

На правах рукописи



ШАПЕТЬКО КИРИЛЛ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

**ВЛИЯНИЕ НЕРОВНОСТЕЙ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ НА
ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ПУТИ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ И
РАСХОД ЭНЕРГИИ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ**

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Акционерное Общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Певзнер Виктор Ошерович.

Официальные оппоненты: **Новакович Василий Иванович,**
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Ростовский государственный
университет путей сообщения», кафедра «Путь
и путевое хозяйство», профессор;
Богданов Олег Константинович,
кандидат технических наук,
акционерное общество «Научно-
исследовательский и конструкторско-
технологический институт подвижного
состава», отдел «Пути и специального
подвижного состава», ведущий научный
сотрудник.

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

Защита состоится «16» июня 2022 года в 15:00 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, ауд.7618.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ) <http://www.rut-miit.ru>.

Автореферат разослан «___» апреля 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Гринь Елена Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современных условиях эксплуатации железных дорог под воздействием поездов повышенной массы и длины, состоящих в том числе из вагонов с повышенными осевыми нагрузками, деформации пути в продольном профиле происходят не только в элементах верхнего строения пути, но и за счет неравномерных осадок земляного полотна, что способствует появлению длинных неровностей.

Исследования отечественных и зарубежных специалистов позволили определить влияние повышения осевых нагрузок на накопление расстройств пути. Однако процесс определения деформативности железнодорожного пути по параметрам неровностей в профиле изучен не в полном объеме, из-за отсутствия инструментов и нормативов для определения их в реальном времени.

Актуальность работы вытекает из необходимости развития исследований по определению параметров неровностей продольного профиля и последующего мониторинга состояния пути по изменению характеристик этих неровностей на участках тяжеловесного движения, в том числе на участках обращения вагонов с повышенными осевыми нагрузками, а также влияния этих неровностей на безопасность движения и расход энергии на тягу поездов.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам деформативности железнодорожного пути посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых. В их числе следует отметить: Г.Л. Аккермана, Й. Айзенмана, В.П. Бельтюкова, Л.С. Блажко, И.А. Бондаренко, М.Ф. Веригу, О.П. Ершкова, В.Б. Каменского, Н.И. Карпущенко, А.И. Кистанова, А.Я. Когана, А.Ф. Колосса, Г.Г. Коншина, М.А. Левинзона, В.С. Лысюка, В.О. Певзнера, С.П. Першина, Г.М. Стояновича, В.П. Титова, Г.М. Шахунянца и др.

Работ по определению неровностей продольного профиля относительно мало. Среди них необходимо отметить труды: Е.С. Ашпиза, А.Я. Когана, М.А. Левинзона, С.В. Малинского, В.О. Певзнера, Ю.С. Ромена, Н.Ю. Сергеевой, Ю.А. Седелкина, О.Б. Симакова.

Изученный автором опыт позволил реализовать способ получения параметров длинных неровностей для мониторинга железнодорожного пути по данным измерительных систем путеизмерителей с целью определения параметров длинных неровностей и деформативности пути, а также проведения расчетов и экспериментов по оценке влияния неровностей на безопасность движения и расход электроэнергии на тягу поездов.

Целью исследования является определение и мониторинг параметров длинных неровностей продольного профиля, наличие в пути которых оказывает существенное влияние на деформативность пути, безопасность движения и расход электроэнергии на тягу поездов.

Задачи исследования:

- 1) разработка предложения по оценке деформативности пути, на основе данных изменения параметров длинных неровностей в продольном профиле;
- 2) оценка влияния длинных неровностей на безопасность движения;
- 3) оценка влияния длинных неровностей продольного профиля на расход энергии на тягу поездов.

Объектом исследования являются участки железнодорожного пути с длинными неровностями продольного профиля, изменение параметров которых, может указывать на возможные (вероятные) места деформаций земляного полотна.

Предметом исследования является натурные неровности продольного профиля пути, полученные геодезическими методами от внешних по отношению к пути реперных систем, или аналогичные показатели, получаемые при числовой обработке данных с измерительных систем путеизмерителя, позволяющие определять изменения параметров неровностей во времени с учетом пропущенного тоннажа, их влияние на расстройства пути вызванных деформативностью основания, безопасность движения и расход электроэнергии. Под «натурными» понимаются неровности, описывающие реальное положение пути в профиле в независимой системе координат и изменяющиеся при увеличении пропущенного тоннажа.

Научная новизна исследования заключается:

1. в разработке и внедрении методики мониторинга положения пути в профиле по параметрам длинных неровностей;
2. в использование характера изменения параметров неровностей продольного профиля для анализа и мониторинга состояния пути;
3. в оценке влияния параметров (длина, амплитуда, площадь) неровностей продольного профиля на показатели деформативности железнодорожного пути, безопасность движения и расход электроэнергии на тягу поездов.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Результаты, полученные в ходе реализации, апробирования и верификации в исследовательских целях способа определения параметров неровностей продольного профиля, позволили доказать, что величины длинных неровностей могут являться элементами оценки деформативности пути.

Предложены и внедрены показатели оценки деформативности пути в продольном профиле.

Полученные данные, позволяют анализировать влияние длинных неровностей, вызванных деформативностью пути, на безопасность движения при сходах подвижного состава и дополнительный расход электроэнергии на тягу поездов.

Методология и методы исследования. Решение поставленных задач было осуществлено благодаря изученному отечественному опыту, а также исследованиям и методам, используемым на железных дорогах разных стран ближнего и дальнего зарубежья, исследованиям, проведенным на действующих участках пути и применения прикладных программ динамических расчетов.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) предложения по оценке деформативности пути по параметрам длинных неровностей в продольном профиле;
- 2) предложения по оценке влияния изменения параметров длинных неровностей на безопасность движения;

3) предложения по оценке влияния параметров длинных неровностей на расход электроэнергии на тягу поездов.

Степень достоверности и апробация результатов. Высока степень совпадения результатов расчетов по определению параметров длинных неровностей, получаемых с путеизмерительных вагонов, и результатов, определения этих неровностей геодезическими методами с помощью сертифицированных (высокоточных) инструментов, а также применение в экспериментальных исследованиях апробированных методик.

Апробация работ, основные положения диссертационной работы докладывались, были обсуждены и одобрены: на заседании кафедры «Путь и путевое хозяйство» Института пути, строительства и сооружений, Москва, РУТ (МИИТ) в 2020 г.; на научно-практической конференции с международным участием «Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство», Москва, РОАТ, в 2014, 2015, 2016, 2018 гг.; на научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути», Москва, МГУПС (МИИТ), 2016, 2017, 2018 гг.; на научно-практической конференции с международным участием «Интеллектуальная энергетика на транспорте и в промышленности», Омск, ОмГУПС, 2018 г.; на научно-практической конференции к 75-летию аспирантуры Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, Москва, ВНИИЖТ, 2019 г.

Внедрение результатов исследований. Результаты проведенных исследований послужили базой при разработке раздела 3 «Методики оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности», утвержденной Распоряжением № 2706/р от 22.12.17 года Заместителем генерального директора ОАО «РЖД» – начальником Центральной дирекции инфраструктуры Г.В. Верховых; пункта 5 «Методики дополнительного мониторинга состояния пути по параметрам длинных неровностей продольного профиля», утвержденной Распоряжением № 2191/р от 03.10.2019 года

Заместителем генерального директора ОАО «РЖД» – начальником Центральной дирекции инфраструктуры Г.В. Верховых.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 184 страницах печатного текста, имеет 43 таблицы, 60 рисунков, 16 страниц приложений. Список использованных источников содержит 211 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введение рассмотрена актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, достоверность научных положений и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе диссертации выполнен анализ отечественных и европейских нормативов содержания рельсовой колеи и взаимодействия пути и подвижного состава. Проанализирован зарубежный опыт применения систем измерения положения пути, используемый на путеизмерителях. Проведенный анализ позволил прийти к выводу, что действующие вагоны-путеизмерители, работающие на сети железных дорог ОАО «РЖД», регистрируют неровности в малом диапазоне длин. В результате возникла необходимость получения параметров неровностей в более крупном диапазоне длин до 100 м.

Для повышения провозной способности линий требуется повышение осевых или погонных нагрузок грузовых вагонов, внедрение тяжеловесных и длинносоставных поездов или строительство дополнительных путей и линий. Возрастание величины нагрузки на путь, а также продолжительности вибродинамического воздействия, передающегося грунтам земляного полотна, способствуют интенсивному накоплению остаточных деформаций, особенно в неблагоприятных условиях. В местах более сильного воздействия колес вагонов и локомотивов, остаточные деформации накапливаются гораздо интенсивнее. Всё это оказывает влияние на расстройство пути в плане и профиле, вызывает уменьшение межремонтных сроков и увеличение объемов ремонтных работ.

Рассмотрены вопросы, связанные с деформациями пути, вызывающими появление длинных неровностей, а также проведены исследования по оценке накопления деформаций пути, влияющих на безопасность движения и систему технического обследования пути.

Ухудшение состояния пути зависит не только от действующих на путь сил и конструкции верхнего и нижнего строения, но и от вида неровностей, оставшихся после производства ремонтных работ. Важное значение имеет не только амплитуда, но и форма неровностей.

Неровности продольного профиля, не выявляемые путеизмерителями, как правило, вызваны деформациями подбалластного слоя и земляного полотна. Такие неровности в наибольшей степени оказывают влияние на колебания кузова вагона, что в ряде случаев приводит к резкому росту амплитуд колебаний подвижного состава и повышенным показателем динамики.

Во второй главе рассмотрен способ получения натуральных неровностей. Для получения натуральных неровностей известен ряд способов, один из которых был разработан профессором А.Я. Коганом. В основе этого способа лежат расчеты в частотной области с использованием информации получаемой измерительными системами вагонов-путеизмерителей на базе методов Быстрого преобразования Фурье (БПФ). Однако стандартизированные методы решения этой задачи являются коммерческой тайной производителей диагностической техники.

Ввиду отсутствия типовых отечественных программ получения параметров длинных неровностей по информации с измерительных датчиков путеизмерителей, для оценки в исследовательских целях влияния длинных неровностей при тяжеловесном и скоростном движении, был практически реализован известный в общем виде способ получения параметров натуральных неровностей.

С учетом отечественного и зарубежного опыта задача решения следующим образом.

Согласно теореме Котельникова, имеющей вид (1), можно восстановить данные аналогового сигнала для получения траектории описывающей железнодорожный путь.

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(nT) \operatorname{sinc} \left[\frac{\pi}{T} (t - nT) \right]. \quad (1)$$

Так как железнодорожный путь имеет разную жесткость на всем протяжении, необходимо воспользоваться формулами, выведенными Жаном-Батистом Фурье, имеющими вид (2) и (3):

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) e^{2x/N(j-1)(k-1)}; \quad (2)$$

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X(k) e^{-2x/N(j-1)(k-1)}. \quad (3)$$

Для получения более точного результата в работе использовалось БПФ (Fast Fourier transform – FFT), так как это сокращает количество проводимых системных вычислений, и позволяет избавиться от суммарных ошибок округления заложенных в дискретном преобразовании Фурье (ДПФ, Discrete Fourier transform – DFT).

Аналогичные задачи в свое время были решены д.т.н. А.Я. Коганом и к.т.н. С.В. Малинским. Схема преобразования представлена на рисунке 1.

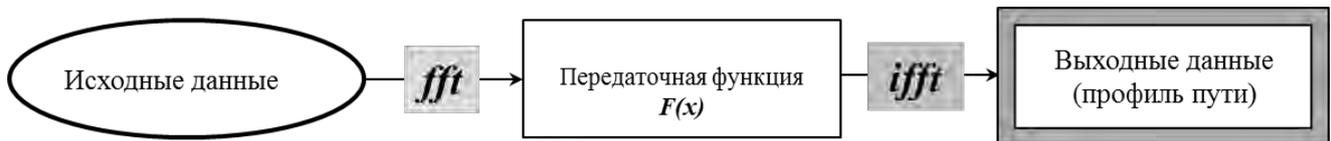


Рисунок 1 – Схема преобразования данных получаемых с вагона-путьеизмерителя

Передаточная функция, обозначенная на схеме (рисунок 1) $F(x)$, имеет вид (4):

$$F(x) = 1 - \frac{b}{c} \cdot e(-1i \cdot w \cdot a) - \frac{a}{c} \cdot e(1i \cdot w \cdot b), \quad (4)$$

где: a , b , c – размеры хорд используемых на вагоне-путьеизмерителе (рисунок 2), которые для разных производителей вагонов могут различаться;

e – экспонента;

w – циклическая чистота.

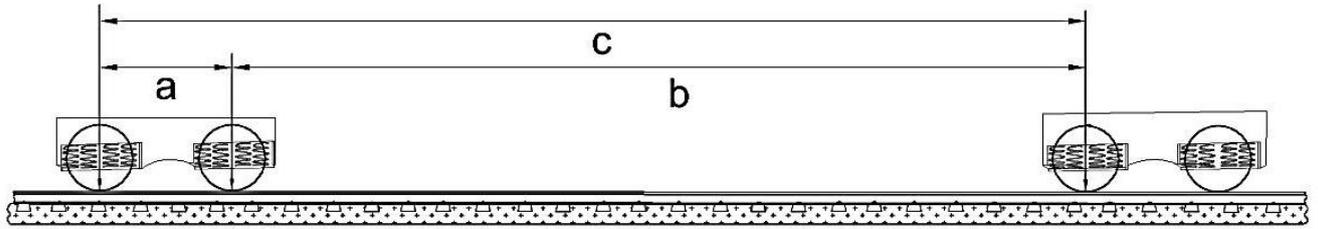


Рисунок 2 – Пример хордальной измерительной системы

Для получения параметров натуральных неровностей, необходимо применить нелинейную регрессию с использованием ряда Фурье (в пакете прикладных программ *Matlab*), имеющим вид (5), к данным представленным на рисунке 3.

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cos(iwx) + b_i \sin(iwx). \quad (5)$$

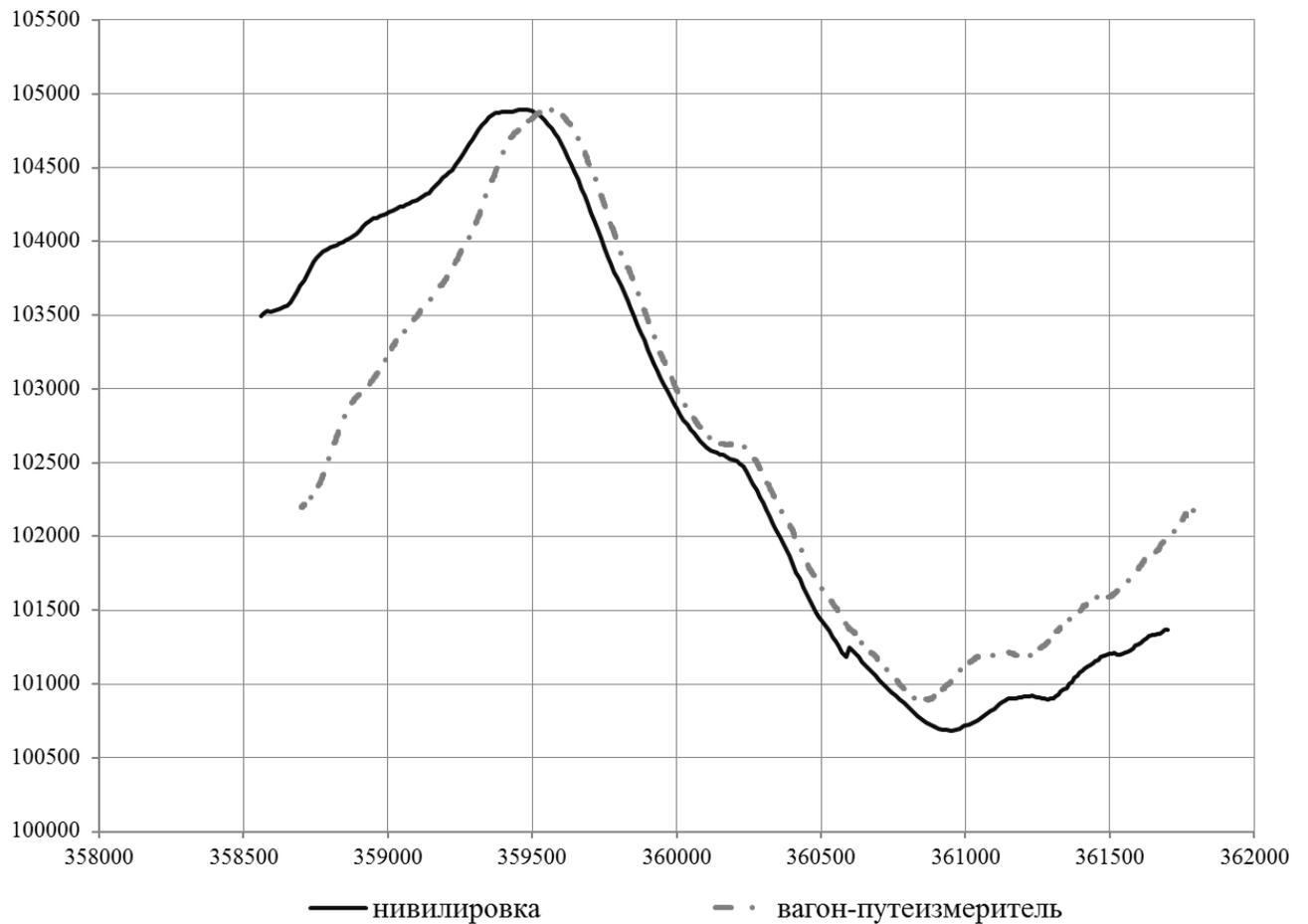


Рисунок 3 – Сопоставление данных полученных при натуральных промерах и преобразование данных с вагона-путеизмерителя

В результате получено натурное положение железнодорожного пути в вертикальной плоскости. Его сопоставления с натурными неровностями, полученными геодезическим методом представлено на рисунке 4.

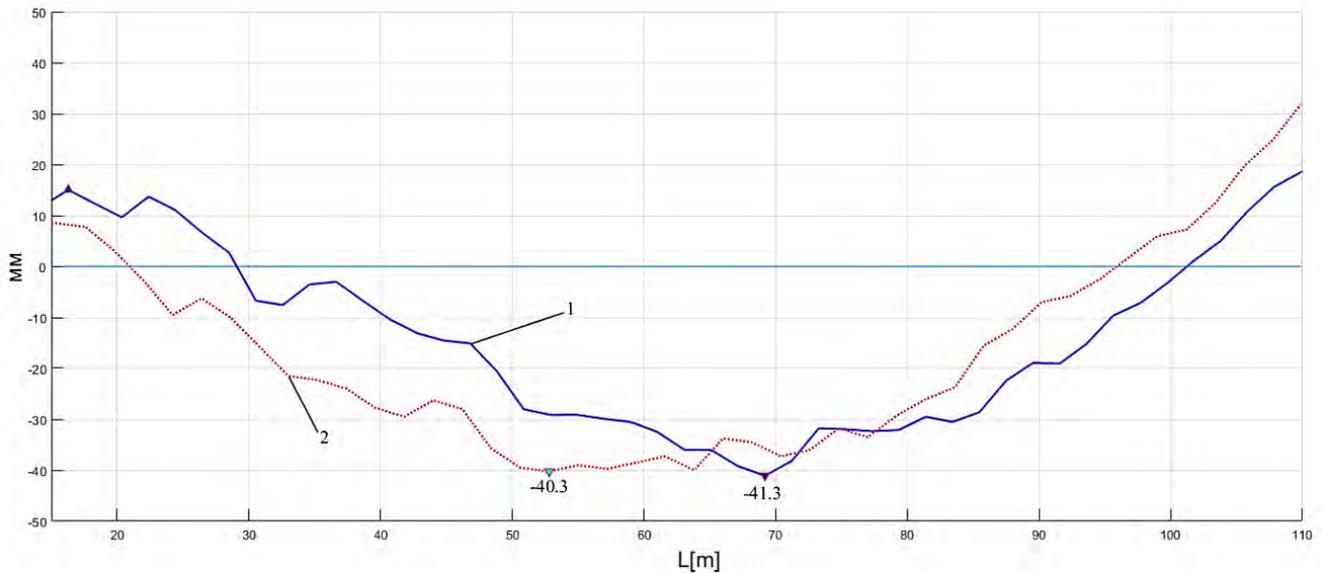


Рисунок 4 – Параметры длинных неровностей: 1 – по данным вагона-путеизмерителя с использованием рассмотренного способа 2 – по данным геодезической съёмки

Существующие нормативы, используемые на сети железных дорог ОАО «РЖД», отличаются от европейских тем, что они основываются на хордальных промерах (просадки, перекосы, стрелы изгиба в плане), что ограничивает длины нормируемых неровностей. Исходя из этого, формируются требования для различных измерительных систем, которые основаны на промерах от хорд различной длины.

Для наблюдения за неровностями, используются стандартные показатели: длина неровности l и амплитуда неровности h . Поскольку эти показатели применительно к длинным неровностям отображают неровности не в полном объеме, для более детального анализа был введен дополнительный параметр оценки и мониторинга неровностей – площадь неровности S . В работе, площадь неровности определялась с помощью функции *trapz* в пакете прикладных программ *Matlab*, которая вычисляет площадь плоской фигуры с помощью двойного интеграла по формуле (6):

$$S = \int_x^0 \int_y^0 dx dy. \quad (6)$$

Имея дополнительный параметр для оценки неровностей, можно более детально оценивать изменения неровностей во времени или с увеличением пропущенного тоннажа; пример приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Анализ данных параметров неровностей в профиле

	Нивелировка	Числовой метод
Площадь, м ² (май 2016)	6,5	8,1
Площадь, м ² (сентябрь 2016)	6,9	9,5
Длина неровности, м (май 2016)	74,8	71,5
Длина неровности, м (сентябрь 2016)	74,8	79,4
Амплитуда, мм (май 2016)	40,3	41,3
Амплитуда, мм (сентябрь 2016)	42,5	54,3

Таким образом, имея более полную картину изменения неровностей (таблица 1), согласно п.3.3.3. актуализированной «методики оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности» утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 22.12.2017 г. №2706/р, сопоставляя параметры (6) по формуле (7), получим соотношение площадей, характеризующие деформации пути. Согласно п.3.3.3. «методики оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности», при изменении параметров длинных неровностей в пределах: до 10% путь считается стабильным; от 10 до 20% – требует наблюдения; более 20% – недостаточно стабильный.

$$\frac{\iint_{0_1}^x dx_1 dy_1}{\iint_{0_i}^x dx_i dy_i} = \frac{S_1}{S_i}, \quad (7)$$

где: S_1 – площадь неровности, на период начало наблюдения;

S_i – площадь неровности, при последующих измерениях.

В третьей главе проведен анализ результатов мониторинга натуральных неровностей.

Исследования, проводимые в рамках испытаний инновационных вагонов, позволили выявить ряд участков пути, на которых были зафиксированы деформации, и наблюдать за ними в процессе эксплуатации вагонов с повышенными осевыми нагрузками. Для этих исследований был применен вышеописанный способ получения параметров неровностей в вертикальной плоскости.

В ходе наблюдения за грузонапряженными участками были выбраны для анализа длинных неровностей прямые участки с характерными неровностями, имеющими тенденцию к росту. Для этого анализа были выбраны участки Забайкальской железной дороги, имеющей одну из самых больших

грузонапряженность по сети дорог. На рисунке 6 представлен участок пути с неровностью в вертикальной плоскости. Мониторинг полученных данных позволил проанализировать рост параметров неровностей.

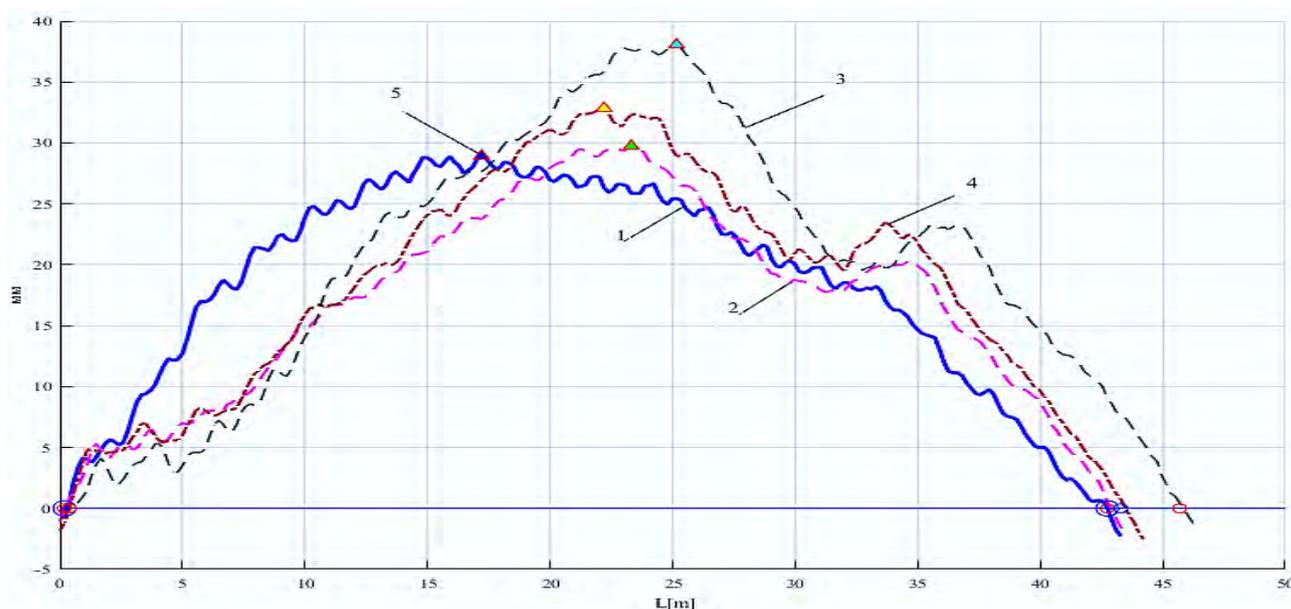


Рисунок 6 – Анализ неровностей в вертикальной плоскости в течение года: 1 – Апрель 2014 г.; 2 – Август 2014 г.; 3 – Октябрь 2014 г.; 4 – Сентябрь 2015 г.; 5 – Амплитуда неровности

По данным, полученным за 2014–2015 гг., было выявлено, что на рассмотренных участках пути, расположенных на Зиловской и Магочинской дистанциях Забайкальской ж.д. по второму пути, имеются характерные неровности.

В таблице 2 представлен анализ неровности на одном из участков, параметры которой изменяются за рассмотренный период времени.

Таблица 2 – Параметры неровности за 2014-2015 гг.

	Длина, м	Амплитуда, мм	Площадь, м ²
Апрель 2014 г.	42,55	28,93	0,701
Август 2014 г.	42,55	29,75	0,72
Октябрь 2014 г.	42,92	32,84	0,793
Сентябрь 2015 г.	45,325	38,06	0,898

Из данных, представленных в таблице 2 видно, что параметры неровности за рассмотренный период увеличиваются непропорционально, что говорит о накоплении деформаций.

К ухудшению показателей динамического взаимодействия пути и подвижного состава, может привести неблагоприятное сочетание длинных

неровностей (в плане и профиле), которые по результатам штатных измерений не оцениваются. К таким случаям относятся сходы, произошедшие в 2019 и 2020 гг. на разных дорогах сети ОАО «РЖД».

После получения данных проходов вагона-путеизмерителя с мест сходов, числовые сигналы измерительных систем были преобразованы выше описанным способом, в результате чего были получены параметры натуральных неровностей, что позволило проанализировать влияние таких неровностей на подвижной состав. Полученные неровности были перенесены в программный комплекс «Универсальный механизм» для моделирования процесса движения поезда и получения данных динамики (рисунке 7), из которого видно, что перелом продольного профиля на длинной неровности мог привести к обезгрузке первой тележки 35-го вагона с последующим сходом.

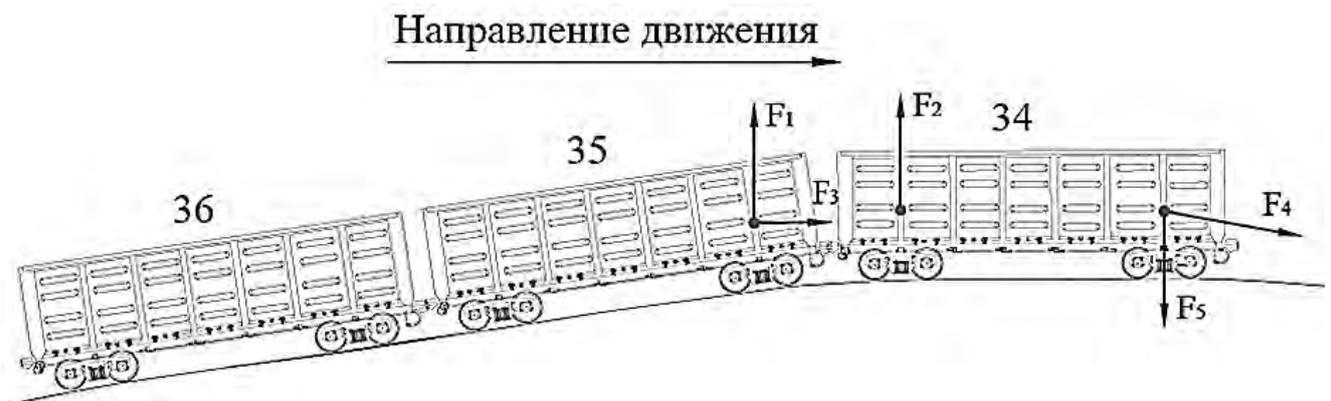


Рисунок 7 – Расчетная схема прохождения вагонами вершины неровности, с тягой локомотивом ВЛ-11 (3 секции) на подъеме:

F_1, F_2, F_3, F_4, F_5 – силы, возникающие при проходе вершины неровности сцепом вагонов частичную обезгрузку

По результатам расчетов были получены коэффициенты динамических добавок (КД) для каждого вагона грузового поезда. Полученные данные показали, что величины достигают рекомендованных и допустимых значений, а в некоторых случаях превышают их, что свидетельствует о возможной опасности схода вагонов.

В четвертой главе рассмотрено влияние длинных натуральных неровностей на расход электроэнергии на тягу поездов. Как показывает анализ энергетических расходов, затраты на тягу поездов являются одним из основных видов затрат на осуществление перевозочного процесса. Оптимизация таких

затрат требует анализа всех составляющих параметров, влияющих на сопротивление движению.

Зарубежный опыт показывает, что в большинстве случаев сокращение расхода электроэнергии, достигается за счёт:

- уменьшения массы подвижного состава;
- внедрения нового (современного/инновационного) подвижного состава;
- использования специально разработанных способов вождения поездов.

Для оценки влияния длинных неровностей пути на расход энергии была разработана «Программа и методика испытаний по оценке влияния длинных неровностей продольного профиля на расходы электроэнергии при тяге поезда» утвержденная старшим Вице-президентом В.А. Гапановичем.

Вышеизложенное послужило основой проведения комплекса исследований, позволивших определить потери энергии от наличия неровностей в продольном профиле. В 2016 году в реальных условиях на грузонапряженной линии, АО «ВНИИЖТ» совместно с ПКБ ЦТ были произведены опытные поездки с локомотивом-лабораторией и съёмка продольного профиля прямого участка пути, где обращался опытный состав до и после ремонта пути. По итогам этих исследований был сделан вывод о численных значениях влияния неровностей продольного профиля на расход электроэнергии. Согласно измерениям, проведенным ПКБ ЦТ, расход энергии составил до проведения работ на 1000 т массы поезда 79,9 кВт-ч, а после работ 73,0 кВт-ч, экономия составила 6,9 кВт-ч. При длине перегона 8,4 км средняя экономия энергии в расчете на 1 км и на 1000 т массы поезда, составила:

$$\mathcal{E}_{1\text{км}} = \frac{6,9}{8,4} = 0,82\text{кВт} - \text{ч}.$$

В соответствии с программой, испытания были организованы следующим образом:

- до начала ремонтных работ проводилась съёмка продольного профиля геодезическими приборами, а также методам преобразования данных вагона-путеизмерителя с дальнейшим сопоставлением их между собой;

- проведение 10 поездов опытным составом с определением среднего расхода энергии.

Цикл измерений повторялся после окончания ремонта пути.

Эффективность выполненных ремонтных работ была оценена по абсолютным и статистическим показателям имеющихся неровностей и данным по расчёту энергии:

- сравнительным характеристикам длин неровностей – до и после ремонтных работ;

- сравнительным характеристикам амплитуд неровностей – до и после ремонтных работ;

- сравнительным характеристикам суммарных площадей неровностей – до и после ремонтных работ;

- сравнительным характеристикам среднеквадратических отклонений амплитуд неровностей на рассматриваемом участке – до и после ремонтных работ.

После проведения ремонтных работ на участке модернизации доля неровностей длиной более 100 м практически не изменилась. Уменьшилась доля неровностей длиной 10-30 м с 20 до 5 % и доля неровностей 50-100 м с 23 до 10%.

Качественный анализ данных показывает, что на некоторых отрезках величины амплитуд существенно уменьшилась, на некоторых – неровности остались без изменения, а в ряде случаев – увеличились.

На рисунке 8 и представлены неровности, полученные путем преобразования данных с вагона-путеизмерителя до и после ремонтных работ.

Анализ суммарных площадей неровностей показал, что после ремонта суммарная площадь неровностей составила 78,3% от первоначальной.

Анализ выходных форм (ПУ-32) показал, что после ремонта количество отступлений ГРК сократилось, но период стабилизации пути не закончился и вновь начался рост отступлений. Это объясняется тем, что в процессе ремонтных работ, не была достигнута полная стабилизация пути.

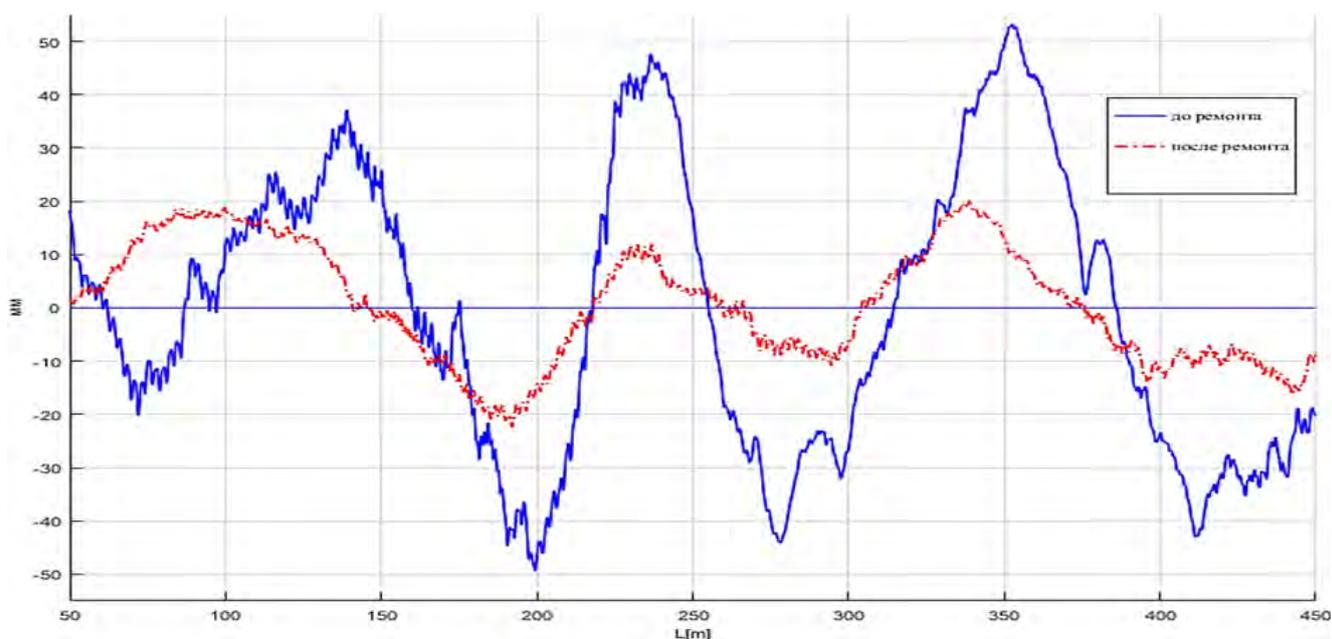


Рисунок 8 – Неровности полученные с помощью преобразования данных вагонов-путьеизмерителей

Расчёты показали, что устранение длинных неровностей обеспечивает экономию эксплуатационных расходов:

- за счёт увеличения межремонтного интервала, увеличения условного приведенного модуля деформации рабочей зоны подшпального основания;
- сокращения затрат на обслуживание пути при поддержании его в хорошем состоянии;
- сокращения затрат на энергоносители.

Таким образом, экономию можно рассчитать по формуле (8):

$$\mathcal{E} = A_1 + A_2 + A_3, \quad (8)$$

где: A_1 – затраты, связанные со сдвигом сроков проведения работ сплошной по планово-предупредительной выправки (ППВ) пути за счет снижения пропорциональной остаточной осадки;

A_2 – затраты на снижение потребностей производства выправки пути при текущем содержании;

A_3 – затраты по снижению энергопотреблению от устранения неровностей продольного профиля рассчитанных на основе проведенных исследований. Принято, что для устранения неровностей достаточно проведения непланового среднего ремонта пути.

Согласно ранее проведенным исследованиям в АО «ВНИИЖТ» устранение длинных неровностей и увеличения модуля деформаций подшпального основания и содержание пути в хорошем состоянии, позволит сократить количество ППВ (согласно параметрам A_1 и A_2), для схемы **1В** и **2В** с 4 до 2,5 выправок.

Величина A_3 определяется на основе, оценки влияния устранения длинных неровностей на расход электроэнергии на тягу поездов.

При средней цене энергии за 2018 год – 4,22 руб. кВт-ч стоимость сэкономленной электроэнергии для участков с различной грузонапряженностью приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Экономия электроэнергии на 1 км пути и 1000 т массы поезда с различной грузонапряженностью

№ п/п	G , млн. т. брутто год	Снижение расхода электроэнергии, (<i>Энергия</i>) кВт-ч	стоимость сэкономленной электроэнергии, (A_3) тыс. руб. в год
1	50	41000	173,02
2	100	82000	346,04
3	150	123000	519,06

Рассчитанные параметры A_1 , A_2 , A_3 позволяют рассчитать чистый дисконтированный доход от устранения длинных неровностей (таблица 4).

Таблица 4 – Результаты расчётов ЧДД для различных вариантов грузонапряжённости на 1 км пути

Года	I вариант, тыс. руб. на км. при 50 млн. ткм брутто в год		II вариант, тыс. руб. на км. при 100 млн. ткм брутто в год		III вариант, тыс. руб. на км при 150 млн. ткм брутто в год	
	Прибыль	ЧДД(NPV)	Прибыль	ЧДД(NPV)	Прибыль	ЧДД(NPV)
1	1388,46	-6839,3	2161,33	-6066,5	2934,21	-5293,6
2	1262,24	-5577,11	1964,85	-4101,62	2667,46	-2626,13
3	1147,49	-4429,62	1786,23	-2315,39	2424,97	-201,16
4	1043,17	-3386,45	1623,84	-691,55	2204,51	2003,35
5	948,34	-2438,11	1476,22	784,67	2004,1	4007,46
6	862,12	-1575,99	1342,02	2126,69	1821,91	5829,37
7	783,75	-792,24	1220,02	3346,71	1656,28	7485,65
8	712,5	-79,74	1109,11	4455,81	1505,71	8991,37
9	647,73	567,99	1008,28	5464,09	1368,83	10360,2
10	588,84	1156,83	916,62	6380,71	1244,39	11604,59
ИД (ID)	9384,63	0,14	14608,51	0,78	19832,39	1,41

Анализ таблицы 5 показывает, что проведение внепланового среднего ремонта для устранения длинных неровностей, позволяет получить экономию денежных средств на участках с малой, средней и высокой грузонапряженностью, а также позволяет уменьшить потребность в ППВ.

На единицу затраченных ресурсов начальных капитальных вложений, согласно таблице 4, индекс доходности (ИД) составляет: 0,14, 0,78 и 1,41 прибыли при грузонапряженности 50, 100, 150 млн. ткм брутто / год соответственно.

По результатам расчётов ЧДД для различных вариантов грузонапряженности построены зависимости изменения ЧДД по годам. Анализ данных показал, что период окупаемости T для разных вариантов составляет:

Вариант I – $T_I (IRR) \approx 8,2$ года или ≈ 99 месяцев; Вариант II – $T_{II} (IRR) \approx 4,5$ года или ≈ 54 месяцев; Вариант – III, $T_{III} (IRR) \approx 3,1$ года или ≈ 37 месяцев.

На рисунке 9 приведена зависимость разницы в затратах на техническое обслуживание пути с учетом устранения длинных неровностей и без него, период стабилизации пути после его проведения и влияние среднего внепланового ремонта на сокращение периода стабилизации.

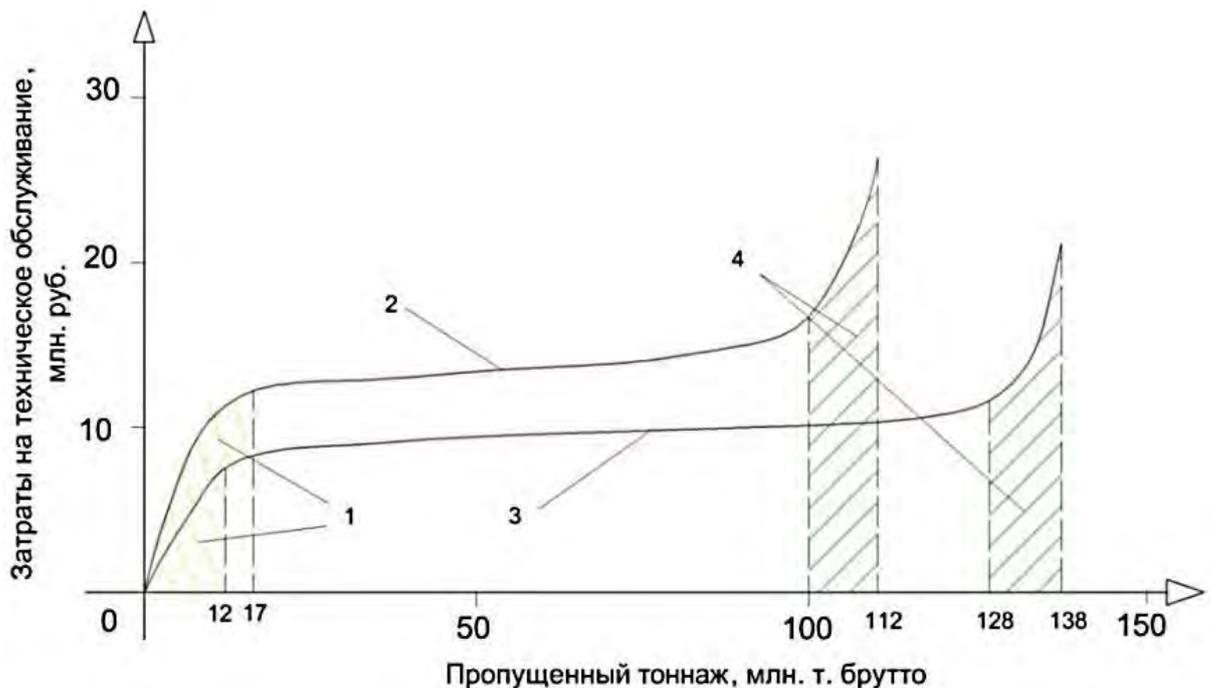


Рисунок 9 – Схема жизненного цикла пути после устранения длинных неровностей в профиле: 1 – послеремонтная осадка пути; 2 – стабильное положение пути без устранения длинных неровностей; 3 – стабильное положение пути с устранением длинных неровностей; 4 – зона роста затрат на техническое обслуживание

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Введено новое определение «длинная неровность» как отклонение положения пути элементов равномерного уклона в продольном профиле, получаемое геодезическими методами от внешних реперов по отношению к пути или методом преобразования, представленного в работе.

2) Предложены показатели оценки деформативности пути, на основе данных изменения параметров длинных неровностей в продольном профиле, включенные в актуализированную методику оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности, утвержденную распоряжением ОАО «РЖД» № 2706/р от 22.12.2017 г.

3) Разработана методика и расчетная модель мониторинга состояния пути по параметрам длинных неровностей продольного профиля, включенные в методику дополнительного мониторинга состояния пути по параметрам длинных неровностей продольного профиля, базирующейся на соотношении длины, амплитуды и площадей неровностей, утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» № 2191/р от 03.10.2019 г.

4) Изложены основные положения методики определения параметров длинных неровностей для их мониторинга в процессе эксплуатации.

5) Представлены систематизированные результаты мониторинга длинных неровностей в различных регионах сети.

6) Раскрыты зависимости изменения параметров длинных неровностей от пропущенного тоннажа.

7) Доказано влияние длинных неровностей продольного профиля на безопасность движения поездов.

8) Создана система практических рекомендаций в части мониторинга параметров состояния пути по данным, содержащим изменения характеристик длинных неровностей продольного профиля.

9) Определен экономический эффект от устранения длинных неровностей продольного профиля, оказывающих влияние на расход электроэнергии на тягу

поездов, составляющий 157 тыс. рублей на 100 км пути с длинными неровностями при грузонапряженности 100 млн т брутто в сутки.

10) Перспективой дальнейшей разработки темы является оценка связи параметров длинных неровностей с показателями динамики подвижного состава в широком диапазоне скоростей движения и очертаний профиля длинных неровностей с разработкой рекомендаций по использованию полученных результатов при подготовке распоряжения ОАО «РЖД» о «Допускаемых скоростях движения поездов по пути при наличии длинных неровностей».

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

а) в рецензируемых научных изданиях

1. Шапетько, К.В. Совершенствование нормативных документов по оценке состояния пути при скоростном движении / В.О. Певзнер, О.Ю. Белоцветова, В.В. Третьяков [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – №. 12. – С. 2-6.

2. Шапетько, К.В. Воздействие на путь вагонов с повышенной осевой нагрузкой / В.В. Третьяков, И.Б. Петропавловская, В.О. Певзнер [и др.] // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2016. – Т. 75. – №. 4. – С. 233-238.

3. Шапетько, К.В. Влияние режимов движения поездов на формирование расстройств пути / В.О. Певзнер, О.Ю. Белоцветова, К.В. Шапетько // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2016. – №. 6. – С. 349-353.

4. Шапетько, К.В. Инфраструктура в условиях применения вагонов с повышенными осевыми нагрузками / В.О. Певзнер, В.В. Третьяков, К.В. Шапетько [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2017. – №. 7. – С. 58-61.

5. Шапетько, К.В. Исследования накопления деформаций железнодорожного пути на участке испытаний вагонов с осевой нагрузкой 27 тс / К.В. Шапетько // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2017. – Т. 76. – №. 4. – С. 238-242.

6. Шапетько, К.В. Инфраструктура в условиях повышения осевых нагрузок / В.О. Певзнер, В.В. Третьяков, К.В. Шапетько [и др.] // Железнодорожный транспорт – №4. – 2018. – С.52-55.

7. Шапетько, К.В. Общие положения методики оценки воздействия подвижного состава на путь по критериям прочности и надежности / В.О. Певзнер, Е.С. Ашпиз, А.В. Замуховский [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – №. 1. – С. 26-30.

8. Шапетько, К.В. Общие положения методики оценки воздействия подвижного состава на путь по критериям прочности и надежности /

В.О. Певзнер, Е.С. Ашпиз, А.В. Замуховский [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – №. 2. – С. 38-40.

9. Шапетько, К.В. Общие положения методики оценки воздействия подвижного состава на путь по критериям прочности и надежности / В.О. Певзнер, Е.С. Ашпиз, А.В. Замуховский [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – №. 3. – С. 34-37.

10. Шапетько, К.В. Влияние длинных неровностей продольного профиля на безопасность движения в условиях интенсификации перевозочного процесса / В.О. Певзнер, А.И. Чечельницкий, К.В. Шапетько [и др.] // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). – 2020. – Т. 79. – №. 5. – С. 271-275.

11. Шапетько, К.В. Организация технического обслуживания пути на особогрузонапряженных участках / В.О. Певзнер, А.И. Лисицын, Е.А. Сидорова [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2021. – № 9. – С. 18-21.

12. Шапетько, К.В. О влиянии длинных неровностей пути на безопасность движения / В.О. Певзнер, Е.А. Сидорова, К.В. Шапетько [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 11. – С. 40-44.

б) в изданиях, входящих в международную базу цитирования

13. Shapetko, K. Control of energy aspects of track and rolling stock interaction / V. Pevzner, U. Romen, K. Shapetko // MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2018. – V. 239. – P. 01044.

14. Shapetko, K. Needed additions to the diagnostic system of high-speed lines / V. Pevzner, K. Shapetko, A. Slastenin // Advances in Intelligent Systems and Computing (см. в книгах). – 2021. – Vol. 1258 AISC. – P. 496-505. – DOI 10.1007/978-3-030-57450-5_43.

в) в других изданиях

15. Шапетько, К.В. Совершенствование нормативных документов по оценке состояния пути при скоростном движении / В.О. Певзнер, О.Ю. Белоцветова, К.В. Шапетько // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2014. – Т. 7. – № 7 (7). – С. 14-22.

16. Шапетько, К.В. Проблемы взаимодействия пути и подвижного состава в современных условиях эксплуатации / В.О. Певзнер, О.Ю. Белоцветова, В.Я. Карцев, [и др.] // Железнодорожный транспорт на современном этапе: сборник трудов ученых ОАО «ВНИИЖТ». М.: Интекст, 2014, – С.192-201.

17. Шапетько, К.В. Влияние параметров натуральных неровностей на конструкцию железнодорожного пути / В.О. Певзнер, К.В. Шапетько // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2015. – Т. 8. – №. 8. – С. 188-192.

18. Шапетько, К.В. Оценка влияния повышенных осевых нагрузок на второе предельное состояние – остаточные деформации пути / В.О. Певзнер, В.В. Третьяков, И.В. Третьяков [и др.] // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2016. – Т. 9. – №. 9. – С. 20-25.

19. Шапетько, К.В. Сравнительный анализ воздействия на путь вагонов с различными осевыми нагрузками / В.О. Певзнер, И.Б. Петропавловская, В.В. Третьяков [и др.] // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2016. – Т. 9. – №. 9. – С.68-75.

20. Шапетько, К.В. Задачи совершенствования системы критериев оценки пути в современных условиях эксплуатации / В.О. Певзнер, В.В. Третьяков, О.Ю. Белоцветова [и др.] // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. – 2015. – С. 151-155.

21. Шапетько, К.В. Работа пути в условиях тяжеловесного движения / В.О. Певзнер, И.Б. Петропавловская, О.А. Сулов [и др.] // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. – 2016. – С. 138-140.

22. Шапетько, К.В. Необходимые дополнения к системе оценки геометрии рельсовой колеи / В.О. Певзнер, В.В. Третьяков, И.В. Третьяков [и др.] // Вопросы развития железнодорожного транспорта: сб. Трудов ученых АО «ВНИИЖТ». М.: РАС, 2017, – С.199-202.

23. Шапетько, К.В. Испытания вагонов с осевой нагрузкой 27 тс. Первые итоги. / В.О. Певзнер, В.В. Третьяков, И.В. Третьяков [и др.] // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. – 2017. – С.217-218.

24. Шапетько, К.В. Влияние скорости и длины поезда из вагонов с повышенными осевыми нагрузками на развитие деформаций пути / В.О. Певзнер, В.В. Третьяков, И.С. Смелянская [и др.] // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. – 2018. – С.152-157.

25. Шапетько, К.В. Опыт повышения осевых нагрузок / В.О. Певзнер, В.В. Третьяков, И.В. Третьяков [и др.] // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. – 2018. – С.158-164.

26. Шапетько, К.В. Оценка деформативности пути на участках интенсификации перевозочного процесса / К.В. Шапетько // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2018. – Т. 12. – № 12. – С.189-191.

27. Шапетько, К.В. Оптимизация параметров устройства кривых и установления величины непогашенного ускорения на ВСМ / В.О. Певзнер, В.Я. Карцев, В.В. Третьяков [и др.] // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2018. – Т. 12. – № 12. – С.44-47.

28. Шапетько, К.В. Управление энергетическими аспектами взаимодействия пути и подвижного состава / В.О. Певзнер, Ю.С. Ромен, К.В. Шапетько // Интеллектуальная энергетика на транспорте и в промышленности. – 2018. – С.167-172.

29. Шапетько, К.В. Совершенствование конструкции пути с целью снижения интенсивности его расстройств / В.Н. Каплин, К.В. Шапетько, М.Н. Мысливец // РСП-Эксперт. – №.3. – 2019. – С.16-18.

30. Шапетько, К.В. Актуальные проблемы работы пути в современных условиях / В.О. Певзнер, В.В. Третьяков, К.В. Шапетько // Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта: материалы Всероссийской научно-практической конференции к 75-летию аспирантуры Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. Часть 2. М.: РАС, 2019. – С.231-238.

Шапетько Кирилл Вячеславович

**ВЛИЯНИЕ НЕРОВНОСТЕЙ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ НА
ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ПУТИ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ И
РАСХОД ЭНЕРГИИ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ**

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать ____ .04.22 г.
Объём 1,5 усл. п.л.

Заказ № _____

Формат 60×90/16
Тираж 80 экз.
