200 кПа	м/с	≥ 1×10-4
3.2	Действующий диаметр пор	мкм	≤ 80
4	Химическая и биологическая устойчивость		
4.1	Не поддаваться воздействию	Кислот, щелочей и бактерий природного происхождения	
4.2	Выдерживать воздействие прямых солнечных лучей без снижения прочности	В течение не менее месяца	
5	Геометрические размеры		
	Ширина рулона	м	4,0 – 4,5
	Длина в рулоне	м	≥ 50
	Диаметр рулона	см	≤ 38

*) В скобках указаны прочностные характеристики материалов, которые допускаются к применению при укладке покрытий на подушку из песка, песчано-гравийной смеси или асбеста, а также при устройстве сверху защитного слоя.

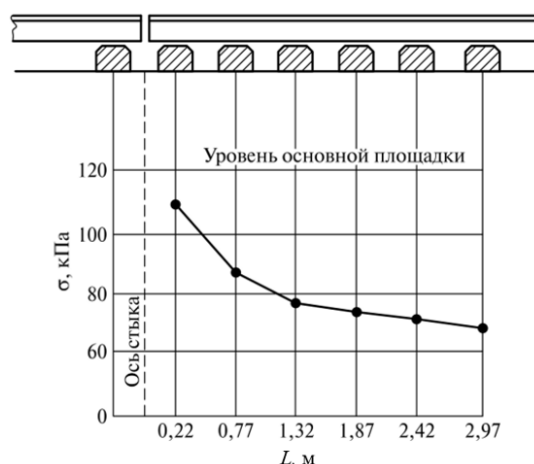


Рисунок 1 – Распределение напряжений на основной площадке в зоне стыка рельсов

Технология укладки армирующих геотекстилей. Устройство покрытий из геотекстиля без снятия рельсошпальной решетки производится при работе щебнеочистительных машин, а также вручную при необходимости усиления небольшого участка железнодорожного пути (в зонах рельсовых стыков уравнительного пролета бесстыкового пути по 6 – 10 шпал в каждую сторону от стыка или 12 – 20 шпал всего) (рисунок 2). Они могут выполняться как в комплексе с усиленным капитальным или средним ремонтом пути, так и при текущем обслуживании и ремонте железнодорожного пути.

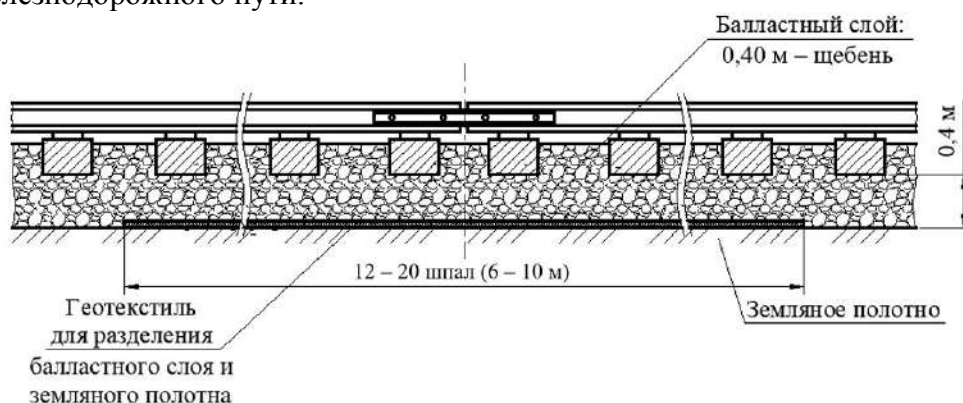


Рисунок 2 – Продольный профиль железнодорожного пути с укладкой геотекстиля на основную площадку

При необходимости усиления небольшого участка железнодорожного пути в зонах рельсовых стыков уравнительного пролета бесстыкового пути по 6 – 10 шпал в каждую сторону от стыка или 12 – 20 шпал всего работы выполняются вручную бригадой из 15 – 20 монтеров пути. В результате среза старого балласта должны обеспечиваться ровная поверхность на заданной глубине под шпалами с необходимым поперечным уклоном, на которую укладываются полимерные материалы.

Основные работы по устройству покрытий вручную выполняют в технологические «окна» продолжительностью 1,5 – 2 часа. При проведении работ на двухпутных участках возможна их организация с закрытием движения поездов по одному из путей.

После подготовки основной площадки на нее застилают геотекстиль, проверяют его ровность и отсутствие складок, а также симметричное расположение геотекстиля относительно оси пути и рельсового стыка.

Засыпку балластного слоя необходимо осуществлять только чистым щебнем соответствующей фракции. Начинать засыпку необходимо от стыка и постепенно отдаляться, заполняя в первую очередь зоны под рельсовыми нитями. После заполнения балластного слоя выполняются подблочные работы, выправка и рихтовка пути.

Покрытия из геотекстиля укладываются на глубину не менее 40 см от нижней постели шпал в сечении под внутренней нитью с уклоном 0,04 в полевую сторону (рисунок 3). Срезка обочин ниже покрытий для отвода с них воды обязательна. Непосредственно на покрытия допускается укладывать очищенный щебень.



Рисунок 3 – Поперечный профиль земляного полотна железной дороги с укладкой геотекстиля на основную площадку

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Работы по устройству покрытий из геотекстиля вручную экспериментально были проведены в зонах рельсовых стыков уравнительного пролета бесстыкового пути по шесть шпал в каждую сторону от стыка на железнодорожных участках Ташкентской дистанции пути (ПЧ-2). Фотоматериалы выполненных работ приведены на рисунке 4.

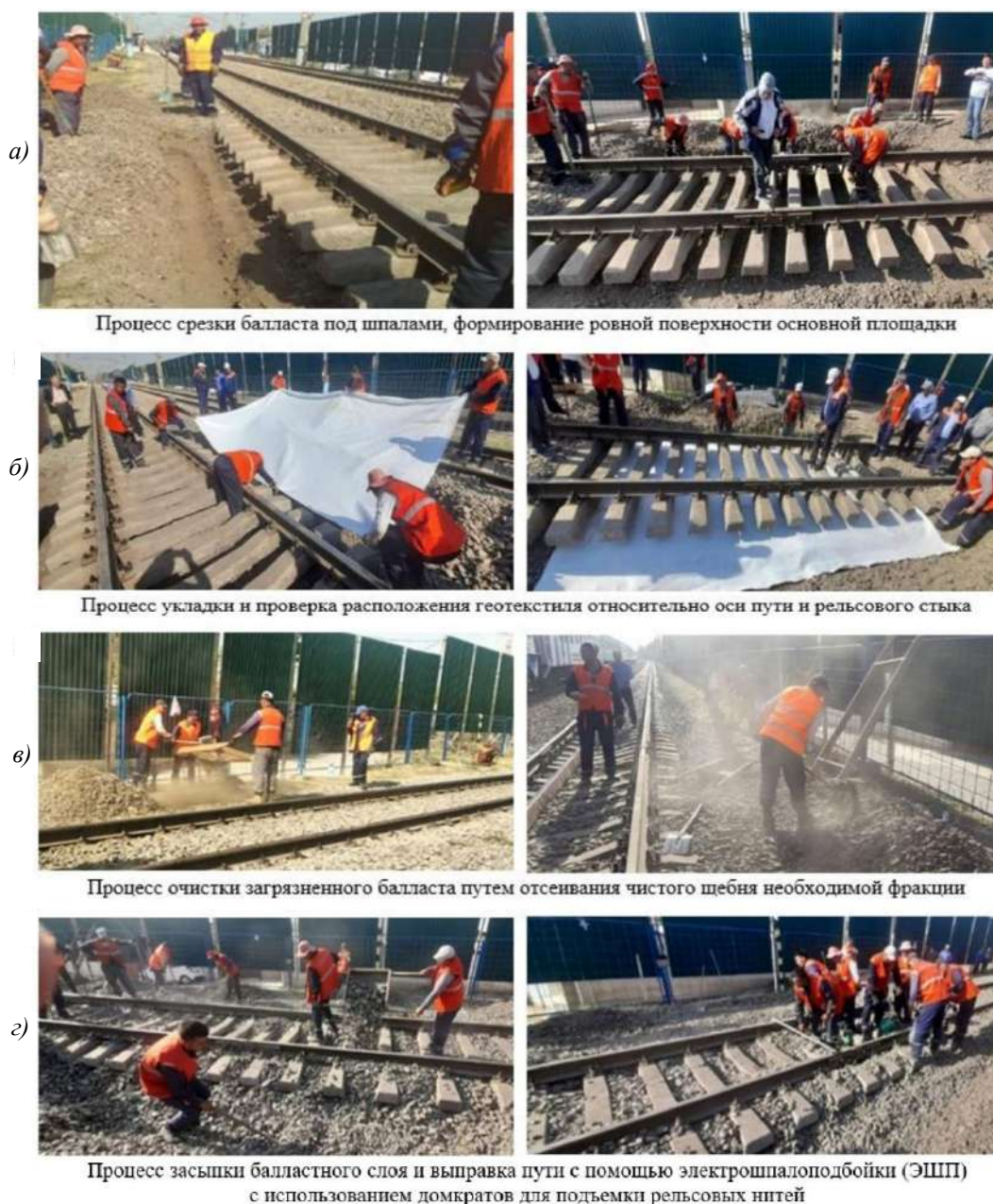


Рисунок 4 – Фотоматериалы работ по устройству покрытий из геотекстиля вручную в зонах рельсовых стыков уравнительного пролета бесстыкового пути по шесть шпал в каждую сторону от стыка

Этапами проведения экспериментов определены:

изучение и анализ района проведения эксперимента и рациональных способов усиления земляного полотна железных дорог;

проведение экспериментов и мониторинг технологических параметров земляного полотна экспериментального участка;

проведение экспериментов и разработка методики по усилению основной площадки с применением перспективных материалов для обеспечения технического состояния земляного полотна железных дорог;

разработка практических рекомендаций по технологии усиления земляного полотна скоростных и высокоскоростных железных дорог;

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

разработка рекомендаций по выбору ресурсосберегающих конструкций усиления земляного полотна.

Работы по устройству покрытий из геотекстиля вручную для небольшого участка железнодорожного пути в зонах рельсовых стыков уравнительного пролета бесстыкового пути по 6 – 10 шпал в каждую сторону от стыка или 12 – 20 шпал всего подразделяются на подготовительные, основные и отделочные.

В подготовительный период перед устройством покрытия из геотекстиля производятся уборка материалов и предметов за пределы ведения работ, срезка балласта с обочин и между шпалами до требуемой глубины, очистка загрязненного балласта путем отсеивания чистого щебня необходимой фракции, подготовка полимерных материалов и балласта к укладке. При этом необходимо выдать предупреждение об ограничении скорости движения поездов.

Основные работы выполняются в «окно» в следующей последовательности:

срезка балласта под шпалами, формирование ровной поверхности основной площадки;

укладка геотекстиля, проверка отсутствия складок, а также симметричного расположения геотекстиля относительно оси пути и рельсового стыка;

засыпка балластного слоя чистым щебнем, начиная от стыка, в первую очередь засыпаются зоны под рельсами;

выправка пути с помощью ЭШП с использованием домкратов для подъёмки рельсовых нитей; оправка балластной призмы и формирование ее плеча.

После окончания основных работ, выполняемых в технологические «окна», и проверки состояния пути скорости движения первых одного – двух поездов на всем участке работ устанавливаются 25 км/ч, а последующих не менее 60 км/ч.

В отделочные работы входят производство необходимой чистовой выправки пути с постановкой его в проектное положение, постановка сигналов, сигнальных и путевых знаков, отделка балластной призмы и обочин земляного полотна. Технологические показатели производства работ указаны в таблице 2.

Таблица 2 – Технологические показатели производства работ

№ п/п	Вид работ	Период проведения работ	Время на производство работ, мин.	Кол-во монтеров пути, чел.
1	Уборка материалов и предметов за пределы ведения работ	Подготовительный	10	4
2	Срезка балласта с обочин и между шпалами до требуемой глубины		60	10
3	Очистка загрязненного балласта путем отсеивания чистого щебня необходимой фракции		60	4
4	Подготовка полимерных материалов и балласта к укладке		20	2
5	Срезка балласта под шпалами, формирование ровной поверхности основной площадки	Основной период, работы в «окно»	40	15
6	Укладка геотекстиля, проверка отсутствия складок и симметричного расположения геотекстиля относительно оси пути и рельсового стыка		5	4
7	Засыпка балластного слоя чистым щебнем, начиная от стыка, засыпаются в первую очередь зоны под рельсами		40	15
8	Выправка пути с помощью ЭШП с использованием домкратов для подъёмки рельсовых нитей		20	4
9	Оправка балластной призмы и формирование ее плеча		15	10
10	Производство необходимой чистовой выправки пути с постановкой его в проектное положение	Отделочные работы	20	6
11	Постановка сигналов, сигнальных и путевых знаков		20	4
12	Отделка балластной призмы и обочин земляного полотна		20	4

При выполнении работ по устройству покрытий из геотекстиля необходимо соблюдать требования Правил технической эксплуатации железных дорог, Инструкции по сигнализации на железных дорогах, Инструкции по обеспечению безопасности движения поездов при производстве путевых работ, Инструкции о порядке предоставления и использования «окон» для ремонтных и строительно-монтажных работ на железных дорогах, Инструкции по текущему содержанию железнодорожного пути, Правил по охране труда при содержании и ремонте железнодорожного пути и сооружений [9 – 14].

Контроль качества выполнения строительных работ. Контроль качества выполнения строительных работ в конструкциях с применением прокладок из геотекстильных материалов производится по действующим техническим нормативам ШНК 3.06.03–21 «Автомобильные дороги» [15]. К общим требованиям указанных нормативов добавляются требования по качеству устройства прослоек из геотекстильных материалов, а именно:

качество применяемых материалов;

ровность раскладки применяемых материалов, исключение образования складок, волн, пузырей;

качество заделки мест, где имели место разрывы или другие нарушения сплошности в уложенных полотнищах геотекстиля;

ширина перекрытия смежных полотен и качество стыковки полотен вдоль участка укладки;

шаг и прочность соединения полотен скобами в местах примыкания.

Приемку соответствующих конструктивных слоев на основной площадке железной дороги с устроенной по ним прокладкой из геотекстильной ткани производят путем наружного осмотра с составлением акта приемки.

Предложено применение геотекстиля в качестве армирующей и разделяющей прослойки при усилении основной площадки земляного полотна при текущем обслуживании и ремонте железнодорожного пути в зонах рельсовых стыков уравнительного пролета бесстыкового пути.

Предусмотрено осуществить укладку покрытий из геотекстиля вручную в зонах рельсовых стыков уравнительного пролета бесстыкового пути по 6 – 10 шпал в каждую сторону от стыка, всего 12 – 20 шпал.

Приведена технология укладки армирующих геотекстилей вручную для усиления небольшого участка железнодорожного пути при текущем обслуживании и ремонте железнодорожного пути в технологические «окна».

Экспериментально были проведены работы по устройству покрытий из геотекстиля вручную в зонах рельсовых стыков уравнительного пролета бесстыкового пути по шесть шпал в каждую сторону от стыка на 12 железнодорожных участках Ташкентской дистанции пути (ПЧ-2). На экспериментальных участках высота насыпи колеблется от двух до шести метров, грунты в основном супеси и суглинки.

Список литературы

1. Ашпиз, Е. С. Мониторинг земляного полотна при эксплуатации железных дорог : монография / Е. С. Ашпиз. – Москва : Путь-пресс, 2002. – 112 с. – Текст : непосредственный.
2. Грицык, В. И. Противодеформационные конструкции земляного полотна дорог : учебное пособие / В. И. Грицык. – Москва : Маршрут, 2003. – 96 с. – Текст : непосредственный.
3. Анализ способов повышения несущей способности грунтов основной площадки земляного полотна / Л. С. Блажко, С. Н. Чуян, В. Б. Захаров, Е. В. Черняев. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2016. – № 3 (48). – С. 328–336.
4. Lesov K.S., Kenjaliyev M.K., Mavlanov A.Kh., Tadjibaev Sh.M. Stability of the embankment of fine sand reinforced with geosynthetic materials. *E3S Web of Conferences*. 2021, no. 264, pp. 02011. DOI: 10.1051/e3sconf/202126402011.

5. Технические указания на применение пенополистирола и геотекстиля при усилении основной площадки земляного полотна без снятия рельсошпальной решетки. – Москва : МПС, 1999. – 38 с. – Текст : непосредственный.
6. Кенжалиев, М. К. Методы усиления земляного полотна железных дорог / М. К. Кенжалиев. – Текст : непосредственный // *Scientific progress*. – 2022. – Т. 3. – № 1. – С. 1044–1050.
7. Расчет устойчивости насыпи и укрепление откосов земляного полотна с использованием геосинтетических материалов / К. С. Лесов, Ш. А. Таджибаев, А. Х. Мавланов, М. К. Кенжалиев. – Текст : непосредственный // *Транспорт шелкового пути*. – 2021. – № 1. – С. 78–83.
8. Железнодорожный путь : учебник / Е. С. Ашпиз, А. И. Гасанов, Б. Э. Глюзберг [и др.]. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2013. – 544 с. – Текст : непосредственный.
9. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. – Москва : ООО «Техинформ»; ООО «Центр «Транспорт», 2012. – 520 с. – Текст : непосредственный.
10. Инструкция по сигнализации на железных дорогах Российской Федерации. – Москва : Транспорт, 2000. – 128 с. – Текст : непосредственный.
11. Инструкция по обеспечению безопасности движения поездов при производстве путевых работ. – Москва : Инфра-М, 2021. – 209 с. – Текст : непосредственный.
12. Инструкция о порядке предоставления и использования «окон» для ремонтных и строительно-монтажных работ на железных дорогах Российской Федерации. – Москва : ООО «Техинформ», 2008. – 76 с. – Текст : непосредственный.
13. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути. – Москва : ООО «Техинформ», 2016. – 286 с. – Текст : непосредственный.
14. Правила по охране труда при содержании и ремонте железнодорожного пути и сооружений. – Москва : Моркнига, 2019. – 100 с. – Текст : непосредственный.
15. Градостроительные нормы и правила ШНК 3.06.03-08. Автомобильные дороги. – Ташкент : Министерство строительства Республики Узбекистан, 2021. – 130 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Ashpiz E.S. *Monitoring zemljanogo polotna pri jekspluatacii zheleznyh dorog* [Earth bed monitoring in railway operation]. Moscow, Put'-press Publ., 2002, 112 p. (In Russian).
2. Grityk V.I. *Protivodeformacionnye konstrukcii zemljanogo polotna dorog* [Anti-deformation structures of an earthen bed of roads]. Moscow, Marshrut Publ., 2003, 96 p. (In Russian).
3. Blazhko L.S., Chujan S.N., Zaharov V.B., Chernjaev E.V. Analysis of methods for increasing soil bearing capacity of supporting subgrade. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia – Proceedings of Petersburg Transport University*, 2016, no. 3 (48), pp. 328-336. (In Russian).
4. Lesov K.S., Kenjaliyev M.K., Mavlanov A.Kh., Tadjibaev Sh.M. Stability of the embankment of fine sand reinforced with geosynthetic materials. *E3S Web of Conferences*. 2021, no. 264, pp. 02011. DOI: 10.1051/e3sconf/202126402011.
5. Technical instructions for use of foam polystyrene and geotextile in reinforcement of main ground without removal of rail sleepers. Moscow, MPS Publ., 1999. 38 p. (In Russian).
6. Kenzhaliev M.K. Methods of reinforcing the railway earth bed. *Scientific progress*, 2022, vol. 3, no. 1, pp. 1044-1050. (In Russian).
7. Lesov K.S. Tadjibaev Sh.A., Mavlanov A.H., Kenzhaliev M.K. Calculation of the stability of the embankment and strengthening of the slopes of the roadbed using geosynthetic materials. *Transport shelkovogo puti – Transport of the Silk Road*, 2021, no. 1, pp. 78-83. (In Russian).

8. Ashpiz E.S., Hasanov A.I., Gluzberg B. E. and others. *Zheleznodorozhnyj put: uchebnik* [Railway track: textbook]. Moscow, Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport Publ., 2013, 544 p. (In Russian).

9. Rules for Technical Operation of Railways of the Russian Federation. Moscow, Tehinform; Transport Publ., 2012, 520 p. (In Russian).

10. Instruction on signalling on railways of Russian Federation. Moscow, Transport Publ., 2000, 128 p. (In Russian).

11. Instruction on train traffic safety during track works. Moscow, Infra-M Publ., 2021, 209 p. (In Russian).

12. Instruction on the order of provision and use of «windows» for repair and construction works on the railways of the Russian Federation. Moscow, Tehinform Publ., 2008, 76 p. (In Russian).

13. Instruction on current maintenance of railway track. Moscow, Tehinform Publ., 2016, 286 p. (In Russian).

14. Occupational safety rules for maintenance and repair of railway track and structures. Moscow, Morkniga Publ., 2019, 100 p. (In Russian).

15. Urban Planning Norms and Rules ShNK 3.06.03-08. Highways. Tashkent, Ministry of Construction of the Republic of Uzbekistan Publ., 2021, 130 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лесов Кувандик Сагинович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Темирйулчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерия железных дорог», ТГТУ.

Тел.: +99 (871) 299-03-80.

E-mail: kuvandikl@mail.ru

Абдужабаров Абдухамид Халилович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Темирйулчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Инженерия железных дорог», ТГТУ.

Тел.: +99 (871) 299-02-73.

E-mail: mkenjaliyev@mail.ru

Кенжалиев Мухамедали Казбек угли

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Темирйулчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Базовый докторант кафедры «Инженерия железных дорог», ТГТУ.

Тел.: +99 (871) 299-03-52.

E-mail: mkenjaliyev@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Лесов, К. С. Технология усиления основной площадки земляного полотна в зонах рельсовых стыков с применением геотекстиля / К. С. Лесов, А. Х. Абдужабаров, М. К. Кенжалиев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 4 (52). – С. 106 – 114.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lesov Kuvandik Saginovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Temiryo'Ichilar st., Tashkent, 100167, Republic of Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Railway engineering», TSTU.

Phone: +99 (871) 299-03-80.

E-mail: kuvandikl@mail.ru

Abdujabarov Abdukhmid Khalilovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Temiryo'Ichilar st., Tashkent, 100167, Republic of Uzbekistan.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «Railway engineering», TSTU.

Phone: +99 (871) 299-02-73.

E-mail: mkenjaliyev@mail.ru

Kenjaliyev Mukhamedali Kazbek og'li

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Temiryo'Ichilar st., Tashkent, 100167, Republic of Uzbekistan.

Doctoral student of the department «Railway engineering», TSTU.

Phone: +99 (871) 299-03-52.

E-mail: mkenjaliyev@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Lesov K.S., Abdujabarov A.Kh., Kenjaliyev M.K. Technology for reinforcing the base of the subgrade at rail joints using geotextiles. Journal of Transsib Railway Studies, 2022, no. 4 (52), pp. 106-114 (In Russian).

К. В. Шапетько, В. В. Третьяков, И. Н. Максимов

ООО «Центр инновационного развития СТМ», г. Екатеринбург, Российская Федерация

КОМФОРТ ПРОЕЗДА ПассажиРОВ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУТИ И ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. В статье рассмотрены вопрос взаимодействия пути и подвижного состава и связь факторов, оказывающих влияние на комфорт проезда пассажиров. Приведены примеры показателей комфорта проезда пассажиров и рассмотрены возможные причины возникновения в пути отступлений геометрии рельсовой колеи. Проанализированы результаты опытных поездок и приведены данные, получаемые штатными средствами диагностики. Построены натурные неровности в плане и профиле на анализируемых участках, где были превышены показатели комфорта. Приведенные данные демонстрируют применение дополнительного индикатора взаимодействия пути и подвижного состава, который целесообразно учитывать для выявления отступления геометрии рельсовой колеи при проведении работ по текущему содержанию пути, поскольку в пути остаются неровности или сочетания неровностей, оказывающие повышенное динамическое воздействие. Стоит отметить, что в настоящее время не все неровности регистрируются, а соответственно такие неровности не устраняются. Используя показатель «комфорта проезда пассажира», рассчитываемый по ускорениям, возникающим в элементах подвижного состава, можно определять места и отступления геометрии рельсовой колеи, влияющие на динамические характеристики подвижного состава, вызывающие повышенные показатели комфорта.

Ключевые слова: ускорение на буксе, взаимодействие пути и подвижного состава, непогашенное ускорение, безопасность движения, комфорт проезда пассажиров, неровности в плане и профиле.

Kirill V. Shapetko, Vasily V. Tretyakov, Igor N. Maksimov

STM Center of Innovation Development, Ekaterinburg, the Russian Federation

PASSENGER COMFORT AS A TRACK AND ROLLING STOCK INTERACTION INDICATOR

Abstract. The article deals with the issue of the interaction of the track and rolling stock and the relationship of factors affecting the comfort of passengers. Examples of passenger comfort indicators are given and possible causes of deviations in the track geometry are considered. The results of experimental trips are analyzed and the data obtained by standard diagnostic tools are presented. Natural irregularities in the plan and profile were constructed in the analyzed areas where comfort indicators were exceeded. The data presented demonstrate the use of an additional indicator of the interaction of the track and rolling stock, which is advisable to take into account to identify deviations in the geometry of the track gauge when carrying out work on the current maintenance of the track, since there are irregularities or combinations of irregularities in the track that have an increased dynamic impact. It is worth noting that currently not all irregularities are registered, and accordingly such irregularities are not eliminated. Using the «passenger comfort» indicator calculated from the accelerations occurring in the elements of the rolling stock, it is possible to determine the places and deviations of the geometry of the track gauge that affect the dynamic characteristics of the rolling stock, causing increased comfort indicators.

Keywords: acceleration on the axle box, the interaction of the track and rolling stock, outstanding acceleration, traffic safety, passenger comfort, irregularities in the plan and profile.

Одним из направлений совершенствования железнодорожного транспорта является создание нового подвижного состава, что приводит к увеличению скоростей движения, а это в свою очередь акцентирует внимание на вопросах взаимодействия пути и подвижного состава.

Поскольку на практике «идеальных» условий для взаимодействия пути и подвижного состава не существует (геометрия пути, неровности поверхности катания колес и т. д.), в процессе эксплуатации возникают колебания и динамические составляющие сил, зависящих от технического состояния пути и подвижного состава [1].

Динамика подвижного состава – процесс появления упругих, инерциальных и диссипативных сил и перемещений составных элементов подвижного состава, возникающих

вследствие взаимодействия его ходовых частей и рельсового пути. Обеспечение безопасности движения, бесперебойность и рентабельность работы железнодорожного транспорта существенно зависят от конструкции и состояния пути и подвижного состава.

В процессе движения под воздействием колес подвижного состава в верхнем строении пути непрерывно накапливаются остаточные деформации. Интенсивность их накопления различна на разных участках пути, что приводит к появлению в пути неровностей, вызывающих колебания подвижного состава [2].

Как правило, в процессе эксплуатации неровности рельсовых нитей в плане и профиле представляют собой волнообразные кривые, амплитуды и длины которых изменяются по длине пути, что с учетом особенностей подвижного состава вызывает дополнительные колебания при его движении (рисунок 1). В качестве примера на рисунке 1 приведены данные ускорений в горизонтальном поперечном направлении. Приведенные данные показывают, что длина волны составляет 17 – 21 м, соответствует длине волны извилистого движения грузового вагона [1], что в свою очередь подтверждает гипотезу влияния грузового движения на динамику пассажирского подвижного состава.

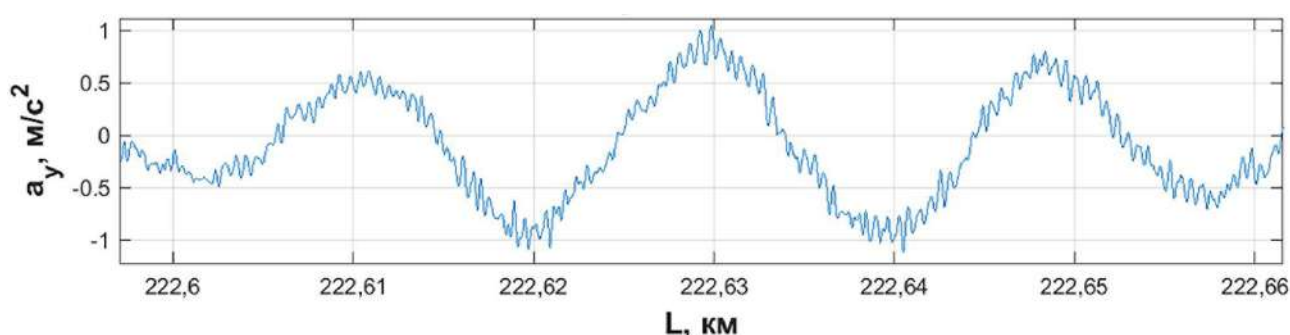


Рисунок 1 – Пример колебаний в горизонтальной плоскости

При движении подвижного состава по пути с неровностями в плане, описываемыми кривой (см. рисунок 1), ускорение кузова состоит из постоянной составляющей, определяемой возвышением наружного рельса, радиусом кривой, скоростью движения и динамической составляющей, зависящей от геометрии рельсовой колеи. Как отмечалось ранее [3], на комфортабельность пассажиров прежде всего влияет плавность очертания положения рельсовых нитей в плане и профиле. Следует отметить, что колебания вагона также присутствуют в прямых участках пути, при этом амплитуды колебаний достигают $0,7 - 0,8 \text{ м/с}^2$ при их периодичности $\sim 1 \text{ Гц}$.

В настоящее время мобильные средства диагностики (МСД) являются основными техническими средствами контроля содержания геометрии рельсовой колеи (ГРК). По результатам проходов МСД определяются отступления и неисправности рельсовой колеи в плане и профиле, на основании чего осуществляется текущее содержание пути и назначаются ремонтные работы.

На сети железных дорог ОАО «РЖД» преимущественно организовано смешанное движение – эксплуатация по одному пути как пассажирского, так и грузового подвижного состава. Значительная доля грузового парка на участках смешанного движения оказывает влияние на формирование неровностей ГРК, вызывающих интенсивное извилистое движение [4] пассажирского подвижного состава. Известно [5], что увеличение осевых нагрузок в 1,5 раза приводит к увеличению осадок пути в два раза. Поскольку с 2013 г. унифицированная осевая нагрузка на сети железных дорог составляет 245,2 кН [6], можно предположить, что на участках с интенсивным грузовым движением ухудшение уровня комфорта вызвано деформациями пути, возникающими в процессе их эксплуатации [7].

В настоящее время контроль за техническим состоянием железнодорожного пути и его элементов организован таким образом, чтобы исключить угрожающие безопасности движения нарушения, нормируемые действующей инструкцией [8]. При этом в пути остаются

отклонения рельсовой колеи, которые по отдельности не влияют на безопасность движения, но их сочетания могут привести к нарушениям безопасности движения [7], а по отдельности могут влиять на комфорт проезда пассажиров. К таким отклонениям можно отнести, например, подуклонку рельсов, неровности ГРК в плане и профиле длиной более 20 м.

Исследования [9] показали, что при проходе колеса по изолированной неровности возникают дополнительные силы, что при высоких скоростях движения приводит к увеличению динамического взаимодействия пути и подвижного состава. Неровности такого типа [10] оказывают воздействие как на подвижной состав, так и на земляное полотно, это в свою очередь приводит к неравноупругости пути, увеличению уровня вибраций всех взаимодействующих элементов, что существенно сказывается на неподрессоренных частях подвижного состава (рисунок 2). Нужно различать вертикальные и горизонтальные силы. К вертикальным относятся силы, действующие в основном за счет таких составляющих, как статическая нагрузка от колеса на рельс и динамическая нагрузка от колебаний наддрессорной части экипажа.

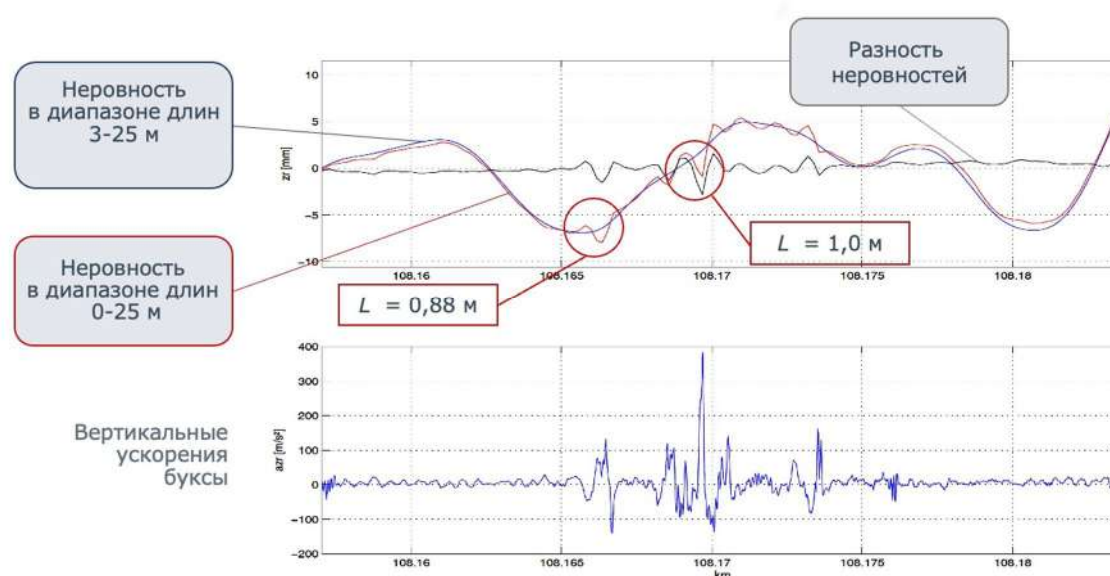


Рисунок 2 – Пример влияния изолированной неровности на динамику подвижного состава

Увеличение скоростей движения приводит к увеличению вертикальных динамических сил от колебаний наддрессорной части экипажа, причем сила зависит от параметров пути и подвижного состава. Необходимо отметить, что в контакте колеса с рельсом силы составляют 117 – 147 кН, а при наличии неровностей на бандаже или в пути [4, 8] эти силы могут достигать 294 – 343 кН. Даже при небольших неровностях силовая добавка составляет 29,4 – 49 кН, что было отмечено в работе [10].

На современном этапе технического прогресса при скоростном и высокоскоростном движении представляется целесообразным изменение уровня взаимодействия пути и подвижного состава дополнить показателями, определяемыми методом оценки влияния на уровень комфорта пассажиров [11]. Данный показатель оценивает уровень воздействия вибраций на человека. Оценка воздействия вибраций выполняется по трем составляющим (x , y , z) на основе ускорений, замеренных в вагоне, и определяются по формулам:

$$Cc_x(t) = a_x^{W_d}(t); \quad (1)$$

$$Cc_y(t) = a_y^{W_d}(t); \quad (2)$$

$$Cc_z(t) = a_z^{W_b}(t), \quad (3)$$

где Cc_x , Cc_y , Cc_z – показатель постоянного комфорта;
 t – время, с;

$a_x^{Wd}(t)$ – среднеквадратическое значение продольного ускорения;

$a_y^{Wd}(t)$ – среднеквадратическое значение бокового ускорения;

$a_z^{Wd}(t)$ – среднеквадратическое значение вертикального ускорения;

W_i – надстрочный индекс, относится к значениям частоты в соответствии с определенным направлением.

Для расчета среднеквадратических значений ускорений используются следующие формулы:

$$a_x^{Wd}(t) = \left[\frac{1}{T} \cdot \int_{t-T}^t \left(\ddot{x}_{Wd}^*(\tau) \right)^2 d\tau \right]^{0,5}; \quad (4)$$

$$a_y^{Wd}(t) = \left[\frac{1}{T} \cdot \int_{t-T}^t \left(\ddot{y}_{Wd}^*(\tau) \right)^2 d\tau \right]^{0,5}; \quad (5)$$

$$a_z^{Wd}(t) = \left[\frac{1}{T} \cdot \int_{t-T}^t \left(\ddot{z}_{Wd}^*(\tau) \right)^2 d\tau \right]^{0,5}, \quad (6)$$

где T – время измерения, соответствует 5 с;

t – время смещения измерения, кратное 5 с;

* – дидактический знак, обозначающий измеренную, а не рассчитанную величину.

Для расчета показателя комфорта по каждой составляющей используются соответствующие фильтры. На рисунке 3 приведены примеры записей ускорений и соответствующие им показатели комфорта.

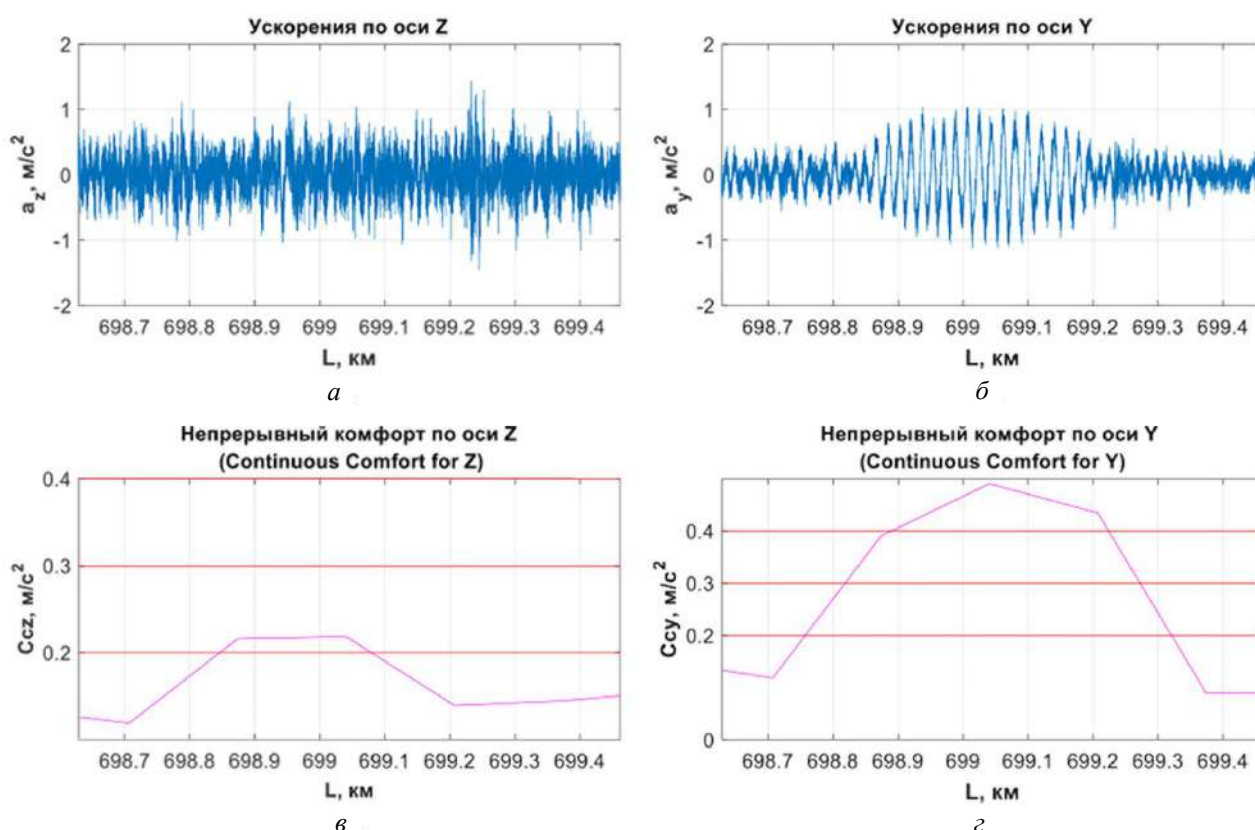


Рисунок 3 – Примеры записей ускорений и комфорта: а – ускорения по оси Z; б – ускорения по оси Y; в – непрерывный комфорт по оси Z; г – непрерывный комфорт по оси Y

Таким образом, при эксплуатации скоростного и высокоскоростного движения для более точного определения участков пути с повышенными показателями комфорта необходимо для

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

расчета комфорта проезда пассажиров использовать данные, полученные за 1 с со сдвигом, кратным 1 с.

В качестве примера рассмотрим результаты, полученные в ходе опытных поездок на участке Москва – Смоленск по второму пути на электропоезде ЭС1П «Ласточка» (рисунок 4) с использованием формул (4) – (6) для расчета комфорта проезда пассажиров.

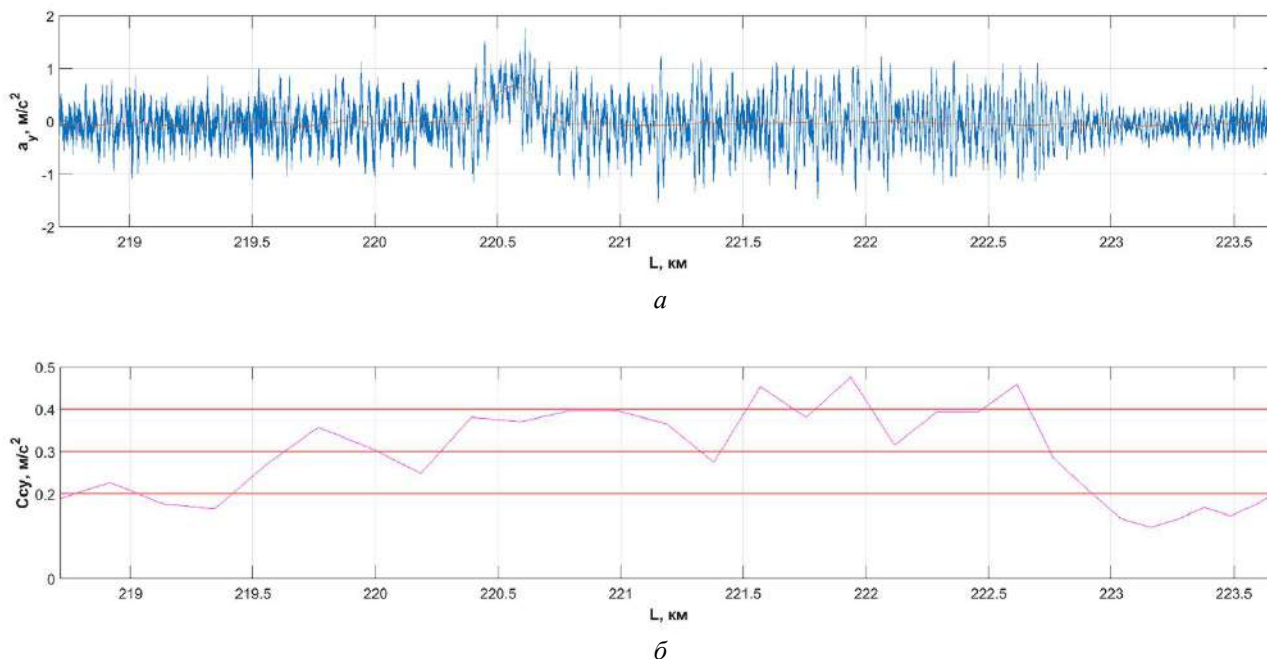


Рисунок 4 – Результаты измерений, зафиксированные в салоне электропоезда «Ласточка»:

a – ускорения по оси Y ; b – непрерывный комфорт по оси Y

Из представленных на рисунке 4 данных видно, что в процессе движения были зафиксированы повышенные показатели ускорений, приведенные в таблице 1, что повлияло на показатель комфорта.

Таблица 1 – Участки с превышениями показателя комфорта проезда пассажиров

№ п/п	Участок путь, км	План пути	$C_{cy}, \geq 0,4 \text{ м/с}^2$	$A_{cp}, \text{ м/с}^2$	$A_{max}, \text{ м/с}^2$	ДлВ _{ср} , м	ДлВ _{max} , м	ДлВ- A_{max} , м
1	221,57	Прямая	0,45	0,56	0,95	22	34	31
2	221,94	Прямая	0,48	0,58	0,98	21	36	22
3	222,62	Прямая	0,46	0,61	0,87	19	23	20

Из данных, приведенных в таблице 1, видно, что на километрах, где были зафиксированы показатели комфорта более $0,4 \text{ м/с}^2$, величины максимальных ускорений составляли $0,87 - 0,98 \text{ м/с}^2$ при средней длине волны 20 м. Данные результаты, как отмечалось в работе [1], соответствуют извилистому движению двухосной тележки под грузовым вагоном.

Для понимания причин повышенных показателей ускорений и непрерывного комфорта были проанализированы отступления ГРК на 219 – 222 км, путь 2. В таблице 2 приведены отступления ГРК по данным прохода МСД (вагон-путеизмеритель КВЛ-П).

Анализ приведенных отступлений ГРК по данным таблицы 2 показал, что на рассмотренных километрах были выявлены отклонения плана и профиля. Стоит обратить внимание на то, что на 221 км выявлено 26 отклонений ГРК. Для полной оценки состояния пути на участках срабатывания были построены неровности продольного и поперечного профилей [4], приведенные на рисунках 5 и 6.

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Таблица 2 – Отступления ГРК на участке повышенных показателей

км	Степень отступ.	Ширина		У	Просадка		Перекос	Рихтовка	Итого
		суж.	уш.		лв	пр			
219	1			13					13
220	1		2	5	1	2	4	1	15
221	1		2	5	4	1	14		26
222	2			3		1	7		11
	3							1	1
223	2		1	2	3	3	4	3	16
	3							1	1

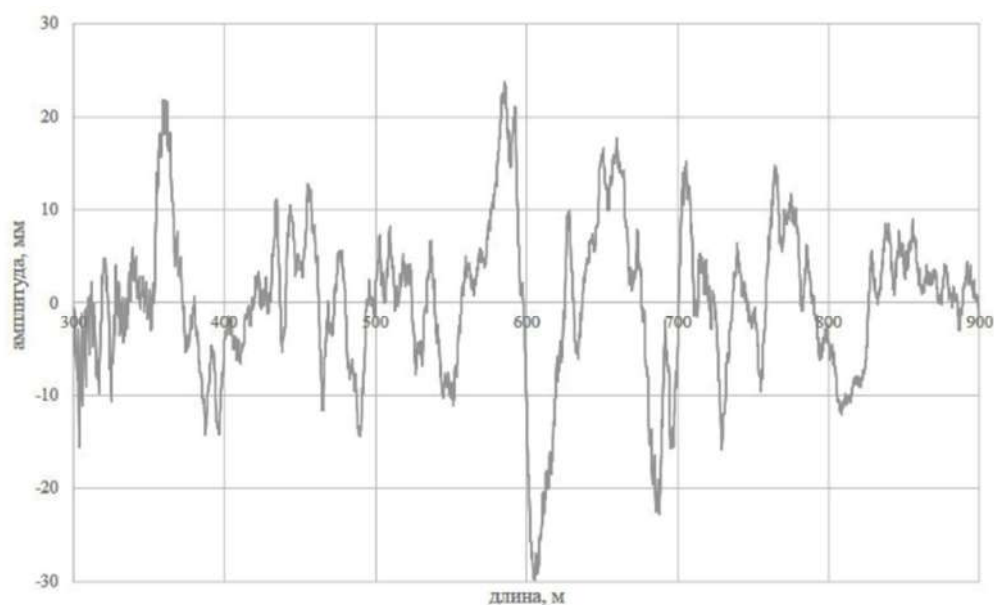


Рисунок 5 – Неровности в продольном профиле на 221 км, путь 2

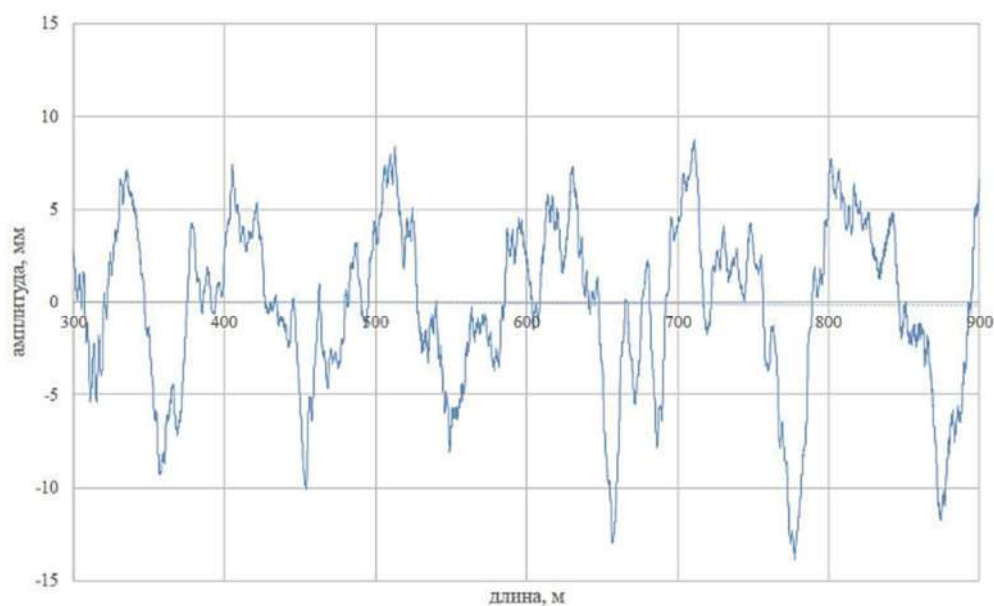


Рисунок 6 – Неровности в поперечном профиле на 221 км, путь 2

Данные, приведенные на рисунке 5, показывают, что на 221 км имеются профильные неровности длиной от 30 до 50 м и амплитудой от 20 до 30 мм. Данные, приведенные на рисунке 6, демонстрируют наличие неровностей в плане в диапазоне до 50 м и амплитудой до 15 мм. Неровности в плане и профиле, приведенные на рисунках 5 и 6, показывают сочетание неровностей длиной более 100 м (в настоящее время не нормируемых) и неровностей длиной 17 – 21 м (определяемые при штатных проходах МСД), которые в совокупности определяют динамику подвижного состава.

На участках обращения скоростного и высокоскоростного движения оценку взаимодействия пути и подвижного состава предлагается дополнить показателями комфорта проезда пассажиров. Рассматривая причины повышенного взаимодействия пути и подвижного состава и их влияние на комфорт проезда пассажиров, необходимо отметить, что превышение показателя комфорта вызвано сочетанием неровностей. Это могут быть отступления ГРК, нормируемые действующей нормативной документацией и, соответственно, выявляемые штатными средствами МСД, а также не выявленные из-за отсутствия нормативов. Подводя итог, следует отметить необходимость развития нормативной базы и средств диагностики для определения причин и факторов, влияющих на комфорт проезда пассажиров.

Список литературы

1. Вершинский, С. В. Динамика вагонов / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, И. И. Челноков. – Москва : Транспорт, 1972. – 304 с. – Текст : непосредственный.
2. Влияние длинных неровностей продольного профиля на безопасность движения в условиях интенсификации перевозочного процесса / В. О. Певзнер, А. И. Чечельницкий, К. В. Шапетько [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2020. – Т. 79. – № 5. – С. 271–275. – <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-5-271-275>.
3. Орловский, А. Н. Экспериментальная оценка горизонтального воздействия пассажирских вагонов на стрелочные переводы / А. Н. Орловский, А. П. Гатуревич // Вопросы взаимодействия пути и подвижного состава. – Днепропетровск : Институт инженеров железнодорожного транспорта, 1989. – С. 16–23. – Текст : непосредственный.
4. Pevzner V., Shapetko K., Slastenin A. Needed Additions to the Diagnostic System of HighSpeed Lines. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 1258: International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019 / V. Murgul, V. Pukhkal (eds). pp. 496-505. DOI: 10.1007/9783030574505_43.
5. Ильяшенко, А. А. Осевые нагрузки и их связь с осадками железнодорожного пути / А. А. Ильяшенко // Вопросы взаимодействия пути и подвижного состава. – Днепропетровск : Институт инженеров железнодорожного транспорта, 1989. – С. 47–52. – Текст : непосредственный.
6. Воздействие на путь вагонов с повышенной осевой нагрузкой / В. В. Третьяков, И. Б. Петропавловская, В. О. Певзнер [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2016. – Т. 75. – № 4. – С. 233–238. – <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-4-233-238>.
7. О влиянии длинных неровностей пути на безопасность движения / В. О. Певзнер, Е. А. Сидорова, К. В. Шапетько [и др.]. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 11. – С. 40–44.
8. Инструкция по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 28.02.2022 № 436/р. – Москва : ОАО «РЖД», 2022. – Текст : непосредственный.

9. Напряжения и упругие деформации в земляном полотне под воздействием поездов / Г. Г. Коншин, В. П. Титов, В. И. Хромов, Н. В. Наумова. – Текст : непосредственный // Труды ЦНИИ МПС. – Вып. 460. – Москва : Транспорт, 1972. – 128 с.

10. Система выявления участков пути с повышенным уровнем воздействия на экипаж скоростного подвижного состава / В. В. Кочергин, Г. Грабнер, И. Н. Максимов, В. О. Певзнер. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2015. – № 2. – С. 3–8. – <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2015-0-2-3-8>.

11. СТО РЖД 03.005-2019. Услуги на железнодорожном транспорте. Метод оценки влияния ускорений на комфорт пассажиров в поездах. Утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 14.01.2019 № 43/р. – Москва : ОАО «РЖД», 2019. – Текст : непосредственный.

References

1. Vershinskii S.V., Danilov V.N., Chelnokov I.I. *Dinamika vagonov* [Dynamics of wagons]. Moscow, Transport Publ., 1972, 304 p. (In Russian).

2. Pevzner V.O., Chechel' nitskiy A.I., Shapet'ko K.V., Sidorova E.A., Slastenin A.Yu. Influence of long irregularities of the longitudinal profile on traffic safety under conditions of intensification of the transportation process. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian railway science journal*, 2020, vol. 79, no. 5, pp. 271-275 (In Russian), <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-5-271-275>.

3. Orlovskij A.N., Gaturevich A.P. Experimental assessment of the horizontal impact of passenger cars on the switches. *Issues of interaction of track and rolling stock*. Dnepropetrovsk, Institute of Railway Transport Engineers (DIIT) Publ., 1989, pp. 16-23 (In Russian).

4. Pevzner V., Shapetko K., Slastenin A. Needed Additions to the Diagnostic System of HighSpeed Lines. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 1258: International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019 / V. Murgul, V. Pukhkal (eds). pp. 496-505. DOI: 10.1007/9783030574505_43.

5. Il'jashenko A.A. Axial loads and their relation to railway track precipitation. *Issues of interaction of track and rolling stock*. Dnepropetrovsk, Institute of Railway Transport Engineers (DIIT) Publ., 1989, pp. 47-52 (In Russian).

6. Tret'yakov V.V., Petropavlovskaya I.B., Pevzner V.O., Gromova T.I., Tret'Yakov I.V., Shapet'Ko K.V., Smelyanskaya I.S., Tomilenko A.S. Impact on railway track of cars with increased axle load. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian railway science journal*, 2016, vol. 75, no. 4, pp. 233-238 (In Russian), <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-4-233-238>.

7. Pevzner V.O., Sidorova E.A., Shapet'ko K.V. and others. On the impact of long unevenness of the path on traffic safety. *Zheleznodorozhnyj transport – Railway transport*, 2021, no. 11, pp. 40-44 (In Russian).

8. Instructions for assessing the condition of the track gauge by track measuring means and measures to ensure the safety of train traffic. Approved by the Order of JSC «Russian Railways» dated 28.02.2022 No. 436/r, Moscow, JSC «Russian Railways» Publ., 2022 (In Russian).

9. Konshin G.G., Titov V.P., Hromov V.I., Naumova N.V. Stresses and elastic deformations in the roadbed under the influence of trains. *Proceedings of the Central Research Institute of MPS*, issue 460. Moscow, Transport Publ., 1972, 128 p. (In Russian).

10. Kochergin V.V., Grabner G., Maksimov I.N., Pevzner V.O. A system to identify track sections producing excessive impacts on the undercarriage of high-speed rolling stock. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian railway science journal*, 2015, no. 2, pp. 3-8 (In Russian), <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2015-0-2-3-8>.

11. STO RZD 03.005-2019. Railway transport services. A method for assessing the impact of accelerations on passenger comfort in trains. Approved by the Order of JSC «Russian Railways» dated 14.01.2019 No. 43/R. Moscow, JSC «Russian Railways» Publ., 2019 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шапетько Кирилл Вячеславович

ООО «Центр инновационного развития СТМ».
Маршала Жукова ул., стр. 6, офис 201,
г. Екатеринбург, 620014, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, руководитель
отдела «Цифровые решения для путевого комплекса»,
ООО «Центр инновационного развития СТМ».

Тел.: +7 (901) 570-81-88.

E-mail: ShapetkoKV@sinara-group.com

Третьяков Василий Владимирович

ООО «Центр инновационного развития СТМ».
Маршала Жукова ул., стр. 6, офис 201,
г. Екатеринбург, 620014, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, технический
эксперт, ООО «Центр инновационного развития
СТМ».

Тел.: +7 (926) 346-51-76.

E-mail: TretyakovVV@sinara-group.com

Максимов Игорь Николаевич

ООО «Центр инновационного развития СТМ».
Маршала Жукова ул., стр. 6, офис 201,
г. Екатеринбург, 620014, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, главный научный
сотрудник, ООО «Центр инновационного развития
СТМ».

Тел.: +7 (910) 409-88-95.

E-mail: MaksimovIN@sinara-group.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Шапетько, К. В. Комфорт проезда пассажиров
как показатель взаимодействия пути и подвижного
состава / К. В. Шапетько, В. В. Третьяков,
И. Н. Максимов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 4 (52). – С. 115 – 123.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shapetko Kirill Vyacheslavovich

STM Center of Innovation Development.
Marshal Zhukov st., 6, Ekaterinburg, 620026, the
Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, head of Digital Solutions for
the railway track complex department, STM Center of
Innovation Development.

Phone: +7 (901) 570-81-88.

E-mail: ShapetkoKV@sinara-group.com

Tretyakov Vasilii Vladimirovich

STM Center of Innovation Development.
Marshal Zhukov st., 6, Ekaterinburg, 620026, the
Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, technical expert, STM Center
of Innovation Development.

Phone: +7 (926) 346-51-76.

E-mail: TretyakovVV@sinara-group.com

Maksimov Igor Nikolovich

STM Center of Innovation Development.
Marshal Zhukov st., 6, Ekaterinburg, 620026, the
Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, chief researcher, STM Center
of Innovation Development.

Phone: +7 (910) 409-88-95.

E-mail: MaksimovIN@sinara-group.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Shapetko K.V., Tretyakov V.V., Maksimov I.N.
Passenger comfort as an indicator of the interaction of the
track and rolling stock. Journal of Transsib Railway
Studies, 2022, no. 4 (52), pp. 115-123 (In Russian).

УДК 625.098: 504.055

Б. В. Мусаткина, А. А. Кообар

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ОЦЕНКА ШУМА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ТЕРРИТОРИИ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ

Аннотация. В статье показана актуальность проблемы шумового загрязнения окружающей среды железнодорожным транспортом. Цель исследований – оценить расчетными и инструментальными методами соответствие существующих уровней шума на жилой территории вблизи железнодорожных путей санитарным нормам, предложить комплекс шумозащитных мероприятий и обосновать их акустическую эффективность. Применяемые методики измерений и расчетов эквивалентных и максимальных уровней шума подвижного состава соответствуют требованиям нормативных документов. Учтены особенности

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

распространения и экранирования звуковых волн в существующей застройке, фоновые шумы, интенсивность движения поездов различных категорий на рассматриваемом участке. Представлены результаты измерений, расчетов и оценок шума, создаваемого грузовыми и пассажирскими поездами, моторвагонным подвижным составом на территории жилой застройки в г. Омске. Установлено значительное превышение предельно допустимых эквивалентных и максимальных уровней шума в жилой застройке. Сравнение расчетных и измеренных значений шума, учитывая стандартную неопределенность расчетных методов и расширенную неопределенность измерений, показало вполне удовлетворительную сходимость полученных результатов и подтвердило значительное превышение санитарных норм шума. Предложен комплекс мероприятий по снижению шума железнодорожного подвижного состава в источнике возникновения и на пути его распространения в сложившейся жилой застройке. Габариты насытей двух участков железнодорожных путей могут позволить установку экранов малой высоты – до 38 см, геометрия которых спроектирована так, чтобы по отражению излучаемого подвижным составом шума они были по меньшей мере эквивалентны стандартной шумозащитной стенке высотой 2 м. Для участка путей, расположенного в выемке, предлагается установка шумозащитного экрана высотой 6 м и протяженностью не менее 1 км, выполнен расчет его акустической эффективности.

Ключевые слова: шум, железнодорожный путь, подвижной состав.

Bela V. Musatkina, Alexander A. Koobar

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

ASSESSMENT OF THE NOISE IMPACT OF ROLLING STOCK ON THE RESIDENTIAL AREA

Abstract. The article shows the relevance of the problem of noise pollution of the environment by railway transport. The purpose of the research is to assess by calculation and instrumental methods the compliance of the existing noise levels in the residential area near the railway tracks with sanitary standards, to propose a set of noise protection measures and to substantiate their acoustic efficiency. The applied methods for measuring and calculating the equivalent and maximum noise levels of the rolling stock comply with the requirements of regulatory documents. The authors took into account the features of the propagation and shielding of sound waves in the existing residential area, background noise, and the traffic intensity of trains of various categories. The results of measurements, calculations and estimates of the noise generated by the rolling stock in the residential area in Omsk are presented. A significant excess of the maximum permissible equivalent and maximum noise levels in residential areas has been established. Comparison of the calculated and measured noise values, taking into account the standard uncertainty of the calculation methods and the expanded measurement uncertainty, showed quite satisfactory convergence of the results obtained and confirmed a significant excess of the sanitary noise standards. A set of measures is proposed to reduce the noise of railway rolling stock at the source of its occurrence and on the path of its propagation in the existing residential area. The dimensions of the embankments of the two sections of the railway tracks allow the installation of screens of low height up to 38 cm, the geometry of which is designed so that, in terms of reflection of the noise emitted by the rolling stock, they are at least equivalent to a standard noise protection wall 2 m high. For the track section located in the recess, it is proposed to install a noise barrier 6 m high and at least 1 km long. Its acoustic efficiency was calculated.

Keywords: noise, railway track, rolling stock.

Снижение негативного воздействия транспортного комплекса на окружающую среду и климат в соответствии с принципами устойчивого развития является одной из базовых задач Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. Несмотря на то, что железнодорожный транспорт является самым экологичным видом транспорта, имеет наименьшие удельные показатели негативного воздействия на экосистему, его шумовое воздействие на прилегающие территории весьма существенно. В Государственном докладе «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году» шум отмечается как «наиболее значимый из физических факторов, оказывающих негативное влияние на среду обитания человека» [1]. Согласно Государственному докладу [1], в 2021 г. 66,4 % обращений россиян в Роспотребнадзор были связаны с шумом (в 2020 г. – 62 %); доля измерений шума на территории жилой застройки, значения которых не соответствовали санитарным нормам, составила 17 % (в 2020 г. – 15,7 %). Повышенная заболеваемость, нетрудоспособность, преждевременная смертность населения, спровоцированная акустическим загрязнением среды обитания, придают проблеме борьбы с шумом не только экологическую, но и социально-экономическую значимость.

Предельно допустимые уровни (ПДУ) шума для населения в РФ устанавливают Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.562–96 [2]: для территорий, непосредственно прилегающих к жилым домам, зданиям и учебным заведениям, эквивалентный уровень звука $L_{A_{экв}}$ не должен превышать 55 дБА днем (с 7 до 23 ч) и 45 дБА ночью (с 23 до 7 ч), максимальный уровень звука $L_{A_{max}}$ не должен превышать 70 дБА днем и 60 дБА ночью. Требования санитарных норм соблюдаются в том случае, когда фактически как максимальные, так и эквивалентные уровни шума на местности не превышают соответствующие ПДУ.

Для разработки экологически и экономически целесообразных мер защиты требуются достоверные данные об уровнях шума на территориях жилой застройки. Авторами в мае 2022 г. проведены исследования акустической обстановки и измерения шума железной дороги на территории Ленинского административного округа г. Омска на ул. Калинина, прилегающей к остановочной платформе (ОП) «Труд» пригородных электропоездов. Цель исследований – оценить расчетными и инструментальными методами соответствие существующих уровней шума на селитебной территории вблизи железнодорожных путей санитарно-гигиеническим требованиям, предложить комплекс шумозащитных мероприятий и обосновать (спрогнозировать) их акустическую эффективность.

Измерения проводились шумомером 1-го класса «Экофизика-110А» (свидетельство о поверке ООО «ПКФ Цифровые приборы» № 21-6836 от 03.06.2021); обработка результатов и оценка – в соответствии с нормативными документами [2 – 5]. Расширенная неопределенность измерений для уровня доверия 95 % составила не более 2 дБА. Вблизи обследуемого участка отсутствуют автодороги (кроме внутриквартальных проездов), которые могли бы создать фоновые шумовые помехи. Измерение параметров фонового шума (вне прохождения поездов) в дневное время показало, что эквивалентный уровень звука $L_{A_{экв}}$ составил 54 дБА, максимальный уровень звука $L_{A_{max}}$ – 60 дБА; в ночное время – 42 и 56 дБА соответственно, и это соответствует санитарным нормам [2].

Источниками техногенного шума на обследуемой территории являются один двухпутный и три однопутных участка железной дороги, примыкающие с востока к железнодорожному мосту через р. Иртыш. Два участка (линии 1 и 2) с южной стороны отделены от многоэтажной жилой застройки насыпью с ОП «Труд», по которой проходит однопутная линия 3. Однопутный участок линии 4 (подъездные пути) между насыпью линии 3 и жилыми домами является малодеятельным, за время измерений шума движения поездов по нему не зафиксировано. По линиям 1 и 2 осуществляется преимущественного грузовое движение по оперативному расписанию. По линии 3 проходят поезда трех категорий: 1 (пассажирские), 2 (грузовые) и 3 (электропоезда). Все линии проходят вдоль южного фасада жилого дома № 12 по ул. Калинина, расположенного ближе всех других жилых строений к путям. Данный дом не относится к категории шумозащитных зданий, описанных в Своде правил [3], и подвергается существенному акустическому воздействию. Оценка влияния шума в жилой многоэтажной застройке, согласно рекомендациям Свода правил [3], должна проводиться для точек, расположенных на уровне середины окон верхних этажей, и для точек на высоте 2 м над уровнем земли. Принципиальная схема взаимного расположения железнодорожных путей и жилой застройки с указанием расстояний, м, и точек контроля шума 1 и 1а с учетом рельефа местности показана на рисунке 1.

Расчет шумовых характеристик потоков поездов выполняется по п. 6 ГОСТ 33325–2015 [6]. Исходные данные и результаты расчета уровней звука, создаваемых отдельными поездами различных категорий на расстоянии 25 м от оси ближнего железнодорожного пути на высоте 1,5 м над уровнем головки рельса согласно п. 6.1.1 стандарта [6], приведены в таблице 1. В расчетах количество грузовых поездов в дневное и ночное время усреднено по результатам наблюдений авторов; количество поездов 1-й и 3-й категорий приведено согласно расписанию поездов ст. Омск-Пассажирский. Скорость движения поездов перед въездом на мост через р. Иртыш не превышает 40 км/ч. Суммарная стандартная неопределенность расчета оцениваемых параметров шума, дБА (дБ), согласно приложению В ГОСТ 33325–2015 [6]

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

составляет: для $L_{A \text{ экв}}$ поездов категорий 1 и 3 не менее 3 дБА, для категории 2 – не менее 4 дБА; для $L_{A \text{ max}}$ поездов всех категорий – не менее 3 дБА.

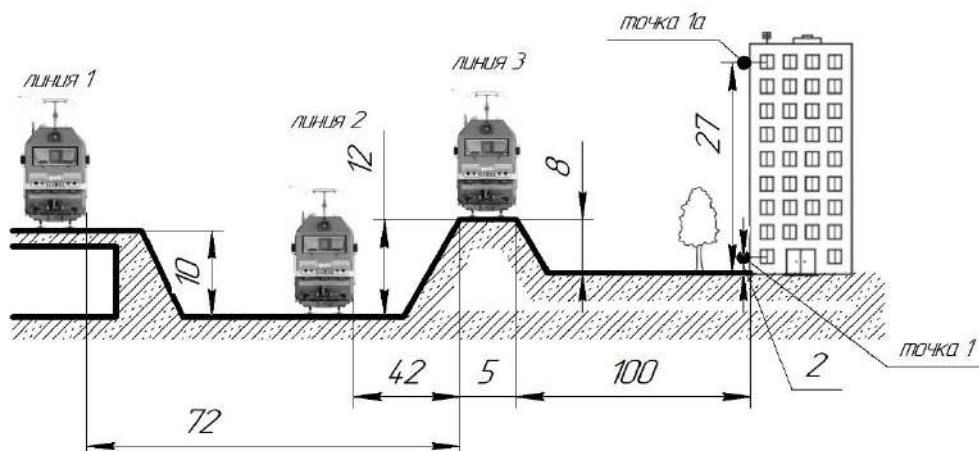


Рисунок 1 – Принципиальная схема взаимного расположения железнодорожных путей и жилой застройки с указанием расстояний, м

Таблица 1 – Исходные данные и результаты расчета уровней звука поездов на расстоянии 25 м от оси ближнего железнодорожного пути [6]

Категория и тип поезда	Длина поезда, м	Среднее количество поездов		Расчетные уровни звука, дБА	
		с 7 до 23 ч	с 23 до 7 ч	$L_{A \text{ экв}25}$	$L_{A \text{ max}25}$
1 (пассажирский)	500	16	6	75,6	81,0
2 (грузовой)	1200	100	50	80,5	85,7
3 (электропоезд)	200	32	–	75,8	80,5

Эквивалентный уровень звука и звукового давления в расчетной точке, создаваемый проходящим поездом категории i , дБА, рассчитывается согласно п. 8.4 стандарта [6] по формуле

$$L_{i, \text{экв}} = L_{i, \text{экв}25} - A_{\text{див}} - A_{\text{атм}} - A_{\text{грунт}} - A_{\text{экр}} - A_{\alpha} - A_{\text{ж.з}} - A_{\text{з.н}} - A_{\text{отр}}, \quad (1)$$

где $L_{i, \text{экв}25}$ – шумовая характеристика поезда категории i ($i = 1, 2, 3$), дБА;

$A_{\text{див}}$ – снижение уровня звука из-за геометрической дивергенции (из-за расхождения энергии при излучении в свободное пространство), дБА;

$A_{\text{атм}}$ – снижение уровня звука из-за поглощения звука атмосферой, дБА;

$A_{\text{грунт}}$ – снижение уровня звука вследствие поглощения звука поверхностью грунта, дБА;

$A_{\text{экр}}$ – снижение уровня звука из-за экранирования, дБА;

A_{α} – снижение уровня звука из-за ограничения угла видимости, дБА;

$A_{\text{ж.з}}$ – снижение уровня звука в жилой застройке, дБА;

$A_{\text{з.н}}$ – снижение уровня звука в зеленых насаждениях, дБА;

$A_{\text{отр}}$ – коррекция на отражение звука от зданий, вблизи которых расположена расчетная точка, дБА.

Максимальный уровень звука в расчетной точке, создаваемый проходящим поездом категории i , дБА, рассчитывается по формуле

$$L_{i, A \text{ max}} = L_{i, A \text{ max}25} - A_{\text{див}} - A_{\text{атм}} - A_{\text{экр}} - A_{\text{з.н}}, \quad (2)$$

где $L_{i, A \text{ max}25}$ – шумовая характеристика поезда категории i ($i = 1, 2, 3$), дБА;

$A_{\text{див}}$ – снижение уровня звука из-за геометрической дивергенции, дБА;

$A_{\text{атм}}$ – снижение уровня звука из-за поглощения звука атмосферой, дБА;

$A_{\text{экр}}$ – снижение уровня звука из-за экранирования, дБА;

$A_{\text{з.н}}$ – снижение уровня звука в зеленых насаждениях, дБА.

Значения $A_{\text{грунт}}$, A_{α} , $A_{\text{ж.з}}$, $A_{\text{з.н}}$ для конкретных рассматриваемых условий жилой застройки (акустически жесткая подстилающая поверхность грунта; отсутствие строений и зеленых насаждений, ограничивающих угол видимости поездов и рассеивающих звуковые волны) и в соответствии с рекомендациями стандарта [6] принимаются равными нулю. Значение $A_{\text{отр}}$ по указанию п. 8.7 стандарта [6] принимаем равным 3 дБА. Значение снижения уровня звука из-за поглощения звука атмосферой $A_{\text{атм}}$ рассчитывается согласно п.8.4 стандарта [6] с учетом расстояний от путей до расчетных точек 1 и 1а (см. рисунок 1) и составляет 0,76 дБА для звука, излучаемого поездами на линии 1; 0,75 дБА – на линии 2; 0,5 дБА – на линии 3.

Снижение уровней шума поездов в зависимости от расстояния от железнодорожных путей до расчетных точек 1 и 1а, дБА, вычисляют по формулам, приведенным в п. 8.5 [6], для эквивалентных уровней звука и звукового давления:

$$A_{\text{див}} = 10 \lg \left[\arctg \left(\frac{l_i}{25} \right) \right] - 10 \lg \left[\arctg \left(\frac{l_i}{R} \right) - \frac{R}{2l} \ln \left(1 + \left(\frac{l_i}{R} \right)^2 \right) \right] - 10 \lg \left(\frac{25}{R} \right); \quad (3)$$

для максимальных уровней звука поездов:

$$A_{\text{див}} = 20 \lg \left(\frac{R}{25} \right), \quad (4)$$

где R – расстояние от оси ближнего железнодорожного пути до расчетной точки, м, учитывающее высоты источника шума и расчетной точки (акустический центр источника шума принят на высоте 0,5 м над уровнем земляного полотна).

Значение $A_{\text{экр}}$ необходимо определить для оценки шума поездов в расчетной точке 1 (на пути распространения звуковых волн между линиями 1 и 2 и точкой 1 имеется экранирующая насыпь с ОП «Труд»); для точки 1а экранирования шума сооружениями и строениями нет и $A_{\text{экр}} = 0$. Согласно п.11.1 Свода правил [3] акустическая эффективность (т. е. снижение уровня звука, дБА) протяженного экрана зависит от разности длин путей звукового луча δ , м, определяемой в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2, по формуле

$$\delta = a + b - c, \quad (5)$$

где a – кратчайшее расстояние от акустического центра транспортного потока до верхней кромки экрана, м;

b – кратчайшее расстояние от верхней кромки экрана до расчетной точки, м;

c – кратчайшее расстояние от акустического центра транспортного потока до расчетной точки, м.

На рисунке 2 обозначено: $h_{\text{и.ш}}$ – высота источника шума над поверхностью проезжей части или земляного полотна; $h_{\text{экр}}$ – высота экрана; $h_{\text{р.т}}$ – высота расчетной точки над поверхностью земли; $H_{\text{и.ш}}$ – отметка источника шума; $H_{\text{экр}}$ – отметка верха экрана; $H_{\text{р.т}}$ – отметка расчетной точки.

При выполнении расчетов положение

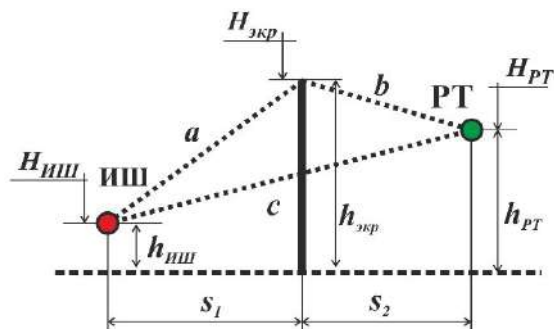


Рисунок 2 – Расчетная схема определения разности длин путей звукового луча δ для экрана-стенки [3]

акустического центра источника транспортного потока выбирают на высоте 1,0 м над уровнем головки рельса и на оси пути движения, наиболее удаленной от расчетной точки.

Подставляя в формулу (5) расчетные значения a , b и c , находят разность хода звуковых лучей δ , а по ней число Френеля:

$$N = 2\delta / \lambda, \quad (6)$$

где λ – длина звуковой волны, принимаемая при расчетах уровней звука потоков железнодорожных поездов равной 0,42 м.

По числу Френеля и на основании графика Маекавы находят акустическую эффективность экрана (кривая 3 на рисунке 11.4 Свода правил [3]). Расчет эффективности экранирования шума в точке 1 трапецеидальным валом (насыпью) с шириной верхней площадки более 4 м, но менее 10 м выполняется по аналогии с расчетом двух тонких шумозащитных экранов, расположенных под вершинами вала. По методике п. 11 Свода правил [3] определяются значение акустической эффективности насыпи $A_{\text{экp1}}$ при экранировании звуковых волн, излучаемых поездами на линии 1, равное 6,2 дБ, и значение акустической эффективности насыпи $A_{\text{экp2}}$ при экранировании звуковых волн от линии 2, равное 7,2 дБ.

Результаты расчетов по формулам (1) – (4) эквивалентных и максимальных уровней звука в жилой застройке, создаваемых проходящими поездами категорий 1 – 3, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Эквивалентные и максимальные уровни звука, создаваемые проходящими поездами категорий 1 – 3 в расчетных точках жилой застройки, дБА

Участок движения	Категория и тип поезда	Уровни звука в точке 1		Уровни звука в точке 1а		ПДУ	
		$L_{\text{А экв}}$	$L_{\text{А max}}$	$L_{\text{А экв}}$	$L_{\text{А max}}$	$L_{\text{А экв}}$	$L_{\text{А max}}$
Линия 1	2 (грузовой)	64,74	69,94	70,73	75,93	55 (день) 45 (ночь)	70 (день) 60 (ночь)
Линия 2	2 (грузовой)	63,55	68,75	70,75	75,95		
Линия 3	1 (пассажирский)	66,10	71,50	66,10	71,50		
	2 (грузовой)	71,00	76,20	71,00	76,20		
	3 (электропоезд)	66,30	71,00	66,30	71,00		

Сравнение приведенных в таблице 2 расчетных уровней звука, создаваемых проходящими поездами, с ПДУ показывает значительное превышение норм – в ночное время до 26 дБА для $L_{\text{А экв}}$ и до 16,2 дБА для $L_{\text{А max}}$; в дневное время до 16 дБА для $L_{\text{А экв}}$ и до 6,2 дБА для $L_{\text{А max}}$. Особенно неблагоприятная акустическая обстановка сложилась в точке 1а и, соответственно, на рядом расположенных верхних этажах южного фасада здания, лишенных экранирующего эффекта насыпи линии 3 с ОП «Труд».

Для экспериментальной проверки расчетов акустического загрязнения территорий, прилегающих к железнодорожным путям, авторы провели инструментальный контроль шума вблизи южного фасада дома № 12 по ул. Калинина, обращенного к железнодорожным путям, на различных расстояниях R от оси линии 3. Выбор точек измерений на высоте 2 м над уровнем земли с учетом исключения зон акустической тени и методика замеров определялись нормативными документами [3 – 5]. Точка измерения шума 1 расположена на расстоянии 2 м от фасада дома № 12 и 99 м от оси линии 3 (совпадает с расчетной точкой 1); точки 2, 3 и 4 – на расстояниях 45, 25 и 2 м от оси линии 3 соответственно. Все точки измерений расположены на одной прямой, ориентированной с юга на север.

На рисунке 3 приведены результаты измерений эквивалентных $L_{\text{А экв}}$ и максимальных $L_{\text{А max}}$ уровней шума поездов в жилой застройке, выполненных в дневное и ночное время. Максимальные измеренные уровни шума подвижного состава регистрировались как в дневное, так и в ночное время при прохождении грузовых поездов. В ночное время суток на рассматриваемом участке нет движения электропоездов (см. таблицу 1), что выразилось в незначительном (в пределах 1 дБА) снижении эквивалентного уровня шума в ночное время.

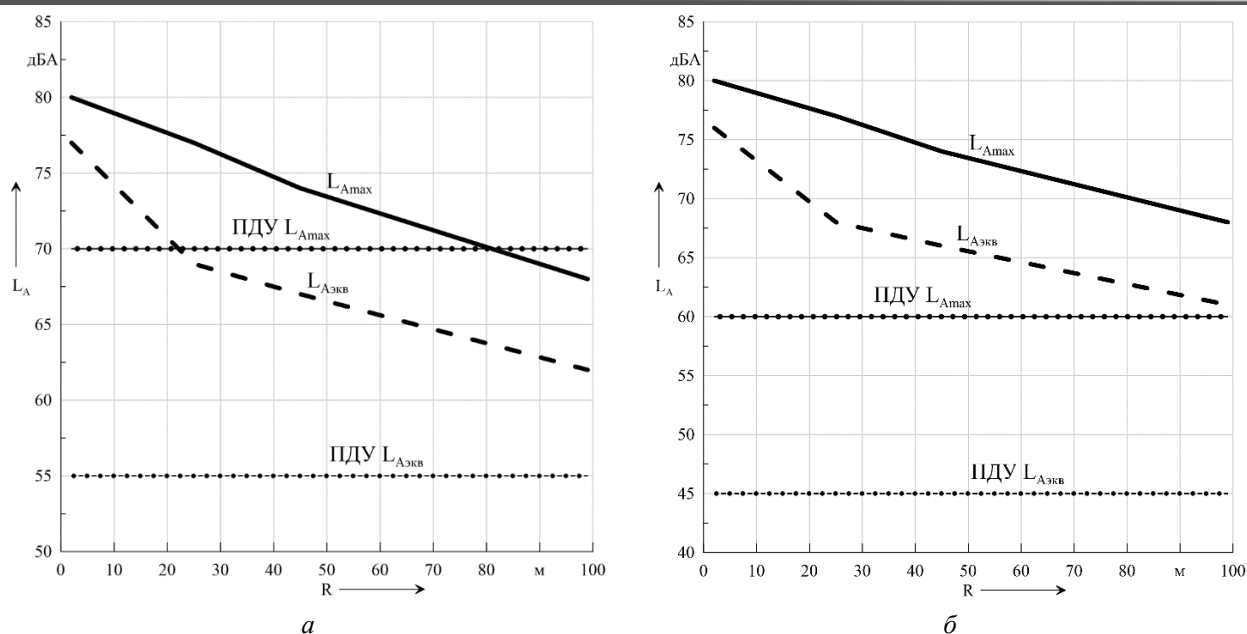


Рисунок 3 – Результаты измерений эквивалентных $L_{A экв}$ и максимальных $L_{A max}$ уровней шума поездов в жилой застройке: *а* – в дневное время; *б* – в ночное время

Оценка измеренных значений уровней шума поездов на высоте 2 м над уровнем земли показала в точке 1 (на расстоянии 2 м от фасада жилого дома № 12 по ул. Калинина) существенное превышение ПДУ эквивалентных уровней шума для дневного и ночного времени суток (на 7 и 17 дБА); превышение ПДУ максимального уровня шума в ночное время суток (на 8 дБА). В целом сравнение расчетных и измеренных значений шума, учитывая стандартную неопределенность расчетных методов (3 – 4 дБА) и расширенную неопределенность измерений (не более 2 дБА), показало вполне удовлетворительную сходимость полученных результатов и подтвердило значительное превышение санитарных норм шума в жилой застройке.

Наиболее эффективными мерами по снижению шума (СШ) применительно к рассматриваемой территории сложившейся жилой застройки являются шлифование рельсов (СШ в источнике от 3 до 7 дБА); использование вибродемпфирующих накладок и амортизаторов на шейку рельса и колесные пары (СШ от 1 до 2 дБА); облицовка поверхности тележки, дна поезда виброшумопоглощающим материалом для снижения многократного отражения звука между кузовом подвижного состава и устанавливаемым вдоль трассы шумозащитным экраном (СШ от 2 до 3 дБА); звукоизолирующее остекление (СШ от 20 до 30 дБА); использование акустических экранов (СШ до 20 дБА) [7 – 10].

Установка шумозащитного экрана высотой до 6 м и длиной не менее 1 км возможна вдоль линии 2. Габариты насыпей линий 1 и 3 могут позволить установку экранов малой высоты – до 38 см (разработка Технологического института в Карлсруэ (KIT), Германия, в проекте «FiL–Rail MSW – низкая шумозащитная стенка»). Геометрия FiL–Rail MSW спроектирована так, чтобы она по отражению излучаемого подвижным составом шума была по меньшей мере эквивалентна стандартной шумозащитной стенке высотой 2 м [8].

Расчет акустической эффективности протяженного экрана высотой 6 м, установленного на расстоянии 5 м от крайнего рельса линии 2, по указаниям п. 11 Свода правил [3] и формулам (5) и (6) для точки 1а (см. рисунок 1) дал результат 15,7 дБА. Целесообразно предусмотреть в верхней части экрана полку, предпочтительно Г- или Т-образной формы, что дополнительно увеличит его эффективность на 2 – 3 дБА [3].

Более точный расчет акустической эффективности предлагаемого экрана осуществляется в октавных полосах частот при использовании относительных спектров шума железнодорожного транспорта (п. 6.3, таблица 5 ГОСТ 33325–2015 [6]), для 2-й категории поездов (грузовых), ведь именно грузовое движение осуществляется по линии 2 и создает

максимальное шумовое загрязнение окружающей среды. На рисунке 4 показаны результаты расчета прогнозируемого снижения уровней звукового давления (УЗД) в октавных полосах частот в точке 1а на уровне середины окна верхнего этажа дома № 12 по ул. Калинина при условии установки шумозащитного экрана вдоль линии 2. Существенное снижение УЗД достигнуто в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 1 – 8 кГц; шумы этих частот вызывают у людей наибольшее беспокойство и утомляемость.

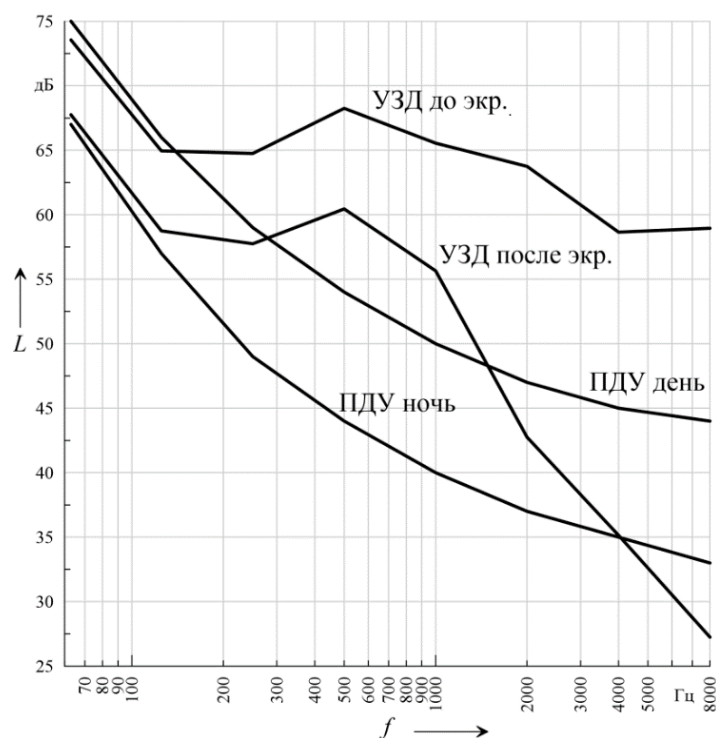


Рисунок 4 – Снижение уровней звукового давления в октавных полосах частот в расчетной точке 1а после установки акустического экрана высотой 6 м вдоль линии 2

По итогам выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

установлено акустическое загрязнение территории жилой застройки вблизи железнодорожных путей;

измерения и расчеты показали существенное превышение ПДУ эквивалентных и максимальных уровней шума на территории жилой застройки для дневного и ночного времени суток более чем на 7 дБА;

предложен комплекс мероприятий по снижению шума железнодорожного подвижного состава в источнике возникновения и на пути распространения, применимый в сложившейся застройке;

проведен расчет акустической эффективности протяженного шумозащитного экрана высотой 6 м;

показана прогнозируемая эффективность экранирования, особенно в октавных полосах частот 2, 4 и 8 кГц, где ожидается уменьшение шума в расчетной точке на расстоянии 2 м от фасада жилого дома ниже ПДУ как для дневного, так и для ночного времени суток.

Список литературы

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году». – Москва : Минприроды России; МГУ им. М. В. Ломоносова, 2021. – 864 с. – Текст : непосредственный.
2. Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. – Москва : Информационно-издательский центр Минздрава РФ, 1997. – 28 с. – Текст : непосредственный.

3. СП 276.1325800.2016. Свод правил. Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков (ред. от 30.05.2022). – Москва : Минстрой России, 2016. – 126 с. – Текст : непосредственный.
4. ГОСТ Р 53187–2008. Акустика. Шумовой мониторинг городских территорий. – Москва : Стандартинформ, 2009. – 34 с. – Текст : непосредственный.
5. ГОСТ 23337–2014. Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 26 с. – Текст : непосредственный.
6. ГОСТ 33325–2015. Шум. Методы расчета уровней внешнего шума, излучаемого железнодорожным транспортом (ред. от 19.11.2019). – Москва : Стандартинформ, 2015. – 43 с. – Текст : непосредственный.
7. Снижение шума подвижного состава железнодорожного транспорта в источнике образования и на пути распространения / Н. И. Иванов, Д. А. Ку克林, П. В. Матвеев, А. Ю. Олейников. – Текст : непосредственный // Защита от повышенного шума и вибрации : доклады V всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Балтийский государственный технический университет ; под ред. Н. И. Иванова. – Санкт-Петербург : Айсинг, 2015. – 701 с. – С. 125–145.
8. Инновационные методы снижения уровня шума. – Текст : непосредственный // Железные дороги мира. – 2011. – № 10. – С. 66–71.
9. Kholopov Yu.A., Lukeniuk E.V., Musatkina B.V., Denisova I.V. Traffic noise analysis in the urban environment, *Akustika*, 2021, no. 11, vol. 41, pp. 195-199.
10. Kholopov Yu.A., Musatkina B.V., Denisova I.V. The comparative analysis of the noise characteristics of land rail transport and the efficiency of noise protection measures, *Akustika*, 2019, vol. 32, no. 3 (211), pp. 299-304.

References

1. *O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2020 godu : State report* (On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2020 : State report), Moscow, Ministry of Natural Resources of Russia; Lomonosov Moscow State University, 2021, 864 p. (In Russian).
2. *Sanitarnyye normy SN 2.2.4/2.1.8.562-96 «Shum na rabochikh mestakh, v pomeshcheniyakh zhilykh, obshchestvennykh zdaniy i na territorii zhiloy zastroyki»* (Sanitary norms SN 2.2.4/2.1.8.562-96 Noise at workplaces, in the premises of residential, public buildings and in residential areas), Moscow, Information and Publishing Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, 1997, 28 p. (In Russian).
3. *SP 276.1325800.2016. Svod pravil. Zdaniya i territorii. Pravila proyektirovaniya zashchity ot shuma transportnykh potokov (red. ot 30.05.2022)*. (SP 276.1325800.2016. Set of rules Buildings and territories. Rules for the design of traffic noise protection) : as amended on 05/30/2022, Moscow, Ministry of Construction of Russia, 2016, 126 p. (In Russian).
4. Acoustics. Noise monitoring of urban areas, GOST R 53187-2008 (Acoustics. Noise monitoring of urban areas, National Standard 53187-2008). Moscow, Standardinform Publ., 2009. 34 p. (In Russian).
5. *Shum. Metody izmereniya shuma na selitebnoy territorii i v pomeshcheniyakh zhilykh i obshchestvennykh zdaniy, GOST 23337-2014* (Noise. Methods for measuring noise in the residential area and in the premises of residential and public buildings, National Standard 23337-2014). Moscow, Standardinform Publ., 2014, 26 p. (In Russian).
6. *Shum. Metody rascheta urovney vneshnego shuma, izluchayemogo zheleznodorozhnym transportom, GOST 33325-2015* (Noise. Calculation methods for external noise emitted by railway transport, National Standard 33325-2015) : ed. from 11.19.2019. Moscow, Standardinform Publ., 2015, 43 p. (In Russian).

7. Ivanov N.I., Kuklin D.A., Matveev P.V., Oleinikov A.Yu. Reducing the noise of the rolling stock of railway transport at the source of formation and on the path of propagation. *Doklady V Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Zashchita ot povyshennogo shuma i vibratsii»* (Reports of the V All-Russian scientific and practical conference with international participation «Protection from increased noise and vibration»). St. Petersburg, Icing Publ., 2015, pp. 125-145 (In Russian).

8. Innovative noise reduction methods. *Zheleznyye dorogi mira – Railways of the world*, 2011, no. 10, pp. 66-71 (In Russian).

9. Kholopov Yu.A., Lukeniuk E.V., Musatkina B.V., Denisova I.V. Traffic noise analysis in the urban environment, *Akustika*, 2021, vol. 41, no. 1, pp. 195-199.

10. Kholopov Yu.A., Musatkina B.V., Denisova I.V. The comparative analysis of the noise characteristics of land rail transport and the efficiency of noise protection measures, *Akustika*, 2019, vol. 32, no. 3 (211), pp. 299-304.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мусаткина Бэла Владимировна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экология», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-07-94.

E-mail: iovv@mail.ru

Кообар Александр Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экология», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-07-94.

E-mail: koobar_a_a@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Musatkina Bela Vladimirovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Senior lecturer of the department «Life safety and ecology», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-07-94.

E-mail: : iovv@mail.ru

Koobar Alexander Alexandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Senior lecturer of the department «Life safety and ecology», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-07-94.

E-mail: koobar_a_a@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Мусаткина, Б. В. Оценка шума железнодорожного подвижного состава на территории жилой застройки / Б. В. Мусаткина, А. А. Кообар. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 4 (52). – С. 123 – 132.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Musatkina B.V., Koobar A.A. Assessment of the noise impact of rolling stock on the residential area. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 4 (52), pp. 123-132 (In Russian).

УДК 625.1

У. Э. Эргашев, Н. И. Бегматов

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ), г. Ташкент, Республика Узбекистан

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЗАМЕНЫ РЕЛЬСОВЫХ ПЛЕТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАВЕСНЫХ ОСНАСТОК

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы применения технологии замены инвентарных рельсов на рельсовые плети бесстыкового пути. Для производства работ по замене рельсовых плетей в качестве ведущих машин выбраны экскаваторы на комбинированном ходу, которые в последние годы широко применяются при производстве работ для текущего содержания и ремонта железнодорожного пути. В работе представлены результаты сравнительной оценки применения технологии замены рельсовых плетей с использованием

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

навесных оснасток и с использованием пары тележек. Для выбора наилучшей технологии для производства работ по замене рельсовых плетей разработана методика оценки экономической эффективности применения той или иной технологии. Основным показателем в расчетах являлись приведенные эксплуатационные расходы, учитывающие себестоимость машины за единицу работы, затраты на перебазировку машины, на задержку поездов, на заработную плату монтеров пути и на разрядку рельсовых плетей. По результатам расчета установлено, что работу по замене рельсовых плетей при фронте работ до 4 км экономически выгодно проводить по технологии с использованием пары тележек, при фронте работ более 4 км замену рельсовых плетей целесообразно проводить по технологии с использованием навесных оснасток. Максимальный экономический эффект при использовании технологии с применением навесных оснасток достигается при фронте работ 10 км. Сравнение результатов работ по двум технологиям дает основание заключить, что при трехчасовом «окне» объем выполняемых работ по технологии с применением навесных оснасток в 1,7 раза превышает объем работ, выполняемых по технологии с применением пары тележек.

Ключевые слова: бесстыковой путь, рельсовые плети, технология производства работ, конкурентоспособная технология, эффективность, эксплуатационные расходы, количество «окон», продолжительность работ.

Ulugbek E. Ergashev, Nodir I. Begmatov

Tashkent State Transport University (TSTU), Tashkent, Republic of Uzbekistan

THE EFFECTIVENESS OF THE TECHNOLOGY OF REPLACING RAIL LASHES WITH THE USE OF ATTACHMENTS

Abstract. The article discusses the issues of using the technology of replacing inventory rails with rail lashes of a jointless track. For the production of works on the replacement of rail lashes, excavators on a combined course have been selected as the leading machines, which in recent years have been widely used in the production of works for the current maintenance and repair of the railway track. The paper presents the results of a comparative assessment of the use of rail lash replacement technology using attachments and using a pair of trolleys. In order to select the best technology for the production of works on the replacement of rail lashes, a methodology for assessing the economic efficiency of using a particular technology has been developed. The main indicator in the calculations were the given operating costs, taking into account the cost of the machine per unit of work, the cost of relocating the machine, the delay of trains, the wages of track fitters and the discharge of rail lashes. According to the results of the calculation, it was found that it is economically advantageous to replace rail lashes at the front of work up to 4 km using technology using a pair of trolleys, at the front of work more than 4 km, it is advisable to replace rail lashes using technology using attachments. The maximum economic effect when using technology with the use of attachments is achieved with a work front of 10 km. A comparison of the results of work on two technologies gives grounds to conclude that with a three-hour «window», the volume of work performed on the technology with the use of attachments is 1,7 times higher than the volume of work performed on the technology with the use of a pair of trolleys.

Keywords: joint-free track, rail lashes, work production technology, competitive technology, efficiency, operating costs, number of «windows», duration of work.

В соответствии со Стратегией действия по развитию Республики Узбекистан [1] разработана Концепция развития железнодорожного транспорта Республики [2].

Целью Концепции развития железнодорожного транспорта является формирование и продолжение развития железнодорожной отрасли как неотъемлемой части экономики Республики Узбекистан, увеличение транспортно-транзитного потенциала страны, повышение уровня локализации продукции, ведение скоординированной политики в области транспорта и технического регулирования, а также обеспечение безопасности и повышение уровня комфортабельности и надежности движения поездов, повышение инвестиционной привлекательности железнодорожного транспорта [2].

Развитие инфраструктуры путевого хозяйства компании предусматривает следующее:

- строительство новых железнодорожных линий и реабилитацию эксплуатируемых;
- строительство новых и реконструкцию существующих раздельных пунктов;
- использование современных материалов и конструкций;
- развитие и внедрение инновационных технологий.

Для реализации высоких скоростей движения поездов и обеспечения гарантированной безопасности и комфортабельности необходимо широкое внедрение надежных, мало

обслуживаемых и экономически эффективных конструкций верхнего строения железнодорожного пути, к которым относится прежде всего бесстыковая конструкция.

Устойчивость бесстыкового пути зависит от температуры его закрепления намного больше, чем от характеристик элементов верхнего строения пути [3]. Необходимую температуру закрепления рельсовых плетей можно обеспечить применением высокопроизводительных путевых машин и прогрессивных технологий работ. Для решения этой задачи дополнительно к существующим технологиям предложена новая технология производства работ по замене инвентарных рельсов на рельсовые плети с применением экскаватора на комбинированном ходу, оборудованного навесными оснастками [4 – 6]. Замена инвентарных рельсов на плети бесстыкового пути с применением экскаватора на комбинированном ходу, оборудованного двойным роликовым рельсовым захватом, осуществляется по следующей технологии. Экскаватор на комбинированном ходу осуществляет подъем рельсовой нити с инвентарными рельсами с использованием вспомогательного захвата. Перед движением экскаватора подъем рельсовой нити с вспомогательного захвата переводится на основной захват. Основной захват устанавливается с подошвы рельса, чтобы преодолеть стыковую зону рельсовой нити с инвентарными рельсами. Экскаватор начинает двигаться, при движении экскаватора по фронту работ стрелой назад осуществляется плавное перемещение рельсовой нити с инвентарными рельсами поперек пути с подрельсового основания на плечо балластной призмы. Экскаватор, доехав до конца фронта работ, останавливается, и осуществляется переход на вспомогательный захват. Концевая часть рельсовой нити перемещается вспомогательными захватами. После полного перемещения рельсовой нити с инвентарными рельсами на плечо балластной призмы начинается укладка рельсовой плети на место ранее снятых инвентарных рельсов. При этом экскаватор вспомогательным захватом поднимает рельсовую плеть и перемещает на подрельсовое основание. После подъема рельса производится обратный переход на основной захват и экскаватор начинает движение. При движении экскаватора вдоль пути осуществляется последовательный сдвиг рельсовой нити в проектное положение со сдвигом плети на всем ее протяжении. Работы по замене можно производить с применением одного, двух и четырех экскаваторов. Максимальный эффект достигается при применении четырех экскаваторов. При этом первый и третий экскаваторы, двигаясь стрелой назад, убирают правые и левые рельсовые нити с инвентарными рельсами, а второй и четвертый экскаваторы, двигаясь стрелой вперед, надвигают рельсовые плети в их рабочее положение [5]. Предложенная технология успешно прошла апробацию на действующих путях АО «Узбекские железные дороги» [7].

В связи изложенным выше необходимо определить технико-экономическую эффективность способа замены инвентарных рельсов рельсовыми плетями с применением экскаватора на комбинированном ходу, оборудованного навесными оснастками, при внедрении его на железных дорогах АО «Узбекские железные дороги».

Существуют разные подходы определения эффективности внедрения новой технологии [8 – 12]. Эффективность внедрения новой технологии рекомендуется определять на основе сравнения эксплуатационных затрат в конкретной эксплуатационной ситуации при использовании новой и конкурентоспособной технологии [13]. Показателем сравнительной эффективности затрат являются приведенные эксплуатационные расходы ($\mathcal{E}_{\text{пр}}$) [14].

Приведенные эксплуатационные расходы ($\mathcal{E}_{\text{пр}}$) используются как показатель сравнения вариантов, имеющих одинаковые результаты:

$$\mathcal{E}_{\text{пр}} = C_t + C_{\text{пб}} + C_{\text{з. п}} + C_{\text{м. п}} + C_p, \quad (1)$$

где C_t – себестоимость машины за единицы работы;

$C_{\text{пб}}$ – затраты на перебазировку машины;

$C_{\text{з. п}}$ – затраты на задержки поездов;

$C_{\text{м. п}}$ – затраты на заработную плату монтеров пути;

C_p – затраты на разрядку рельсовых плетей.

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Экономически наиболее эффективным считается вариант, имеющий минимальные значения приведенных эксплуатационных расходов.

Себестоимость машины за единицу работы, учитывая рекомендации работы [15], определяем согласно [16] по формуле:

$$C_i = \frac{\mathcal{E}}{H_{\text{в}}} + \frac{\Gamma}{T_{\text{ч.н}} \cdot H_{\text{в}}}, \quad (2)$$

где $\mathcal{E}$ – текущие эксплуатационные затраты, руб.;

$H_{\text{в}}$ – норма выработки, ед./маш.-ч;

Γ – годовые затраты, руб.;

$T_{\text{ч.н}}$ – производительное время работы машины в течение года (время нахождения машины в работе), маш.-ч/год.

Широко распространенным в последние годы на железных дорогах ОАО «РЖД» является способ замены инвентарных рельсов на сварные рельсовые плети с применением тележек конструкции МИИТа и ПТКБ. В качестве конкурентоспособной технологии для проведения расчетов по экономической эффективности принимаем технологию замены инвентарных рельсов на сварные рельсовые плети с использованием пары тележек. Тележки, соединенные между собой и с тяговой единицей тросом, двигаются по рельсу. Зарядка тележек осуществляется с помощью любого грузоподъемного оборудования. Разрядка тележек производится автоматически по окончании замены. После зарядки и соединения тележек между собой и с тяговой единицей производится замена рельсовых плетей. Двигаясь по старым рельсовым плетям, первая тележка надвигает новые плети, предварительно выгруженные и находящиеся внутри колеи, на подкладки, а вторая тележка, двигаясь вслед за ней, сдвигает старые рельсовые плети, выходящие из-под первой тележки, внутрь колеи, перемещаясь при этом по вновь уложенным новым плетям. Технологический процесс производства работ по замене с применением тележек представлен в работе [17]. В качестве тягового усилия для передвижения тележек и для зарядки-разрядки тележек принимаем экскаватор на комбинированном ходу. Скорость движения экскаватора при замене с применением тележек принимаем 3 км/ч [18], остальные технико-экономические показатели конкурентоспособной технологии принимаем согласно источнику [17]. Техничко-экономические показатели технологии с использованием навесных оснасток принимаем согласно рекомендациям работы [5]. Основные технико-экономические показатели конкурентоспособной и предложенной технологии представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Техничко-экономические показатели сравниваемых технологий

№, п/п	Основные параметры	Единица измерения	Количественное значение параметра	
			T ¹	HO ²
1	Скорость движения при производстве работ	км/ч	3	5
2	Время зарядки-разрядки	мин.	15	3
3	Число рабочих:			
	монтеры пути	чел.	6	4
	машинист	чел.	1	4
4	Экскаватор-погрузчик	шт.	1	4
5	Тележки для надвигки рельсовых нитей	комплект	1	–
6	Двойной роликовый рельсовый захват	шт.	–	4

Примечание: 1 – технология с применением тележек; 2 – технология с применением навесной оснастки.

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

По данным таблицы 1 определены продолжительности «окна» для каждой технологии и затраты на заработную плату монтеров пути в зависимости от фронта производства работ.

Затраты, связанные с перебазировкой машин, определены в соответствии с учетом количества машин и средней дальности перемещения техники к месту выполнения работ [16]. Затраты, связанные с закрытием перегона на время «окна» для выполнения путевых работ, определены с использованием справочно-нормативных данных в части задержки поездов от размера движения, приведенных в работе [19].

Для обоснования способов и технологии производства работ по закреплению плетей бесстыкового пути при оптимальной температуре в различные месяцы года, для обоснования времени начала, конца и продолжительности выполнения работ на плетях повышенной длины, для выявления наиболее рациональных периодов года для выполнения этих работ специалистами НИЛ «ППХ» ТашиИИТа были проведены исследования изменения температур рельсов по дистанциям пути АО «УЖД» [20]. Результаты исследования [20] показали, что летом в самое жаркое время года продолжительность благоприятного периода выполнения путевых работ составляет 2,5 – 3,0 часа, в которые необходимо уложиться при выполнении работ. Исходя из этого в расчетах сравнительной экономической эффективности, когда продолжительность «окна» превышает трехчасовую отметку, учитывались затраты, связанные с разрядкой рельсовых плетей.

Кроме того, для проведения расчетов по оценке экономической эффективности приняты следующие исходные данные:

- годовой объем укладки бесстыкового пути – 280 км;
- средняя дальность перемещения техники к месту выполнения работ – 10 км;
- количество грузовых поездов, обращающихся по участку, – 40 пар поездов в сутки;
- количество пассажирских поездов, обращающихся по участку, – 30 пар поездов в сутки;
- затраты на производство работ по вводу рельсовых плетей в оптимальную температуру составляют 206650 руб./км [21].

Результаты расчета сравнительной экономической эффективности представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Приведенные эксплуатационные расходы

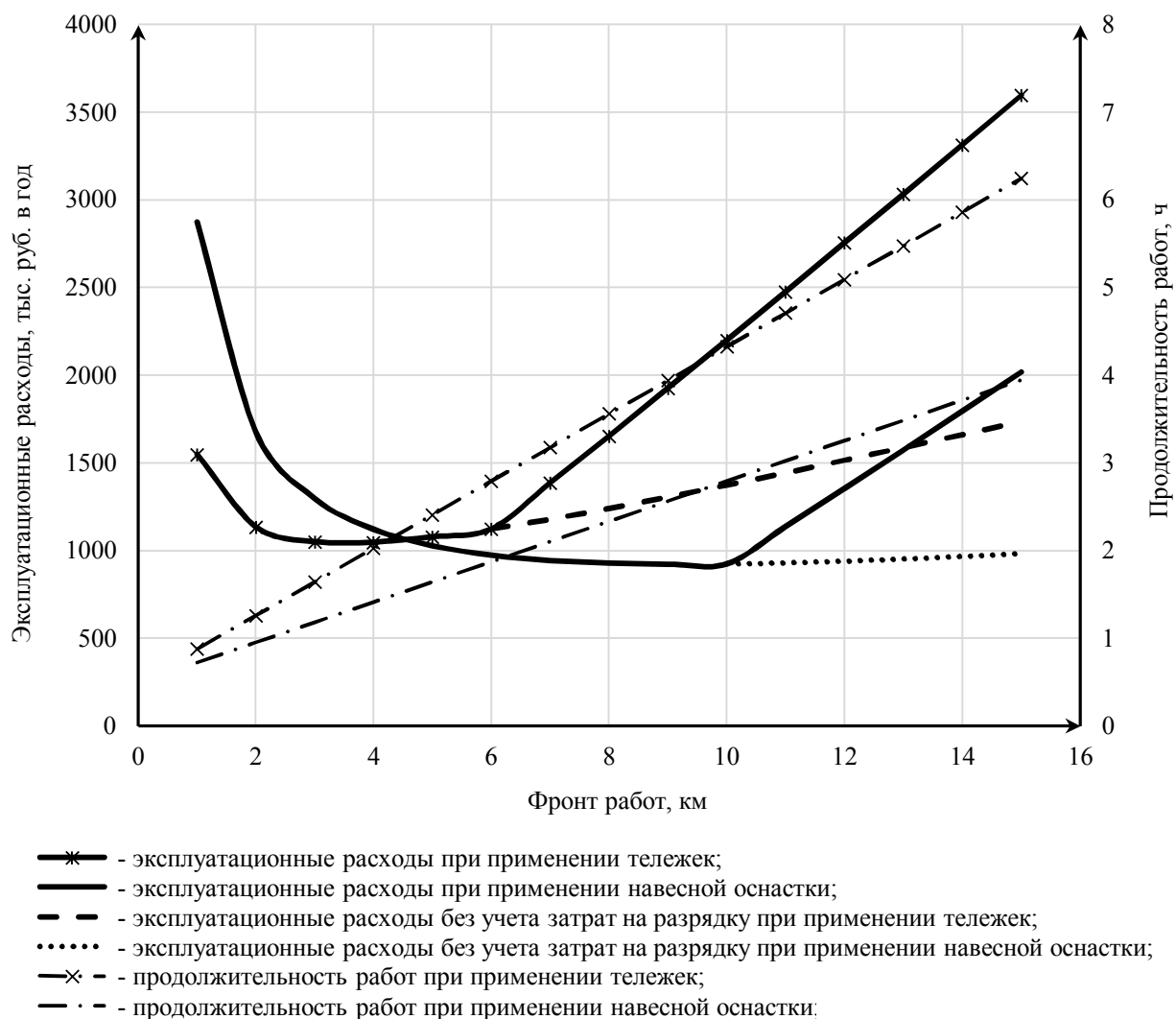
Фронт работ, км	Продолжительность работ, ч		Приведенные эксплуатационные расходы, тыс. руб.		Приведенные эксплуатационные расходы без учета затрат на разрядку, тыс. руб.	
	Т	НО	Т	НО	Т	НО
1	0,88	0,73	1551	2875	1551	2875
2	1,27	0,96	1138	1679	1138	1679
3	1,65	1,19	1053	1299	1053	1299
4	2,03	1,42	1050	1123	1050	1123
5	2,42	1,65	1079	1029	1079	1029
6	2,80	1,88	1126	976	1126	976
7	3,18	2,11	1388	946	1181	946
8	3,57	2,34	1656	930	1243	930
9	3,95	2,57	1928	925	1308	925
10	4,33	2,8	2202	926	1376	926
11	4,72	3,03	2479	1139	1446	932
12	5,10	3,26	2757	1355	1517	942
13	5,48	3,49	3036	1574	1590	955
14	5,87	3,72	3317	1796	1663	969
15	6,25	3,95	3598	2019	1738	986

Анализ результатов расчета показывает, что в условиях жаркого климата Узбекистана при внедрении технологии замены рельсовых плетей с применением пары тележек высокая

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

эффективность достигается при фронте работ 4 км. При этом эксплуатационные расходы на заданный объем работ составляют 1050 тыс. руб. С фронтом работ более 4 км наблюдается увеличение эксплуатационных расходов, обусловленное ростом затрат на задержки поездов, а при фронте работ более 6 км рост эксплуатационных расходов увеличивается значительно. Это связано с тем, что при фронте работ более 6 км продолжительность «окон» увеличивается и становится более трех часов, поэтому потребуются дополнительные ресурсы, связанные с разрядкой рельсовых плетей.

По данным таблицы 2 построен график, представленный на рисунке.



Зависимость эксплуатационных расходов и продолжительности работ по замене рельсовых плетей от объема выполняемых работ

Из графика на рисунке видно, что эксплуатационные расходы при использовании технологии с применением навесной оснастки с увеличением объема работ в «окно» уменьшаются. Это связано с сокращением количества «окон» при заданном годовом объеме, что приводит к уменьшению затрат на перебазировку путевых машин на место производства работ. Максимальный экономический эффект при использовании технологии с применением навесной оснастки достигается при фронте работ 10 км. При этом для выполнения заданного объема работ по такой технологии потребуется 926 тыс. руб. При фронте работ более 10 км продолжительность «окон» превышает трехчасовую отметку и начинается рост затрат, связанных с разрядкой рельсовых плетей. Сравнивая результаты двух технологий, можно сказать, что при трехчасовом «окне» объем выполняемых работ по технологии с применением навесной оснастки в 1,7 раза превышает объем работ, выполняемых по технологии с

применением тележек. При этом эксплуатационные расходы при использовании технологии с применением навесной оснастки меньше эксплуатационных расходов при использовании технологии с применением тележек на 200 тыс. руб.

Экономические расчеты показали, что работу по замене рельсовых плетей при фронте работ до 4 км экономически выгодно проводить технологией с использованием пары тележек, при фронте работ более 4 км замену рельсовых плетей целесообразно проводить по технологии с использованием навесных оснасток, при этом максимальная экономическая эффективность применения технологии с использованием навесных оснасток достигается при фронте работ 10 км.

Таким образом, выполнена оценка экономической эффективности применения той или иной технологии производства работ по замене инвентарных рельсов на рельсовые плети бесстыкового пути по минимальному значению эксплуатационных расходов, а также сделаны рекомендации применения той или иной технологии в зависимости от конкретных производственных условий.

Список литературы

1. «О мерах по дальнейшей реализации Стратегии действий по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан» // Собрание законодательства Республики Узбекистан. – 2017. – № 6 (766). – Статья 70. – Текст : непосредственный.
2. Концепция развития железнодорожного транспорта Республики Узбекистан до 2024 года. – Ташкент: АО «УТЙ», 2019. – 58 с. – Текст : непосредственный.
3. Новакович, В. И. Перспективы совершенствования конструкции верхнего строения железнодорожного пути / В. И. Новакович. – Текст : непосредственный // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 4. – С. 65–69.
4. Суслов, О. А. Применение экскаваторов на комбинированном ходу при укладке плетей бесстыкового пути / О. А. Суслов, У. Э. Эргашев. – Текст : непосредственный // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2019. – Т. 1. – С. 390–394.
5. Суслов, О. А. Технология производства работ по замене инвентарных рельсов плетями с применением навесного оборудования для экскаваторов на комбинированном ходу / О. А. Суслов, У. Э. Эргашев. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. – 2022. – № 3 (93). – С. 28–32.
6. Эргашев, У. Э. Двойной роликовый рельсовый захват / У. Э. Эргашев. – Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. – 2021. – № 3. – С. 37–39.
7. Расулев, А. Ф. Рельсовый роликовый захват для укладки плетей бесстыкового пути / А. Ф. Расулев, И. И. Кузнецов, У. Э. Эргашев. – Текст : непосредственный // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте. – Ташкент. – 2018. – С. 127–130.
8. Экономика путевого хозяйства : учебник / В. Я. Шульга, В. И. Ангелейко, А. А. Комаров [и др.]; под ред. В. Я. Шульги. – Москва : Транспорт, 1988. – 303 с. – Текст : непосредственный.
9. Методические рекомендации по определению экономического эффекта в путевом хозяйстве при внедрении ресурсосберегающих технологий содержания и ремонта пути. Утв. МПС №А-105у от 03.02.1995 г. // Путь и путевое хозяйство. – 1995. – № 6. – С. 6–10. – Текст : непосредственный.
10. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. – Текст : электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005634> (дата обращения: 23.02.2022).
11. Гогричиани, Г. В. Объективное определение по результатам сравнений (испытаний) перспективного объекта при неограниченном множестве рассматриваемых противоречивых критериев / Г. В. Гогричиани. – Текст : непосредственный // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2006. – № 6. – С. 14–15.

12. Измайкова, А. В. Экономическая оценка перспективных инновационных проектов в сфере железнодорожного транспорта / А. В. Измайкова. – Текст : непосредственный // Экономика железных дорог. – 2015. – № 12. – С. 44–54.

13. ГОСТ 15467–79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – Текст : непосредственный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200001719> (дата обращения: 23.02.2022).

14. Оценка экономической эффективности инвестиций и инноваций на железнодорожном транспорте : учебное пособие / под ред. Б. А. Волкова. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2009. – 152 с. – Текст : непосредственный.

15. Ильиных, А. С. Оценка эффективности применения инновационной путевой техники при ремонте и содержании железнодорожного пути / А. С. Ильиных, Г. Г. Ядрошникова, М. С. Галай. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 3 (42). – С. 19–25.

16. Расчеты экономической эффективности применения машин в строительстве / под ред. С. Е. Канторера. – Москва : Стройиздат, 1972. – 487 с. – Текст : непосредственный.

17. Лысенко, Н. Н. Ресурсосберегающие технологии и средства их реализации по транспортировке, замене и укладке рельсовых плетей бесстыкового пути на бесподкладочных скреплениях : специальность 05.22.06 «Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лысенко Николай Николаевич; Московский гос. ун-т путей сообщения. – Москва, 2004. – 294 с. – Текст : непосредственный.

18. Применение экскаватора-погрузчика KGT-4RS при замене инвентарных рельсов плетями / А. А. Корсаков, Д. С. Федасов, Н. Г. Гринчар, М. Ю. Чалова. – Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. – 2018. – № 3. – С. 32–34.

19. Методические указания по определению экономической эффективности новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. – Минск : Полымя, 1979. – 144 с. – Текст : непосредственный.

20. Исследование работы бесстыкового пути в условиях АО «УЖД» : отчет о НИР (промежуточ.); руководитель К. С. Лесов. – Ташкент : Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта, 2017. – 194 с. – Текст : непосредственный.

21. Мальцев, А. П. Разрядка температурных напряжений в плетях с применением устройства УГ70/400 / А. П. Мальцев. – Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. – 2018. – № 10. – С. 20–23.

References

1. «On measures for further implementation of the Strategy of actions in the five priority areas of the Republic of Uzbekistan». *Sobranie zakonodatel'stva Respubliki Uzbekistan – Collection of Legislation of the Republic of Uzbekistan*, 2017, no. 6 (766), dated February 13, 2017 Article 70.

2. The concept of development of railway transport of the Republic of Uzbekistan until 2024. Tashkent, JSC «UTJ», 2019, 58 p.

3. Novakovich V.I. Prospects for improving the design of railroad track superstructure. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobsheniya – Proceedings of Rostov State University of Railway Transport*, 2016, no. 4, pp. 65–69 (In Russian).

4. Suslov O.A., Ergashev U.E. Using excavators on combined travel when laying continuous welded track. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona – Transport infrastructure of the Siberian region*, 2019, vol. 1, pp. 390–394 (In Russian).

5. Suslov O.A., Ergashev U.E. Work technology for replacing the inventory rails with plait using the attached equipment for excavators on the combined move. *Vestnik transporta Povolzhya – Bulletin of transport of the Volga region*, 2022, no. 3 (93), pp. 28–32 (In Russian).

6. Ergashev U.E. Double roller rail capture. *Put i putevye hozyajstvo – Railway Track and Facilities*, 2021, no. 3, pp. 37-39 (In Russian).
7. Rasulev A.F., Kuznecov I.I., Ergashev U.E. Rail roller gripper for laying of continuous welded track. *Resursosberegayushie tehnologii na zhelezнодорожном транспорте – Resource-saving technologies in railway transport*, Tashkent, 2018, pp. 127-130.
8. Shulga V.Ya., Angelejko V.I., Komarov A.A. and others. *Ekonomika putevogo hozyajstva* (Economics of track facilities). Moscow, Transport Publ., 1988, 303 p. (In Russian).
9. Methodical recommendations for determining the economic effect in track facilities when introducing resource-saving technologies of track maintenance and repair. *Put i putevye hozyajstvo – Railway Track and Facilities*, 1995, no. 6, pp. 6-10 (In Russian).
10. *Metodicheskie rekomendacii po ocenke effektivnosti investicionnyh proektov* [Methodical recommendations for assessing the effectiveness of investment projects]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200005634> (accessed 23.02.2022).
11. Gogrichiani G.V. Objective definition according to the results of comparisons (tests) of the prospective object with an unlimited set of contradictory criteria under consideration. *Vestnik Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zhelezнодорожного транспорта – The Russian Railway Science Journal*, 2006, no. 6, pp. 14-15 (In Russian).
12. Izmajkova A.V. Economic evaluation of promising innovative projects in the field of railway transport. *Ekonomika zheleznyh dorog – Economics of railroads*, 2015, no. 12, pp. 44-54 (In Russian).
13. International Standard 15467-79. Product quality management. Basic concepts. Terms and definitions. Moscow, Standardinform, 2009, 22 p. (In Russian).
14. Volkov B. A. ed. *Ocenka ekonomicheskoy effektivnosti investicij i innovacij na zhelezнодорожном транспорте* (Assessment of the economic efficiency of investment and innovation in the railway transport). Moscow: Training and Methodological Center for Education on Railway Transport Publ., 2009, 152 p. (In Russian).
15. Ilinyh A.S., Yadroshnikova G.G., Galaj M.S. Evaluating the effectiveness of innovative track machinery in the repair and maintenance of railroad tracks. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobsheniya – Bulletin of the Siberian State University of Railway Transport*, 2017, no. 3 (42), pp. 19-25 (In Russian).
16. Kantorer S.E. ed. *Raschety ekonomicheskoy effektivnosti primeneniya mashin v stroitel'stve* (Calculations of economic efficiency of machines in construction). Moscow, Strojizdat Publ., 1972, 487 p. (In Russian).
17. Lysenko N.N. *Resursosberegayushie tehnologii i sredstva ih realizacii po transportirovke, zamene i ukladke rel'sovyh pletej besstykovogo puti na bespodkladnyh skreplenyah* (Resource-saving technologies and their implementation means for transportation, replacement and laying of continuous welded rail tracks on unlined fasteners). Doctor's thesis, Moscow, 2004, 294 p. (In Russian).
18. Korsakov A.A., Fedasov D.S., Grinchar N.G., Chalova M.Yu. Using the KGT-4RS backhoe loader when replacing inventory rails with braids. *Put i putevye hozyajstvo – Railway Track and Facilities*, 2018, no. 3, pp. 32-34 (In Russian).
19. Methodological guidelines for determining the economic efficiency of new techniques, inventions and rationalization proposals. Minsk, Polymya Publ., 1979, 144 p.
20. Lesov K.S. director. *Issledovanie raboty besstykovogo puti v usloviyah AO «UZHD»: otchet o nauchno-issledovatel'skoi rabote (promezhutochnyi)* [Study of the work of the continuous welded track in the conditions of JSC «UR»: research report (interim)]. Tashkent, Tashkent Institute of Railway Transport Engineers Publ., 2017, 194 p.
21. Malcev A.P. Discharging thermal stresses in braids using UG70/400 device. *Put i putevye hozyajstvo – Railway Track and Facilities*, 2018, no. 10, pp. 20-23 (In Russian).

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Эргашев Улугбек Эркинжон угли

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Адылходжаева ул., д. 1, Миробадский район, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Ассистент кафедры «Инженерия железных дорог», ТГТрУ.

Тел.: (+99890) 010-55-25.

E-mail: ulugbek.ergashev.1988@mail.ru

Бегматов Нодир Исмаилович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Адылходжаева ул., д. 1, Миробадский район, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Ассистент кафедры «Инженерия железных дорог», ТГТрУ.

Тел.: (+99890) 939-35-58.

E-mail: nodir.begmatov.89@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Эргашев, У. Э. Эффективность применения технологии замены рельсовых плетей с использованием навесных оснасток / У. Э. Эргашев, Н. И. Бегматов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – Омск. – 2022. – № 4 (52). – С. 132 – 141.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ergashev Ulugbek Erkinjon ugli

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Adilkhodjaev st., Mirobad region, Tashkent, 100167, Republic of Uzbekistan.

Assistant of the Department «Railway Engineering», TSTU.

Phone: (+99890) 010-55-25.

E-mail: ulugbek.ergashev.1988@mail.ru

Begmatov Nodir Ismailovich

Tashkent State Transport University (TSTU)

1, Adilkhodjaev st., Mirobad region, Tashkent, 100167, Republic of Uzbekistan.

Assistant of the Department «Railway Engineering», TSTU.

Phone: (+99890) 939-35-58.

E-mail: nodir.begmatov.89@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Ergashev U.E., Begmatov N.I. The effectiveness of the technology of replacing rail lashes with the use of attachments. Journal of Transsib Railway Studies, 2022, no. 4 (52), pp. 132-141 (In Russian).

Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

- подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация;
- управление процессами перевозок;
- железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог;
- транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;
- теоретическая и прикладная теплотехника;
- энергетические системы и комплексы;
- электроэнергетика;
- электротехнические комплексы и системы;
- автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционного совета журнала Иванченко Владимиру Ивановичу по электронной почте: izvestia_transsiba@mail.ru.

Правила представления материалов научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

В редакцию Журнала представляются:

1. Текст статьи на бумаге формата А4.
2. Текст статьи в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc или фамилия.docx.
3. Экспертное заключение о возможности публикации статьи в открытой печати (по форме, принятой в организации авторов).
4. Отчет о проверке на заимствования в системе «Антиплагиат» (<https://www.antiplagiat.ru/>). Оригинальность должна составлять не менее 80 %.

5. Гарантийное письмо о передаче авторского права с подписями всех соавторов статьи.

В тексте статьи обязательно указывается тематический раздел журнала, в который подается статья и научная специальность, которой она соответствует.

Текст статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию (место работы или учебы) авторов, название статьи, аннотацию, ключевые слова (5 – 10 слов) на русском и английском языках, текст статьи, список литературы (объем списка литературы – не менее 10 наименований), транслитерацию и перевод списка литературы в романском алфавите, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках. Текст статьи оформляется в соответствии с образцом.

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень и звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи.

Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим основные фактические сведения и выводы описываемой работы; текст аннотации должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок; сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы, метод или методологию проведения работы, результаты работы, область применения результатов, выводы;

дополнительно англоязычная аннотация должна быть оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований), структурированной (следовать логике описания результатов в статье), «англоязычной» (написанной качественным английским языком), необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию на русском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы: формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей: 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста: Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (выполняются только в редакторе MathType): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт; начертание и размер символов в расшифровке формул по тексту должны в точности совпадать с начертанием и размером символов в самой формуле; при записи формул следует использовать значок градуса (°), а не цифру «ноль» (0); следует использовать знак умножения (×), а не букву «х»; в качестве знаков препинания между словами используются тире (–), а не дефисы (-); необходимо использовать французские кавычки («ёлочки»);

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисуночные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт; межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см; автоматическую нумерацию необходимо полностью исключить; инициалы и фамилии не должны отделяться друг от друга;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в отдельном (исходном) файле в редактируемом виде; рисунки и таблицы должны иметь только книжную ориентацию;

после текста статьи следуют списки литературы на русском языке и в романском алфавите (латинице) с переводом названий литературных источников на английский язык; ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовок *Список литературы* (рекомендуется 10 наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ Р 7.0.100–2018; в романском алфавите (латинице) список литературы имеет заголовок *References* и оформляется в соответствии с образцом;

при публикации научной статьи на русском языке обязательным является наличие ключевых слов и аннотации на русском и английском языках; публикация статей с полным текстом на иностранном языке не допускается.

Материалы статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число авторов статьи не должно превышать трех человек, в ином случае необходимо отдельное согласование с редакцией. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц без учета аннотаций и списков литературы. В ином случае вопрос по объему статьи также необходимо согласовать с редакцией журнала. Иллюстрации, схемы, таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста. Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации в разных выпусках Журнала.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления считается день получения редакцией окончательного текста. Принятые к публикации материалы статей не возвращаются авторам. Материалы, оформленные с нарушением указанных выше требований, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

Научное издание

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

№ 4 (52) 2022

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзором), реестровый номер ПИ № ФС77-75780 от 23 мая 2019 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в официальном каталоге «Подписные издания» АО «Почта России» – ПП914.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Издание выходит с периодичностью 4 выпуска в год.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.

Технический редактор – Иванченко В. И.

Адрес редакции (издательства) и типографии:

644046, Омская область, г. Омск, пр. Маркса, д. 35;

тел.: +7 (3812) 31-05-54;

e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 26.12.2022.

Формат 60 × 90/8.

Тираж 250 экз.

Дата выпуска: 30.12.2022.

