

На правах рукописи



Гордеев Антон Владимирович

**РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ВЕРХНЕГО
СТРОЕНИЯ ПУТИ В ТОННЕЛЯХ, С УЧЕТОМ ИХ ВИБРОЗАЩИТНОЙ
ФУНКЦИИ**

2.9.2. Железнодорожный путь,
изыскание и проектирование железных дорог

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ).

Научный руководитель:

Ашпиз Евгений Самуилович,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Краснов Олег Геннадьевич,
доктор технических наук
акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава», отдел пути и специального подвижного состава, заведующий отделом.

Третьяков Василий Владимирович,
кандидат технических наук,
заместитель генерального директора по инфраструктуре пути ООО «Алгоритм С»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Защита состоится «12» декабря 2024 года в 12:00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.03 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9 (ул. Часовая, д. 22/2, стр. 1, ауд. 329).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.rut-miit.ru.

Автореферат разослан «___» октября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Гринь Елена Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современных условиях одним из главных стратегических направлений развития железнодорожного транспорта общего пользования является продление ресурса железнодорожного пути в зависимости от фактических и перспективных условий организации движения, в том числе с повышенными осевыми нагрузками, что предполагает обновление железнодорожного пути с применением новых технологий, обеспечивающих снижение стоимости жизненного цикла содержания инфраструктуры. Это требование относится и к конструкции железнодорожного пути, расположенного в тоннеле, где особые условия эксплуатации вызывают необходимость отдельного рассмотрения работы данной конструкции. К таким особенностям относятся: более жёсткое основание пути, приводящее к повышенному вибродинамическому воздействию подвижного состава на путь и тоннель, и сложности проведения ремонтных работ, вызванные стеснённостью пространства в тоннеле и невозможностью выполнения традиционных работ по очистке балластного слоя. Также в тоннеле более высокой является цена отказа в работе железнодорожного пути, последствия которого могут быть существенными, а его устранение – более длительным.

Данные особенности приводят к сокращению срока службы элементов верхнего строения пути (далее – ВСП) в тоннелях и более частому возникновению расстройств геометрии пути (далее – ГРК) и деформаций в конструкциях тоннеля; кроме того, при расположении тоннелей вблизи городской застройки вибрации негативно сказываются на окружающих зданиях и сооружениях. Сложность поддержания в эксплуатации балластного слоя в исправном состоянии в последние годы привела к укладке при новом строительстве и реконструкции существующих тоннелей безбалластных конструкций (далее – БКП) железнодорожного пути, однако недостатком этих конструкций является ещё большая жёсткость основания, чем у пути на балласте, поэтому проблема повышенного динамического воздействия на конструкции пути и тоннеля при проходе поездов не только не снялась, но, наоборот, стала острее.

Решение этой проблемы возможно при устройстве пути с различными упругими элементами (далее – УЭ), и на ряде тоннелей в России и за рубежом были применены безбалластные конструкции с различными УЭ, но широкое исследование их работы не проводилось, и не до конца изученным остался вопрос назначения параметров виброзащиты в разных условиях. В связи с этим актуальным является исследование применения различных вариантов виброзащиты для конструкций пути в тоннелях с разработкой критериев по их выбору на основе требований снижения динамики взаимодействия с подвижным составом и ограничения уровня вибраций, возникающих при проходе поездов.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами воздействия поездной нагрузки на элементы железнодорожного пути ученые занимались с самого зарождения железнодорожного транспорта. Крупный вклад в теорию колебания элементов пути при взаимодействии с подвижным составом внесли такие отечественные ученые, как Н.П. Петров, С.П. Тимошенко, К.Ю. Цеглинский, Н.Т. Митюшин, Г.М. Шахунянц, М.Ф. Вериги, А.Я. Коган, В.А. Лазарян, В.Ф. Яковлев, М.А. Чернышев, М.А. Фришман, В.С. Лысюк, В.Б. Каменский и др. Среди работ зарубежных ученых необходимо отметить труды: Н. Zimmermann, J. Eisenmann, С. Esveld, E.T. Selig, J.M. Waters и др.

Вопросами конструкций пути в тоннелях и безбалластных конструкций и их жесткостных параметров занимались отечественные ученые: В.Г. Альбрехт, С.И. Клинов, Н.Д. Кравченко, В.Я. Клименко, В.Ф. Барабошин, А.В. Савин, Г.М. Стоянович, А.В. Замуховский, А.Н. Грановский, В.Ю. Поляков и др.

Цель исследования состоит: 1) в оценке колебания элементов конструкции ВСП под воздействием подвижной нагрузки; 2) разработке критериев выбора параметров этой конструкции с учетом снижения уровней вибраций на элементах ВСП и обделке тоннеля, обеспечивающих долговечность её работы, и снижение уровня вибраций до допустимых норм для тоннелей, расположенных в черте городской застройки.

Для достижения этой цели в диссертационной работе были поставлены и решены следующие задачи:

- провести сравнительный анализ технического состояния уложенных конструкций ВСП в тоннелях на сети ОАО «РЖД»;
- определить исходные параметры для математического моделирования взаимодействия пути в тоннеле и подвижного состава в том числе с различными конструкциями виброзащиты;
- адаптировать принципиальные модели взаимодействия пути и подвижного состава в тоннеле с учетом новых конструкций пути;
- оценить на основе натурных измерений поведение элементов конструкции ВСП и обделки тоннеля под воздействием подвижной нагрузки;
- провести лабораторные исследования эластичного подбалластного мата после его длительной эксплуатации в пути в тоннеле;
- разработать критерии для выбора конструкций ВСП в тоннеле и дать рекомендации по назначению различных типов конструкций.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 1) на основе анализа состояния пути в существующих тоннелях на сети железных дорог АО «РЖД» получена сравнительная оценка надежности различных типов подрельсового основания;
- 2) для различных конструкций ВСП в тоннеле методом математического моделирования определены зависимости прогибов рельсов и амплитуд виброускорений подрельсового основания от скорости движения поезда и нагрузки на ось;
- 3) по результатам экспериментальных работ расширена сфера применения существующей математической модели для определения колебания подрельсового основания пути в тоннеле и для различных его типов уточнены величины колеблющихся масс пути;
- 4) экспериментально на опытных участках определены амплитуды и спектры виброускорений при проходе поездов на ВСП и обделке тоннелей с балластными и безбалластными конструкциями, в том числе при различных виброгасящих элементах;

5) лабораторным путем получена оценка изменения виброзащитных свойств упругого мата после 20-летней его эксплуатации в железнодорожном тоннеле;

6) разработаны критерии выбора параметров конструкции пути в железнодорожных тоннелях.

Теоретическая значимость работы заключается в:

– анализе типов конструкций пути в тоннелях на сети железных дорог и состояния пути в зависимости от типа подрельсового основания;

– определении в натуральных условиях при проходе поездов количественных значений параметров вибрационного воздействия на ВСП и обделку тоннеля для различных конструктивных решений, в том числе с элементами виброзащиты;

– адаптации моделей и предложении необходимых исходных данных для расчёта взаимодействия подвижного состава и конструкций пути в тоннеле с различными элементами виброзащиты;

– полученной математическим моделированием оценке зависимости силовых и деформационных параметров воздействия поездов на ВСП различных конструкций в тоннеле, в том числе с виброзащитой, при различных нагрузках на ось и скоростях движения поездов;

– выработке критериев выбора конструкции ВСП в тоннеле.

Практическая значимость работы состоит в том, что:

1) определённые параметры элементов конструкции ВСП в тоннеле позволяют оптимизировать требования к этим конструкциям, что обеспечивает требуемую долговечность конструкции пути и санитарные нормы воздействия железнодорожного транспорта в условиях городской застройки;

2) адаптированные для конструкций ВСП в тоннеле математические модели и их компьютерные реализации позволяют определить необходимые упругие свойства элементов в конструкции для проектирования при строительстве новых линий или реконструкции пути.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач в диссертационной работе применены: сбор и анализ данных по конструкциям ВСП в тоннелях на сети железных дорог ОАО «РЖД» и их отказам; проведение полевых

экспериментов по определению параметров вибраций на конструкциях пути и тоннеля; выполнение лабораторных испытаний по определению жёсткости подбалластного мата; теоретические исследования по моделям пути в тоннеле, описывающие воздействие вибродинамических сил от подвижного состава и математическое моделирование взаимодействия пути в тоннеле и подвижного состава.

Положения, выносимые на защиту:

1) результаты анализа состояния конструкций ВСП в тоннелях на сети железных дорог АО «РЖД»;

2) результаты натурального эксперимента по определению вибрационного воздействия на ВСП и обделку тоннеля на опытных участках Московской, Горьковской и Северо-Кавказской железных дорог;

3) результаты лабораторного эксперимента по определению жёсткости подбалластного мата после его длительной эксплуатации в пути в тоннеле;

4) модели и исходные данные для расчёта взаимодействия различных конструкций пути с виброзащитой в тоннеле и подвижного состава;

5) полученные при моделировании зависимости деформационного состояния конструкций ВСП в тоннеле с различными элементами виброзащиты;

6) критерии выбора конструкций пути в тоннелях по условиям виброзащиты.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность научных исследований и заключений основана на корректном использовании теории колебания пути и основных положений теории взаимодействия пути с подвижным составом, натуральных и лабораторных экспериментах, выполненных на поверенном оборудовании и по апробированным методикам, корректной статистической обработке результатов экспериментов, применении для моделирования сертифицированного программного комплекса «Универсальный механизм» с модулем «Упругий путь», а также на хорошей сходимости результатов моделирования и натурального эксперимента с результатами, полученными другими исследователями.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

– XVI Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути» памяти профессора Георгия Михайловича Шахунянца (Москва, РУТ (МИИТ), 2019 год);

– Научно-техническая конференция «Применение прогрессивных технологий в подземном строительстве» (Казань, ТАР, 2023);

– Международная научно-практическая конференция «Безопасность движения поездов» (Москва, РУТ (МИИТ), 2023 год).

Диссертационная работа на основе докладов была одобрена на заседании кафедры «Путь и путевое хозяйство», РУТ (МИИТ), 16.04.2024 г.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает в себя Введение, 4 главы, Заключение, список литературы и приложения. Работа изложена на 151 странице машинописного текста, в том числе 33 таблицы, 78 рисунков. Список литературы насчитывает 156 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполненной работы, проанализирована степень разработанности темы, определены цель и предмет исследования, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен аналитический обзор конструкций ВСП в железнодорожных тоннелях, в котором описан опыт эксплуатации и содержания балластных и безбалластных конструкций. Приведена классификация конструкций ВСП в железнодорожных тоннелях в соответствии с СП 441.1325800.2019, на основе которой выполнялся анализ технического состояния пути по информации о нарушениях нормальной работы технических средств хозяйства пути и сооружений, передаваемой в КАС АНТ. Анализ проводился по отказам 3-й категории. При анализе оценивалось состояние ВСП в железнодорожных тоннелях, в которых эксплуатировалось 5 наиболее распространенных типов различных конструкций

подрельсового основания: a_1 – путь на балласте с железобетонными шпалами; a_2 – путь на балласте с деревянными шпалами; e – безбалластная конструкция пути (далее – БКП) без применения упругих элементов (далее – УЭ) в зоне подрельсового основания; $л$ – БКП на блоках типа LVT; $м$ – БКП с упругими матами (система «масса–пружина»). По результатам анализа определены удельные значения отказов на 1 км в год, приведённые в таблице 1, которые показывают, что наибольшее количество отказов получено на балластном пути с деревянными шпалами (тип a_2); это объясняется наличием в этой конструкции звеньев пути, в отличие от остальных, где уложен бесстыковой путь. На втором месте по количеству отказов находится БКП без УЭ (тип e), при этом конструкции БКП с такими элементами (типы $м$ и $л$) имеют удельное количество отказов в 3 раза меньше, чем конструкция типа e . На балластной конструкции с железобетонными шпалами (тип a_1) удельное количество отказов оказалось чуть выше, чем на БКП с УЭ.

Таблица 1 – Удельные значения отказов на 1 км в год

Тип конструкции	Удельные значения отказов на 1 км в год						
	ГРК	Скрепления	Рельсы	Стыковые зазоры	Шпалы	Балласт	Всего
a_1	0,03	–	0,01	–	–	0,05	0,08
a_2	0,28	0,26	0,16	0,02	0,01	–	0,73
e	0,17	0,02	–	–	–	нет	0,18
$л$	–	0,06	–	–	–		0,06
$м$	–	0,06	–	–	–		0,06

В трёх тоннелях Горьковской железной дороги, имеющих БКП на малогабаритных рамах (далее – МГР), проведён анализ количества отступлений геометрии рельсовой колеи (далее – ГРК) по данным проходов путеизмерительных вагонов за 3 года (2019–2021 гг.): тип e (без УЭ) – тоннель № 3А, тип $м$ (конструкция с упругим матом толщиной 22 мм) – тоннель № 4 и тот же тип (27 мм) – тоннель № 4А. По результатам анализа отступлений ГРК на конструкции типа e (без УЭ) зафиксировано 29 отступлений, из которых 8 отступлений по перекоосу, 4 отступления по просадкам рельсовых нитей, 10 отступлений в плане, 1 плавное отклонение по уровню и 6 отступлений по уширению. На конструкции типа $м$ в тоннеле № 4А зафиксировано 11 отступлений, 10 из которых связаны с уширением и одно – с несоответствием паспортного и фактического возвышения в кривой; в тоннеле № 4 отступления не зафиксированы.

Для оценки стабильности ГРК были также выбраны 6 тоннелей, имеющих конструкции пути типа z (с балластом на упругом подбалластном мате), e , l и m , и для них была выполнена статистическая обработка показаний путеизмерительных вагонов в программе Stabway (таблица 2). Анализ конструкций железнодорожного пути в тоннелях показал, что наиболее стабильными являются БКП с применением УЭ в зонах подшпального основания (типы m и l), поэтому они были выбраны в качестве опытных объектов для экспериментальных исследований. Также в качестве опытных участков были приняты Гагаринский тоннель с балластным ВСП и упругими матами (виброзащита применена по условиям расположения на городской территории) и тоннель № 3А на Горьковской ж.д. с БКП без упругих элементов в качестве контрольного для сравнения с типом m .

Таблица 2 – Результаты статистической обработки показаний путеизмерительных вагонов КВЛ-П в тоннелях

Дорога	Тип конструкции	Название тоннеля	Пропущенный тоннаж, млн т брутто на 1 км	Длина тоннеля, м	Средние показатели стабильности пути, мм	
					ССКО	Δ ССКО
Горьк	a_2	№ 3	96,4	775	3,74	0,81
Горьк	e	№ 3А	133,2	61	4,02	0,17
МСК	z	Гагаринский	203,1	918	2,08	0,4
С-Кав	l	Гойтхский	120	1371	1,15	0,02
Горьк	m_1	№ 4	662,7	450	0,70	0,01
Горьк	m_2	№ 4А	932,1	450	0,63	0,01

Во второй главе проведён анализ динамических воздействий на железнодорожный путь в тоннелях с рассмотрением математических моделей взаимодействия пути и подвижного состава применительно к основным типам конструкции ВСП в тоннеле с целью определения напряжённо-деформированного состояния этих конструкций при моделировании, а также сформулированы требования по определению параметров ВСП в тоннеле для моделирования.

При динамическом воздействии подвижного состава на железнодорожный путь в тоннеле колебания (вибрации), возникающие в зоне колесо–рельс, распространяются как на элементы ВСП, что способствует преждевременному расстройству пути, так и на тоннельную обделку, что приводит к трещинообразованию. С учётом повышенной жёсткости основания в тоннеле относительно пути на земляном полотне, эти воздействия имеют большие

величины, поэтому важно свести их к минимуму, за который может быть принято воздействие для пути на земляном полотне.

Для оценки вибраций основных типов конструкций ВСП в тоннеле, возникающих при прохождении подвижного состава, были приняты классические математические модели колебаний рельса как балки на упругом основании. Для моделирования колебаний элементов подрельсового основания балластной конструкции ВСП в тоннеле типа a_1 или z при движении по рельсу подвижной вертикальной нагрузки на основе решения проф. А.Я. Когана была принята трёхмассовая модель конструкции железнодорожного пути, схема которой представлена на рисунке 1.

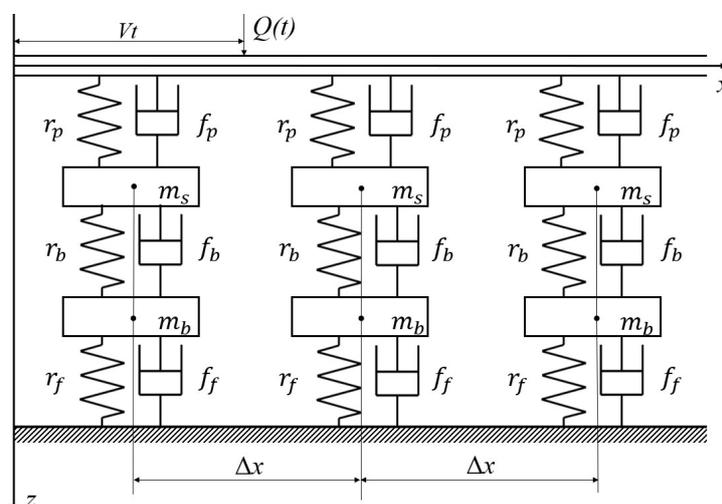


Рисунок 1 – Расчётная схема модели колебания элементов подрельсового основания балластного ВСП в тоннеле

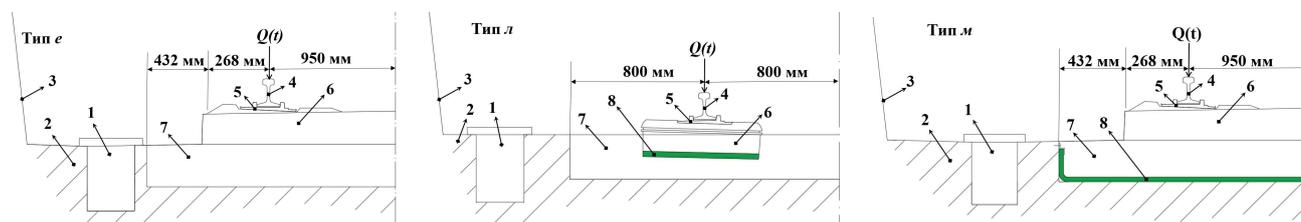
В этой модели по рельсу, расположенному на подрельсовых опорах (полушпалах) и балласте, передвигается колесо, создающее переменную во времени вертикальную силу. Система дифференциальных уравнений, описывающих колебания в данной модели, имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} EI \frac{d^4 z}{dx^4} + M \frac{d^2 z}{dt^2} + f_p \left(\frac{dz}{dt} - \frac{du_s}{dt} \right) + r_p (z - u_s) &= Q(t); \\ m_s \frac{d^2 u_s}{dt^2} - f_p \left(\frac{dz}{dt} - \frac{du_s}{dt} \right) - r_p (z - u_s) + f_b \left(\frac{du_s}{dt} - \frac{du_b}{dt} \right) + r_b (u_s - u_b) &= 0; \\ m_b \frac{d^2 u_b}{dt^2} - f_b \left(\frac{du_s}{dt} - \frac{du_b}{dt} \right) - r_b (u_s - u_b) + f_f \frac{du_b}{dt} + r_f u_b &= 0, \end{aligned} \right\} (1)$$

где E – модуль упругости рельсовой стали, МПа; I – момент инерции рельса относительно его главной горизонтальной оси, см⁴; $Q(t)$ – вертикальная нагрузка, передаваемая от колеса на рельс, кН; z , u_s , u_b – вертикальные перемещения рельса, подрельсовой опоры (полушпалы) и подшпального основания соответственно, мм; r_p , r_b , r_f – вертикальные жёсткости рельсовых креплений, подрельсового и подшпального оснований соответственно, кН/мм; f_p , f_b , f_f – вертикальное демпфирование в рельсовых креплениях, подрельсового и подшпального оснований соответственно; M , m_s , m_b – приведённые к одной опоре массы соответственно колеса с рельсом, подрельсовой опоры (полушпалы) и балласта), кг.

Различие уравнений для балластных конструкций в тоннелях типа a_1 и z состоит в том, что при определении параметров r_f и f_f для типа z дополнительно учитываются характеристики упругого подбалластного мата.

Аналогичная модель может быть составлена для БКП в тоннелях типов e , m и $л$, схемы которых приведены на рисунке 2.



1 – водоотводный лоток; 2 – обратный свод тоннеля; 3 – тоннельная обделка; 4 – рельс;
5 – крепление; 6 – рама МГР или блок LVT; 7 – путевой бетон; 8 – упругий прокладной слой

Рисунок 2 – Схемы подрельсового основания БКП в тоннеле

Отличие модели БКП от предыдущей состоит в том, что в ней отсутствует балластный слой и она, тем самым, становится двухмассовой, при этом для конструкций с МГР приведённая масса подрельсового основания включает часть веса рамы и путевого бетона, приходящуюся на одну точечную опору рельса, а для конструкции с блоками LVT (тип m) – массу подрельсового блока.

Расчётная схема этой модели приведена на рисунке 3, а система дифференциальных уравнений сокращается до двух:

$$\left. \begin{aligned} EI \frac{d^4 z}{dx^4} + M \frac{d^2 z}{dt^2} + f_p \left(\frac{dz}{dt} - \frac{du_s}{dt} \right) + r_p (z - u_s) &= Q(t); \\ m_s \frac{d^2 u_s}{dt^2} - f_p \left(\frac{dz}{dt} - \frac{du_s}{dt} \right) - r_p (z - u_s) + f_f \left(\frac{du_s}{dt} - \frac{du_f}{dt} \right) + r_f (u_s - u_f) &= 0. \end{aligned} \right\} (2)$$

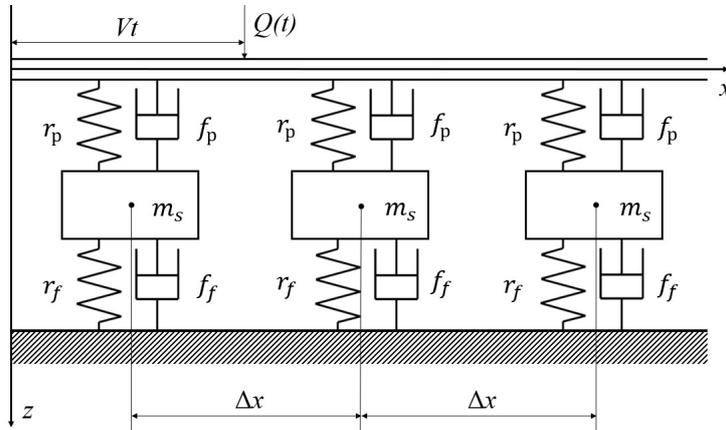


Рисунок 3 – Расчётная схема модели колебания элементов подрельсового основания БКП в тоннеле

Отличие уравнений для БКП в тоннеле типа *e* от конструкций типов *л* и *м* состоит в том, что при определении параметров r_f и f_f для типов *л* и *м* дополнительно учитываются характеристики УЭ между обратным сводом тоннеля и подрельсовым основанием. Отличие конструкции типа *л* от типа *м* заключается в меньшей массе блока m_s . При этом величина вертикальной нагрузки $Q(t)$, согласно трудам Г.М. Шахунянца, может быть определена по формуле:

$$Q(t) = C_{\text{п}} z, \quad (3)$$

где $C_{\text{п}}$ – коэффициент постели подрельсового основания; z – упругая осадка балки (вертикальное перемещение рельса).

Величина коэффициента постели подрельсового основания зависит от погонного коэффициента упругости подшпального основания

$$C_{\text{п}} = E_{\text{по}} \frac{2 \cdot l}{\alpha \cdot a \cdot b}, \quad (4)$$

где $E_{\text{по}} = q/z$ – погонный коэффициент упругости подшпального основания; q – погонный упругий отпор; l – расстояние между осями опор рельса, равное 0,5 м при эпюре 2000 шт./км; a, b – длина и ширина подрельсового основания соответственно; $\alpha = u_s/z$ – коэффициент изгиба подрельсового основания; u_s – средняя величина упругой осадки по подошве подрельсового основания.

Решение систем уравнений (1) для балластных конструкций и (2) для безбалластных конструкций аналитически не представляется возможным ввиду их сложности, потому было применено моделирование, реализованное в двух вычислительных комплексах:

1) Упрощенная модель колебаний одного колеса на рельсе с интегрированием систем уравнений (1) и (2) колебаний 3- и 2-массового подрельсового основания соответственно в среде программирования Simulink на основе MATLAB. При этом для нахождения параметров воздействия на путь в тоннеле требуются и остающиеся неопределёнными параметры колеблющихся масс и масс подрельсового основания, приходящихся на одну опору при различных конструкциях виброзащиты, поэтому подбор этих масс был выполнен в главе 4 настоящей работы по лучшему совпадению амплитуд виброускорений подрельсового основания, полученных в главе 3 на опытных участках.

2) Более сложная модель воздействия всего поезда на конструкцию пути, принятая в широко применяемом в исследованиях взаимодействия подвижного состава и пути сертифицированном программном комплексе «Универсальный механизм» (УМ), позволяющем моделировать вертикальную динамическую нагрузку при прохождении подвижного состава по многослойной конструкции пути с учётом задания различных характеристик ВСП, в том числе с учётом элементов виброзащиты.

Моделирование в комплексе УМ было выполнено для конструкций пути тоннелей экспериментальных участков с их характеристиками в модуле «Упругий путь» при движении пассажирских поездов с осевой нагрузкой $P = 186$ кН со скоростями 60, 80 и 140 км/ч и грузовых поездов с осевой нагрузкой $P = 245$ кН со скоростями 40, 60 и 80 км/ч. Путь в тоннеле моделировался балластными конструкциями (типы a_1 и z) и БКП (без УЭ – тип e и с УЭ – типы l , m_1 и m_2). По результатам моделирования для оценки воздействия на путь при различных типах конструкций были определены средние величины перемещений рельса z (таблица 3) и амплитуд виброускорений в зоне подрельсового основания $A_{\text{по}}$ (таблица 4).

Таблица 3 – Перемещения рельса

Тип конструкции	Перемещение рельса z , мм, при нагрузке на ось, кН					
	186 для скорости, км/ч			245 для скорости, км/ч		
	60	80	140	40	60	80
a_1	0,99	1,02	1,09	1,93	1,95	2,01
z	1,35	1,40	1,49	2,65	2,67	2,76
e	0,35	0,37	0,42	0,75	0,76	0,79
$л$	0,54	0,57	0,60	1,07	1,08	1,11
m_1	0,65	0,67	0,71	1,26	1,27	1,32
m_2	0,70	0,72	0,77	1,36	1,37	1,42

Таблица 4 – Амплитуды виброускорения подрельсового основания

Тип конструкции	Амплитуда виброускорения подрельсового основания $A_{по}$, m/s^2 , при нагрузке на ось, кН					
	186 для скорости, км/ч			245 для скорости, км/ч		
	60	80	140	40	60	180
a_1	13,18	27,04	48,28	17,04	21,43	43,98
z	20,42	41,92	72,00	26,64	33,50	68,76
e	2,45	4,77	9,56	3,20	4,02	7,50
$л$	40,48	83,04	170,46	52,66	66,18	135,80
m_1	6,56	13,45	27,62	8,49	10,69	21,93
m_2	11,54	23,76	44,16	14,97	18,81	39,24

Анализ таблицы 3 показывает, что перемещения рельса мало зависят от скорости движения поезда и в основном определяются жёсткостью подрельсового основания и нагрузкой на ось. Величина перемещения рельса на балластных конструкциях при нагрузке на ось 186 кН составляет около 1 мм без упругих подбалластных матов, увеличиваясь до 1,4–1,5 мм при их наличии, а на БКП без УЭ – около 0,4 мм, увеличиваясь до 0,6–0,8 мм на БКП при устройстве УЭ. При увеличении осевой нагрузки до 245 кН (в 1,32 раза) практически на всех конструкциях перемещения рельса возрастают примерно в 2 раза.

Полученные при моделировании данные хорошо коррелируют с данными зарубежных исследователей. Так, на железных дорогах Германии (DB AG) для старых БКП (без УЭ) были получены перемещения рельса 0,35 мм, а для современных БКП с УЭ – 1,6 мм. И. Айзенман (J. Eisenmann) на основании своих исследований рекомендует оптимальные значения перемещений рельса для балластных конструкций пути в диапазоне 1,2–1,5 мм. На железных дорогах Франции (SNCF) при осевой нагрузке в 20 тонн на балластном пути перемещения рельса составляют 1,5 мм.

Другой характер носит зависимость амплитуд виброускорений (см. табл. 4), которые нелинейно возрастают с ростом скорости движения поездов и меньше зависят от осевой нагрузки. Вторым определяющим фактором для них является колеблющаяся масса подрельсового основания: чем она больше, тем меньше величина $A_{\text{по}}$. Для БКП без УЭ типа *e*, где колеблется целиком большая масса МГР вместе с путевым бетоном, величины $A_{\text{по}}$ не превышают 10 м/с^2 , в то время как на конструкции БКП типа *л*, где масса колеблющегося элемента наименьшая (виброизолированный блок LVT массой около 100 кг), максимальные величины $A_{\text{по}}$ доходят до $135\text{--}170 \text{ м/с}^2$.

Для оценки зависимости величины $A_{\text{по}}$ от скорости движения поезда V для каждого типа конструкции пути методом наименьших квадратов была проведена аппроксимация результатов, полученных при моделировании. В качестве аппроксимирующей функции, с учётом того граничного условия, что при $V = 0$ и $A_{\text{по}} = 0$, была принята квадратичная зависимость вида

$$A_{\text{по}} = a \times V^2 + b \times V, \quad (5)$$

где a и b – коэффициенты аппроксимации, зависящие от типа конструкции и осевой нагрузки, которые приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Коэффициенты аппроксимации

Тип конструкции	Нагрузка на ось 186 кН		Нагрузка на ось 245 кН	
	a	b	a	b
a_1	0,0009	0,2236	0,0047	0,1509
z	0,0011	0,3675	0,0074	0,2362
e	0,0003	0,0336	0,0006	0,0433
$л$	0,0050	0,5234	0,0145	0,4685
$м_1$	0,0008	0,0848	0,0023	0,0754
$м_2$	0,0010	0,1832	0,0044	0,1206

Оценка точности аппроксимации производилась с применением коэффициента детерминации R^2 , который составил более 0,98 для пассажирского и 0,96 для грузового сообщения.

Глава 3 посвящена экспериментальному исследованию параметров колебаний элементов ВСП и обделки тоннеля при проходе поездов на опытных участках, которые были выбраны на основе анализа отказов и отступлений, выполненного в главе 1 настоящей работы (см. табл. 2).

В качестве регистратора параметров колебаний ВСП и обделки тоннеля применялся трёхканальный прибор «Экофизика-110В», предназначенный для измерения общей вибрации одновременно по трем осям (X, Y, Z) в диапазоне 0,8–160 Гц. Измерения выполнялись в сечениях, расположенных непосредственно в тоннелях, где один из датчиков устанавливался на торце шпалы или рамы, а второй – на тоннельной обделке на уровне 1,2 м от головки рельса. Для всех точек измерения проводилась статистическая обработка. При обработке не учитывались одиночные импульсные всплески вибраций во время проходов поездов, значительно превышающие средние значения. В качестве результатов измерений в точке принимались средние значения пиков амплитуд вибраций от прохода всех поездов и проводился также спектральный анализ в точках измерительных сечений в третьоктавном частотном диапазоне. При обработке данных использовались программы WinПОС и Signal+. Расчёт третьоктавных спектров основывался на применении рекурсивной фильтрации и реализовывался по классической схеме: полосовой фильтр – квадратичный детектор – интегратор, в основу которой положено математическое определение спектра мощности.

Для сравнения эффективности виброзащиты были взяты уровни амплитуд виброускорений, направленных перпендикулярно к поверхности подрельсового основания (шпалы, МГР, блока LVT) на пути ($A_{\text{по}}$) и к тоннельной обделке ($A_{\text{т}}$). Примеры записей виброускорений на МГР и тоннельной обделке при проходе грузового поезда на конструкции типа e приведены на рисунке 4, а в таблицах 6 и 7 приведены результаты измерений амплитуд виброускорений под пассажирскими и грузовыми поездами соответственно.

Анализ данных таблиц 6 и 7 показывает, что амплитуды виброускорений подрельсового основания $A_{\text{по}}$ обратно пропорциональны колеблющейся массе пути: чем она больше, тем меньше виброускорения. Минимальные величины амплитуд $A_{\text{по}}$ получены на жёстком пути с БКП без УЭ (тип e), а на конструкциях с УЭ они имеют большой разброс, поэтому оценить эффективность виброзащиты по их величине без дополнительного анализа затруднительно. Более понятная картина с эффективностью виброзащиты представляется по амплитудам виброускорений на тоннельной обделке

A_T : чем эта величина меньше, тем эффективнее виброзащита, и этот параметр может быть принят в качестве критерия её эффективности.

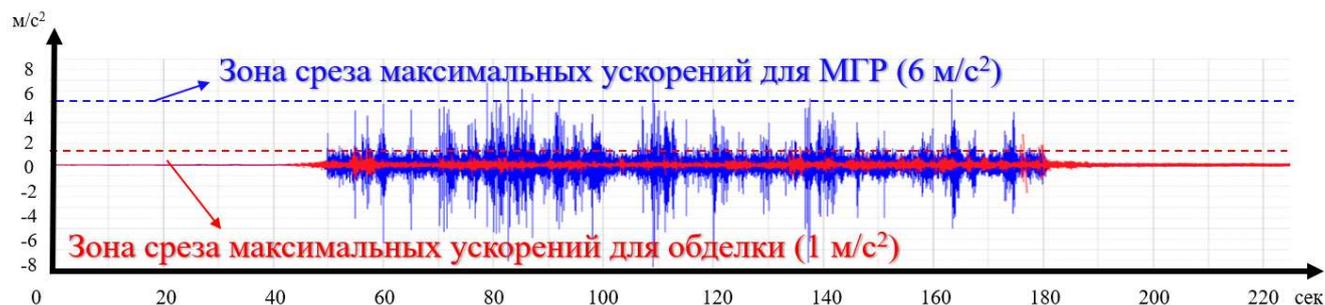


Рисунок 4 – Пример записи виброускорений при проходе поезда в тоннеле № 3А

Таблица 6 – Амплитуды виброускорений под пассажирскими поездами

Тип конструкции	V , км/ч	На подрельсовом основании			На тоннельной обделке		
		Количество измерений	$A_{по}$, м/с ²		Количество измерений	A_T , м/с ²	
			Ср. знач.	СКО		Ср. знач.	СКО
e	59	240	24,79	1,87	200	0,03	0,01
e	51	120	2,39	1,37	108	0,55	0,27
$л$	62	240	53,32	9,85	222	0,04	0,01
$м_1$	57	160	8,21	2,97	137	0,21	0,12
$м_2$	60	120	15,32	5,28	112	0,04	0,02

Таблица 7 – Амплитуды виброускорений под грузовыми поездами

Тип конструкции	V , км/ч	На подрельсовом основании			На тоннельной обделке		
		Количество измерений	$A_{по}$, м/с ²		Количество измерений	A_T , м/с ²	
			Ср. знач.	СКО		Ср. знач.	СКО
e	42	1776	3,11	2,51	1698	0,47	0,17
$л$	52	990	33,46	5,32	795	0,11	0,01
$м_1$	35	1700	5,77	3,03	1473	0,24	0,09
$м_2$	55	1706	13,15	6,31	1579	0,08	0,01

Обращает на себя внимание то, что в тоннеле № 4 (тип $м_1$) величины виброускорений на подрельсовом основании оказались в 2–2,5 раза меньше, чем для аналогичной по типу конструкции тоннеля № 4А, имеющего более упругий мат под МГР, при этом на тоннельной обделке они оказались, наоборот, уже в 3–5 раз больше, что свидетельствует о недостаточно эффективном гашении вибраций при принятых параметрах конструкции для тоннеля № 4.

На основании данных экспериментов могут быть назначены количественные значения критерия эффективности гашения вибраций по величине A_T : для пассажирского движения – исходя из неперевышения 0,05 м/с², а для грузового – не более 0,1 м/с². Для оценки эффективности гашения вибраций на тоннельной обделке в условиях селитебной застройки, где виброускорения нормируются отдельно в частотных диапазонах 4, 8, 16, 31,5 и 63 Гц (СП 441.1325800), рассматривалось

разложение виброускорений по частотам в третьоктавном спектре в децибелах. В таблице 8 приведены уровни вибраций по диапазонам приведённых частот на тоннельной обделке.

Таблица 8 – Уровни вибраций на тоннельной обделке

Частота	Уровни виброускорений на обделке, дБ								
	Пассажирское сообщение					Грузовое сообщение			
	<i>г</i>	<i>е</i>	<i>л</i>	<i>м</i> ₁	<i>м</i> ₂	<i>е</i>	<i>л</i>	<i>м</i> ₁	<i>м</i> ₂
4 Гц	38,8	61,4	43,8	52,0	51,1	72,4	56,1	57,3	51,2
8 Гц	40,3	64,5	50,3	52,5	55,0	75,4	56,5	58,7	52,6
16 Гц	49,4	75,6	59,4	63,1	65,5	85,8	65,6	73,3	56,2
31,5 Гц	55,3	96,5	67,3	79,4	72,4	101,2	76,5	86,6	72,5
63 Гц	59,6	117,6	71,6	85,5	76,0	110,1	85,8	99,8	82,7

Анализ результатов, представленных в таблице 8, показал, что при конструкции типа *е* без применения УЭ уровни вибраций на тоннельной обделке существенно выше, чем при виброзащитных конструкциях, во всех частотных диапазонах.

Наименьшие уровни (до 52 дБ) в зоне низких частот зафиксированы на конструкции типа *г* с применением подбалластных матов, что объясняется наличием балластного слоя, позволяющего упруго перерабатывать динамические воздействия на путь. При сравнении БКП с УЭ при пассажирском сообщении наименьшие уровни зафиксированы на типе *л*, а при грузовом – на типе *м*.

Кроме полевых, были выполнены лабораторные испытания образца размером 300×300×36,4 мм из подбалластного мата конструкции типа *г* со сроком эксплуатации 20 лет, целью которых являлось определение возможного изменения его жёсткости. Испытания показали, что при уменьшении толщины образца на 1,1 мм (2,9%) жёсткость мата после его эксплуатации в пути практически не изменилась.

Глава 4 посвящена анализу результатов моделирования и параметров колебательного процесса, полученных на опытных участках, определению величин колеблющихся масс для разных типов конструкций, оценке достоверности этих результатов и разработке критериев виброзащиты и алгоритма выбора конструкции пути в железнодорожных тоннелях.

Для определения параметров колеблющихся масс в упрощенной модели на основе MATLAB было выполнено моделирование вариантов при разной длине колеблющегося пути и разных типах конструкций ВСП. При этом в качестве критерия

сходимости было принято наилучшее совпадение с полученными на опытных участках величинами средних амплитуд виброускорений $A_{по}$ в частотном диапазоне до 16 Гц, который учитывается в модели. Длина пути и соответствующие колеблющиеся массы подрельсового основания принимались дискретно шагу рельсовых опор l_0 : для балластного пути – междушпальному расстоянию 0,5 м, для БКП на МГР – длине рамы 2,0 м, для БКП на блоках LVT – расстоянию между блоками 0,5 м. По результатам моделирования наилучшее приближение к измерениям на опытных участках было получено: для балластного пути с подбалластными матами (тип g) – при колебаниях пути на 5 шпалах (общая длина колеблющегося рельса – 2,5 м); для БКП на МГР без УЭ (тип e) – при колебаниях пути на двух рамах (общая длина колеблющегося рельса – 4,0 м); для БКП на МГР с УЭ (типы m_1 и m_2) – при колебаниях пути на одной раме (общая длина колеблющегося рельса – 2,0 м), а для БКП на блоках LVT (тип l) – при колебаниях пути на 5 блоках (общая длина колеблющегося рельса – 2,5 м).

Полученные данные для балластного пути хорошо коррелируют с величинами, полученными ранее другими исследователями, согласно которым, в зависимости от модуля упругости пути, величина длины колеблющегося пути может быть принята в расчётах в пределах от 2 до 4 м.

В таблице 9 для разных типов конструкций ВСП в тоннеле приведено сопоставление амплитуд виброускорений $A_{по}$, найденных по результатам расчёта в среде MATLAB, со средними величинами по измерениям на опытных участках, которые показывают, что получена достаточно хорошая сходимость результатов моделирования с фактически измеренными в пути на опытных участках средними величинами амплитуд виброускорений.

Для верификации упрощённой модели в среде MATLAB было проведено сравнение величин перемещений рельса z для разных типов конструкций пути в тоннеле при разных нагрузках на ось и скоростях движения, полученных этим методом, с величинами, полученными по более сложной модели УМ, которое показало, что среднее расхождение перемещений рельса составило 6% при

максимальных значениях до 12%, что указывает на хорошую точность использованного в работе вычислительного комплекса на основе MATLAB.

Таблица 9 – Сопоставление амплитуд виброускорений

Движение	V , км/ч	Тип конструкции	Амплитуды виброускорений $A_{по}$, м/с ²	
			Расчётные	Средние измеренные на опытных участках
Пассажирское	59	z	2,86	3,05
	51	e	0,37	0,59
	62	$л$	3,50	3,70
	57	m_1	0,83	0,77
	60	m_2	1,22	1,20
Грузовое	42	e	0,56	0,65
	52	$л$	4,17	4,11
	35	m_1	1,06	0,88
	55	m_2	1,46	1,30

Проведённый анализ работы различных конструкций пути в тоннеле показывает, что достичь схожих с традиционной балластной конструкцией параметров пути в тоннеле возможно применением упругого слоя, расположенного между путевым бетоном и обратным сводом тоннеля или между блоком и путевым бетоном. При этом в качестве критериев эффективности виброзащиты конструкции пути в тоннелях могут быть предложены полученные при моделировании перемещения рельсов в пределах от 0,6 до 1,2 мм для пассажирского сообщения и в пределах от 1,2 до 2 мм для грузового, а также величины амплитуд виброускорений подрельсовых оснований при расчётной скорости 60 км/ч, которые должны находиться в пределах $5 \div 20$ м/с².

Результаты исследований также показывают, что для тоннелей с преимущественно тяжеловесным движением целесообразно применять конструкцию пути типа m (рамы или плиты на упругом мате), а при пассажирском движении – типа $л$ (блоки LVT). Однако при этом каждый случай устройства виброзащиты пути в тоннеле должен иметь расчётное обоснование, которое может быть выполнено по предложенному алгоритму с определением прогибов рельсов и подбором характеристик под рекомендуемые критерии в зависимости от обращающегося подвижного состава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Проведен анализ отказов различных балластных и безбалластных конструкций ВСП в тоннелях на сети железных дорог с оценкой наиболее уязвимых элементов подрельсового основания, который подтвердил, что наиболее перспективными являются БКП с применением УЭ в зонах подшпального основания.

2) Адаптированы известные модели взаимодействия подвижного состава и пути и предложены необходимые исходные данные для расчёта конструкций пути в тоннеле с различными элементами виброзащиты.

3) Определены исходные параметры для математического моделирования взаимодействия пути в тоннеле и подвижного состава, в том числе с различными типами конструкций ВСП.

4) Получены зависимости амплитуд виброускорений подрельсового основания и перемещений рельса от осевой нагрузки и скорости движения поезда на основе математического моделирования для разных типов конструкций ВСП в тоннелях, в том числе с УЭ.

5) Выполнены натурные измерения в тоннелях с различными конструкциями ВСП в том числе с УЭ при проходе поездов, получены амплитуды и спектры виброускорений на ВСП и обделке тоннеля, позволившие выполнить валидацию математических моделей и предложить численные значения для критериев эффективности виброзащиты.

6) Проведены лабораторные испытания, по результатам которых выполнена оценка виброгасящих свойств упругих матов после их 20-летней эксплуатации в железнодорожном тоннеле, которые показали их стабильность.

7) Разработаны критерии эффективности виброзащиты при выборе конструкций ВСП в тоннеле на основе экспериментальных исследований и математического моделирования.

8) Предложен алгоритм выбора конструкции ВСП в тоннеле на основе моделирования в среде MATLAB и с применением «Универсального механизма».

9) Рекомендуются принять получаемые в результате математического моделирования критерии по разработанному вычислительному комплексу на основе

MATLAB, перемещения рельсов в пределах от 0,6 мм до 1,2 мм для пассажирского сообщения и в пределах от 1,2 мм до 2 мм грузового движения. Для тоннелей в пределах селитебных территории предложено ограничивать уровни вибраций на тоннельной обделке в полосах частот 16, 31.5 и 63 Гц величинами соответственно 80, 106 и 110 дБ.

10) Перспективой дальнейшей разработки темы является нахождение для каждого типа конструкции пути с виброзащитой собственных частот и определение, в зависимости от характеристик подвижного состава и его скоростей движения, частотных характеристик спектра, где происходит наиболее эффективное гашение вибраций, а также выполнение аналогичных исследований для конструкций ВСП в тоннелях для высокоскоростного движения поездов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а) в рецензируемых научных изданиях:

1. Гордеев, А.В. Опыт применения верхнего строения пути с эластомерными подбалластными матами в железнодорожном тоннеле для снижения генерируемого подвижным составом вибрационного воздействия / Е.С. Ашпиз, Е.Ю. Титов, А.В. Гордеев // Путь и путевое хозяйство. — 2023. — № 5. — С. 22-25.

б) в отечественных изданиях, которые входят в международные реферативные базы данных:

2. Гордеев, А.В. Результаты измерения параметров колебаний конструкций пути на малогабаритных железобетонных рамах в тоннелях Горьковской железной дороги / Е.С. Ашпиз, А.В. Гордеев // Вопросы инженерной сейсмологии (англ. присоед. к Seismic Instruments). — 2023. — Т. 50, № 1. — С. 20–28.

б) в других изданиях и материалах конференций:

3. Гордеев, А.В. Experience of Using a Vibration-Damping Construction in the Railway Tunnel Under Gagarin Square in Moscow / Е.С. Ашпиз, А.В. Замуховский, А.В. Гордеев, Е.Ю. Титов, F. Pospischil // AIP Conference Proceedings / AIPCP22-AR-ITSI2021-00018

4. Гордеев, А.В. Причины возникновения и природа вибраций метрополитена. Работа виброзащитных конструкций пути / А.В. Замуховский, А.В. Гречаник, Д.А.

Погосян, А.В. Гордеев // Труды XVI Международной научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути», посвященной памяти проф. Г. М. Шахунянца (Москва, РУТ (МИИТ), 2019 год). – М.: РУТ (МИИТ), 2019. – С. 59-62.

5. Гордеев, А.В. Применение подбалластных матов для снижения вибрационного воздействия железнодорожного пути в селитебной зоне / А.В. Замуховский, А.В. Гречаник, А.В. Гордеев // Труды XVI Международной научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути», посвященной памяти проф. Г. М. Шахунянца (Москва, РУТ (МИИТ), 2019 год). – М.: РУТ (МИИТ), 2019. – С. 146–147.

Гордеев Антон Владимирович

**РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ВЕРХНЕГО
СТРОЕНИЯ ПУТИ В ТОННЕЛЯХ, С УЧЕТОМ ИХ ВИБРОЗАЩИТНОЙ
ФУНКЦИИ**

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 26.09.2024 г.

Формат 60×90/16

Усл. печ. л. – 1,5.

Заказ № 552 от 26.09.2024 г.

Тираж 80 экз.

127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, РУТ (МИИТ)