АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА» (АО "ВНИИЖТ")

На правах рукописи

Савин Александр Владимирович

УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ БЕЗБАЛЛАСТНОГО ПУТИ

Специальность: 05.22.06 - Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

> Научный консультант доктор технических наук, профессор Коган Александр Яковлевич

Москва 2017 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ	7
1. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИЙ	
БАЛЛАСТНОГО И БЕЗБАЛЛАСТНОГО ПУТИ	18
1.1 Путь на балласте	18
1.1.1 Достоинства и недостатки пути на балласте	18
1.1.2 Способы уменьшения давления на балласт	20
1.1.3 Обзор экспериментальных исследований работы шпал в	
балласте. Интенсивность вертикальных осадок пути в различных условиях	
эксплуатации	26
1.2 Анализ работы конструкций безбалластного пути	39
1.2.1 Достоинства и недостатки конструкций безбалластного пути	39
1.2.2 Классификация безбалластных конструкций пути	40
1.2.3 Описание основных конструкций безбалластного пути	43
1.2.4 Безбалластный путь Rheda	49
1.2.5 Безбалластный путь LVT в железобетонном коробе	51
1.2.6 Безбалластный путь LVT	53
1.2.7 Безбалластный путь MaxBögl	54
1.2.8 Безбалластный путь Alstom	56
1.2.9 Безбалластный путь Tines	58
1.2.10 Земляное полотно для безбалластных конструкций пути	59
1.3 Зарубежный опыт моделирования и испытаний безбалластного	
пути	64
1.4 Структура диссертационного исследования	66
Выводы по главе 1:	69
2. РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ БЕЗБАЛЛАСТНОГО ПУТИ	71
2.1 Классический расчет на прочность пути на балласте	71

2.2 Расчет на прочность безбалластного пути 72
2.2.1 Методика расчета 72
2.2.2 Реализация расчета на прочность безбалластного пути
2.3 Безбалластный путь как многослойная балка на упругом
основании
2.3.1 Расчетные схемы
2.3.2 Обоснование расчетной схемы на модифицированном
основании Винклера 100
2.3.3 Методика расчета безбалластного пути как многослойной балки
на упругом основании
2.4 Модели накопления осадок балластного и безбалластного пути 114
Выводы по главе 2: 116
3. ИССЛЕДОВАНИЯ БЕЗБАЛЛАСТНОГО ПУТИ В УСЛОВИЯХ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОЛЬЦА И ОКТЯБРЬСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ
ДОРОГИ
3.1 Испытания безбалластной конструкции пути Rheda в 2010 - 2014 118
3.1.1 Краткая характеристика опытных участков пути 119
3.1.2 Испытания опытной конструкции пути на ЭК ОАО «ВНИИЖТ». 120
3.1.3 Испытания опытной конструкции пути на перегоне Саблино-
Тосно
3.2 Испытания безбалластной конструкции LVT с армированным
коробом на Экспериментальном кольце 2011 г 2014 г 143
3.3 Испытания безбалластных конструкций Tines, Alstom, MaxBögl,
LVT на Экспериментальном кольце 2014 г 2017 г 163
3.3.1 Результаты контроля путеизмерительным вагоном 163
3.3.2 Момент затяжки шурупов (болтов) рельсовых скреплений 167
3.3.3 Количество дефектных элементов скреплений 167
3.3.4 Наличие трещин в бетоне168
3.3.5 Трудозатраты на текущее содержание 181

3.3.6 Осадка безбалластных конструкций пути 183
3.3.7 Просадки переходных участков 202
3.3.8 Состояние рельсовых скреплений 205
3.4 Применение оптоволоконных систем для диагностики
безбалластного пути
3.4.1 Принцип работы анализатора, основанного на вынужденном
рассеянии Мандельштама-Бриллюэна
3.4.2 Практическая реализация оптоволоконной диагностики 214
3.5 Сравнительная оценка результатов испытаний безбалластных
конструкций Tines, Alstom, MaxBögl, LVT с учетом "веса" каждого
критерия
Выводы по главе 3:
4. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К БЕЗБАЛЛАСТНОМУ ПУТИ 234
4.1 Геометрические размеры бетонной плиты 234
4.2 Переходные участки 236
4.2.1 Конструкции переходных участков
4.2.2 Устойчивость бесстыкового пути на переходных участках 240
4.3 Рельсовые скрепления 243
4.4 Несущие слои и земляное полотно 247
4.4.1 Бетонный несущий слой 247
4.4.2 Асфальтобетонный несущий слой 248
4.4.3 Гидравлически связанный несущий слой 248
4.4.4 Морозозащитный слой 249
4.4.5 Грунтовое основание
4.5 Электросопротивление
4.6 Срок службы
Выводы по главе 4:
5. МЕТОДОЛОГИЯ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ СООТВЕТСТВИЯ
ТЕХНИЧЕСКИМ ТРЕБОВАНИЯМ

5.1 Поэлементная структура подтверждения соответствия заданным	
техническим требованиям	255
5.2 Прогнозирование срока службы в конкретных условиях	
эксплуатации по первому предельному состоянию	258
5.3 Прогнозирование срока службы в конкретных условиях	
эксплуатации по второму предельному состоянию	262
Выводы по главе 5:	266
6. РАЦИОНАЛЬНЫЕ СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ	
БЕЗБАЛЛАСТНОГО ПУТИ	267
6.1 Стоимость жизненного цикла	267
6.2 Риски	268
6.3 Срок окупаемости	270
6.4 Сферы применения безбалластного пути	273
Выводы по главе 6:	289
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	292
Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме	
диссертационной работы	298
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	299
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	300
Приложение А Характеристики безбалластных конструкций пути,	
на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ»	340
Приложение Б Результаты расчета на прочность пути на балласте	343
Приложение В Листинг программы расчет безбалластного пути как	
многослойной балки	350
Приложение Г Результаты расчета безбалластного пути как	
многослойной балки	364
Приложение Д Трудозатраты на текущее содержание опытных	
конструкций безбалластного пути	369

Приложение Е Результаты испытаний безбалластных конструкций	
Tines, Alstom, MaxBogl, LVT в 2014-2016 г.г 37	75
Приложение Ж Документация на оптоволоконную систему	
диагностики Акты укладки. Сертификат 38	85
Приложение 3 Перемещения и температуры слоев земляного	
полотна под безбалластными конструкциями пути, зафиксированные	
оптоволоконной системой диагностики на Экспериментальном кольце ст.	
Щербинка 42	28
Приложение И Патенты на изобретения 43	36
Приложение К Сравнительный анализ нормативной базы по	
рельсовым скреплениям 43	39
Приложение Л Электрическое сопротивление безбалластного пути 44	41

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Развитие экономики России в последние годы повлекло за собой увеличение объемов грузов, перевозимых на железных дорогах, в том числе в тяжеловесных поездах и в вагонах с повышенной осевой нагрузкой. Вместе с тем вырос пассажиропоток и возникла потребность конкуренции с авиационным и автомобильным транспортом.

Решение проблемы освоения растущего объема перевозок грузов и пассажиров при отсутствии резервов провозной и пропускной способности на ряде участков и на целых направлениях обуславливает необходимость применения новых конструкций пути, обеспечивающих повышение массы, длины и скорости движения поездов, а также минимизацию времени на все виды путевых работ.

В современных условиях эксплуатации при повышении осевой нагрузки, росте массы и длины поездов одной из основных проблем становится деформативность пути. Применение безбалластной конструкции - один из вариантов повышения стабильности пути.

За рубежом имеется опыт эксплуатации высокоскоростного движения на балластном и безбалластном верхнем строении пути (БВСП), причем процентное соотношение вновь возводимых линий существенно смещается в сторону БВСП. Вопрос о целесообразности широкого применения безбалластного пути на Российских железных дорогах, в том числе для грузового движения, остается открытым.

Традиционная схема испытаний различных конструкций пути предусматривает лабораторные испытания элементов пути, далее испытания на Экспериментальном кольце АО "ВНИИЖТ" (ЭК), затем подконтрольную эксплуатацию на действующей линии. Такая схема не в полной мере удовлетворяет условиям испытаний безбалластного пути для высокоскоростного движения. На ЭК можно обеспечить интенсивные ресурсные испытания в сжатые

сроки, однако невозможно провести испытания при высокой скорости. На действующей линии можно провести разовые испытания при высокой скорости, но они не дадут представления о ресурсе конструкции. Кроме того, на действующей линии неправомочно эксплуатировать конструкцию, не прошедшую полный цикл испытаний. Строить специализированный выделенный полигон для высокоскоростных испытаний экономически нецелесообразно, так как его протяженность должна составлять около ста километров.

Проблема состоит в том, что техническое обслуживание безбалластного пути, связанное с его деформативностью, существенно снижает время полезной эксплуатации железнодорожных линий.

Кроме того, нуждается в подтверждении рентабельность безбалластного пути в различных условиях. Предположение о том, что увеличенные затраты на строительство БВСП будут компенсированы уменьшением затрат на текущее содержание нуждается в обоснованиях с учетом имеющихся рисков.

Степень разработанности темы

Вопросы об интенсивности осадок пути и уменьшении давления на балласт путем применения различных типов шпал, рамных и плитных подрельсовых оснований, лежней, а так же диагностики земляного полотна и применении безбалластного пути в тоннелях исследовали ряд отечественных ученых: С.В. Амелин [1], И.В. Амеличев [2], Н.И. Ананьев [3; 4; 5; 6; 7; 8], В.Ф. Барабошин [3; 4; 9; 10; 5; 6; 11; 7; 12; 8], Е.С. Варызгин [13; 14; 15; 16], М.Ф. Вериго [17; 18; 19], Ю.Д. Волошко [20], А.В. Замуховский [21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 31], В.Б. Каменский [32], В.Я. Клименко [33; 34; 35; 36; 37; 38], С.И. Клинов [39; 40; 41], А.Я. Коган [42; 43; 44; 10; 45; 46; 47; 48; 49; 50; 51], А.Ф. Колос [52; 53], Г.Г. Коншин [54; 55; 56; 57], Н.Д. Кравченко [58; 59; 60; 61; 62; 63; 64], А.Г. Кочур [65; 66], В.П. Крачковский [67], В.С. Лысюк [68; 69; 11; 70; 71; 19], А.Н. Марготьев [72; 73; 74], Л.П. Мелентьев [75; 76; 77], В.О. Певзнер [78; 79; 80; 81; 82; 83; 84], С.П. Першин [85], И.В. Прокудин [86], В.Л. Шаповалов [87; 88; 89; 90; 91], Г.М.

Шахунянц [92; 57], К.И. Щепотин [93; 94], В.А. Явна [87; 88; 89; 65; 90; 91], Т.Г. Яковлева [1; 54].

За рубежом аналогичными исследованиями занимались следующие ученые: R. Bastin [95], J. Eisenmann [96], C. Esveld [97; 98; 99; 100], Q. Franz [101], S. Freudenstein [102], K. Giannakos [103], S. Kaewunruen [104], D. Kocan [105], G. Leykauf [96], B. Lichtberger [106], L. Moravec [107], G. Michas [108; 109], O. Nigel [101], R. Schilder [110], K. Sunil [111], A. Hettler [112], W. Henn [113], Hans-Joerg Terno [114], P. Wang [115], S.R. Wang [116], J. Wei [117], S.Y. Yang [118], A. Zoeteman [97].

В ранее выполненных исследованиях не ставилась задача разработки единой методологии определения рациональных условий применения БВСП для повышения эффективности перевозок, не определены требования к безбалластному пути и методы подтверждения этих требований для условий Российских железных дорог.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является определение условий применения безбалластной конструкции для повышения эффективности перевозочного процесса за счет сокращения затрат на текущее содержание пути.

Необходима конструкция пути с минимальными затратами на техническое обслуживание. Требуется разработка методологии, позволяющей определить условия, при которых возможно и целесообразно применение безбалластной конструкции для снижения деформативности и затрат на техническое обслуживание пути и, как следствие, для повышения эффективности перевозок. Также требуется разработка технических требований к безбалластному пути и методов подтверждения соответствия.

Для достижения намеченной цели решены следующие задачи:

1. Сравнительный анализ интенсивности расстройства балластного и безбалластного пути в части минимизации затрат на его техническое обслуживание.

2. Экспериментальная и теоретическая оценка продолжительности жизненного цикла безбалластного пути.

3. Определение условий рационального применения безбалластного пути с учетом его технических возможностей и экономической целесообразности.

4. Разработка технических требования к безбалластному пути в целом и к его элементам в зависимости от сферы применения.

5. Разработка методологии подтверждения соответствия техническим требованиям.

Объект исследования. Объектом исследования является безбалластный путь в условиях Российских железных дорог.

Предмет исследования. Предметом исследования являются процессы достижения первого и второго предельного состояния безбалластного пути под воздействием поездной нагрузки.

Методы исследований. Поставленная цель исследований достигается:

- обобщением и анализом отечественного и зарубежного опыта разработки и эксплуатации балластных и безбалластных конструкций пути;

- математическим моделированием напряжений и прогибов безбалластного пути под поездной нагрузкой;

- экспериментальными измерениями осадки безбалластного пути при длительном воздействии поездной нагрузки;

- натурными экспериментальными исследованиями напряженнодеформированного состояния и эксплуатационной надежности безбалластного пути (конструкций Rheda, LVT, MaxBögl, Tines, Alstom), в том числе с использованием эффекта допплеровского сдвига в оптоволоконных системах диагностики;

- экспертной оценкой влияния большого числа параметров на поведение сложных систем на примере безбалластного пути;

- разработкой модели перехода от натурных испытаний на Экспериментальном кольце к прогнозированию надежности безбалластной конструкции на действующей линии;

- расчетом продолжительности и стоимости жизненного цикла безбалластного пути в различных условиях применения с учетом имеющихся рисков.

Научная новизна. Научная новизна работы состоит в том, что:

 экспериментально определены деформативные характеристики различных безбалластных конструкций;

 получены эмпирические зависимости и аппроксимирующие функции осадок безбалластного пути и переходных участков различных типов от пропущенного тоннажа в сравнении с осадками традиционного пути на балласте, что дало возможность прогнозировать срок службы для различных сфер применения БВСП;

- экспериментальным и расчетным путем доказана возможность применения БВСП как для высокоскоростного, так и для грузового движения;

- решением системы дифференциальных уравнений устойчивости бесстыкового пути определена длина дополнительных рельсов на переходных участках от балластного пути к безбалластному, что дает возможность расширить сферы применения БВСП;

- определена длина переходного участка на подходах к безбалластной конструкции по условию устойчивости бесстыкового пути с использованием модели рельсовой плети с заделкой на одном конце;

 подтверждена возможность использования эффекта Мандельштама-Бриллюэна в многоуровневой оптоволоконной системе диагностики земляного полотна под безбалластным путем;

- система дифференциальных уравнений, описывающих колебания безбалластного пути как многослойной балки на модифицированном упругом основании Винклера, решена с применением метода частотных характеристик с

входом по силам, действующим в контакте колесо-рельс с учетом неровностей, и выходом по перемещениям отдельных слоев балки;

 разработанная математическая модель позволила построить частотные характеристики, определяющие изгибающие моменты в каждом слое многослойной балки.

Достоверность результатов.

Достоверность натурных экспериментов подтверждена использованием аттестованных методик испытаний и поверенных средств измерений.

Результаты натурных испытаний подтвердили адекватность математической модели безбалластного пути как многослойной балки на модифицированном упругом основании Винклера в части значений напряжений и прогибов отдельных слоев конструкции.

Метод экспертного выбора наилучшей конструкции безбалластного пути реализован с учетом весовых коэффициентов большого числа характеристик, полученных в результате экспертной оценки членов секции «Путевое хозяйство» Научно-технического совета ОАО «РЖД» от 27 мая 2016 г. № 16.

На защиту выносится:

- результаты экспериментальных исследований и эксплуатационных наблюдений 6 типов безбалластного пути в сравнении с классическим путем на балласте;

- методология выбора условий применения безбалластного пути с учетом научнообоснованных требований к конструкции и методов подтверждения соответствия;

 модель накопления осадок безбалластного пути при длительном воздействии поездной нагрузки;

- метод определения напряжений и перемещений слоев безбалластного пути как многослойной бесконечной балки на упругом основании;

- способ определения устойчивости бесстыкового пути на переходных участках путем решения системы дифференциальных уравнений устойчивости бесстыкового пути с рельсовыми плетями, жестко заделанными с одного конца;

- способ определения продолжительности и стоимости жизненного цикла безбалластного пути с использованием изменяющегося коэффициента дисконтирования, при котором понижающее влияние дисконтирования не перекрывает влияния роста не дисконтированных эффектов.

Практическая значимость.

Доказана возможность повышения эффективности перевозочного процесса путем применения БВСП как для высокоскоростного пассажирского, так и для совмещенного и грузового движения.

Определены зависимости деформативности от пропущенного тоннажа для 6 типов БВСП при наработке 600-1350 млн. т брутто с отработкой технологий ремонта и определением трудозатрат на их текущее содержание.

Доказано, что деформативность пути (второе предельное состояние) - это наиболее критичный параметр состояния БВСП, который требует дополнительных мер по диагностике. Для диагностики деформативности предложена оптоволоконная система диагностики земляного полотна под БВСП.

Разработаны и утверждены Технические требования для оптоволоконной системы диагностики безбалластного пути.

Разработан и подготовлен к утверждению СТО РЖД "Безбалластный путь. Технические требования".

Разработан и подготовлен к утверждению ГОСТ Р "Безбалластный путь высокоскоростных железнодорожных линий. Требования безопасности и методы контроля".

Приведенные обоснования дали возможность определить минимальную продолжительность полигонных испытаний.

На основе положений диссертации определены рациональные условия применения безбалластного пути, обеспечивающие минимальный срок окупаемости затрат на его сооружение.

Реализация работы. Положения диссертации реализованы в следующих документах:

- Специальные технические условия для проектирования безбалластной конструкции железнодорожного пути на участке Саблино-Тосно Октябрьской железной дороги. Согласованы Заместителем руководителя ГОССТРОЯ Мурашовым Б.М. 2013 г. Утверждены Вице-президентом ОАО "РЖД" Целько А.В. 2013 г.;

- Программа и методика подконтрольной эксплуатации продукции «Подрельсовое основание безбалластного пути Rheda 2000" Утв. Вицепрезидентом ОАО "РЖД" В.Б. Воробьевым 2013 г.;

- Научно-технический отчет об испытаниях безбалластного пути RHEDA на Экспериментальном кольце и на перегоне Саблино-Тосно 46 км Октябрьской железной дороги. Тема 10.2.029.Р Испытания безбалластной конструкции железнодорожного пути. Договор № 1018/11/696 от 30.06.2011 г.;

- Специальные технические условия для проектирования безбалластной конструкции железнодорожного пути с пониженной вибрацией. Согласованы Вице президентом ОАО "РЖД" В.Б. Воробьевым 2011 г.;

- Специальные технические условия «Совмещенная (автомобильная и железная) дорога Адлер-Горноклиматический курорт Альпико-сервис со строительством сплошного второго железнодорожного пути на участке Сочи-Адлер-Веселое" 2011 г.;

- Инструкция по эксплуатации безбалластной конструкции верхнего строения пути по технологии LVT (Low Vibration Track). Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 27.02. 2015 г. № 513р;

- Научно-технический отчет об испытаниях безбалластного пути LVT на Экспериментальном кольце и в тоннелях 6 и 7 Альпико-Сервис. Тема «Оценка

эффективности и эксплуатационных параметров безбалластной конструкции верхнего строения пути по технологии LVT (Low Vibration Track). Рекомендации и сферы применения конструкции для пути, мостов и тоннелей» договор № 3508/11 от 27.07.2011 г.;

- Научно-технический отчет об испытаниях безбалластных конструкций пути четырех типов (Tines, Alstom, MaxBögl, LVT). Тема 6.049.РТП "Испытания элементов инфраструктуры для высокоскоростного движения на Экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ". Договор №1057/14/990 от 04.12.2014 г.;

- Программа и методика сравнительных полигонных испытаний безбалластных конструкций пути (БВСП) четырех типов (Tines, Alstom, MaxBögl, LVT), включая сбор данных о трудозатратах на текущее содержание. Утверждена: Начальником центра организации скоростного и высокоскоростного движения ОАО «РЖД» Петрушенко Г.В.;

- ГОСТ Р "Безбалластный путь высокоскоростных железнодорожных линий. Требования безопасности и методы контроля" Первая редакция.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и одобрены на следующих конференциях:

- Международная научно-практическая конференция «Проблемы взаимодействия пути и подвижного состава», посвященная 100-летию профессора Моисея Абрамовича Фришмана г. Днепропетровск. 2013 г.;

- Всероссийская научно-практическая конференция "Проблемы проектирования, строительства, диагностики и технического содержания объектов железнодорожного транспорта" г. Чита, 24 октября-15 ноября 2013 г.;

- XI международная научно-техническая конференция «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути», посвященная памяти профессора Георгия Михайловича Шахунянца МГУПС-МИИТ, г. Москва 2014 г.;

- "Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство" 7-я научно-практическая конференция с международным участием МГУПС (МИИТ), г. Москва 2014 г.;

- XII международная научно-техническая конференция «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути», посвященная памяти профессора Георгия Михайловича Шахунянца МГУПС-МИИТ, г. Москва 2015 г.;

- Международная научно-практическая конференция «Проблемы инфраструктуры транспортного комплекса» (ФГБОУ ВПО ПГУПС г. Санкт-Петербург, 30 сентября – 10ктября 2015 г.;

- "Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство" 8-я научно-практическая конференция с международным участием МГУПС-МИИТ, г. Москва 2015 г.;

- XIII международная научно-техническая конференция «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути», посвященная памяти профессора Георгия Михайловича Шахунянца МГУПС-МИИТ, г. Москва 2016 г.;

- "Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство" 10-я научно-практическая конференция с международным участием МГУПС-МИИТ, г. Москва 2016 г.

- Семинар на кафедре «Железнодорожный путь» ФГБОУ ВО Петербургского Государственного университета путей сообщения Императора Александра I, 18 ноября 2016 г.;

- Международная научно-практическая конференция "Актуальные проблемы развития транспортной инфраструктуры" (Санкт-Петербург ПГУПС 20–21 декабря 2016 г.), посвященная 100-летию Жинкина Георгия Николаевича и 80-летию Прокудина Ивана Васильевича.

XIV международная научно-техническая конференция «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного

пути», посвященная памяти профессора Георгия Михайловича Шахунянца МГУПС-МИИТ Москва,2017 г.

Transportation Geotechnics and Geoecology, TGG 2017, 17-19 May 2017, The Federal Agency for Railway Transport. Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. St. Petersburg, Russia.

"Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство" 11-я научно-практическая конференция с международным участием МГУПС-МИИТ, г. Москва 2017 г.

Публикации. Основные материалы по теме диссертации опубликованы в 46 печатных работах, в том числе: из перечня ВАК -20, авторских свидетельств на изобретение - 3, монография - 1.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников из 369 наименований и 11 приложений. Объем диссертации составляет 444 страниц, включая 68 таблиц и 142 рисунка.

1. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИЙ БАЛЛАСТНОГО И БЕЗБАЛЛАСТНОГО ПУТИ

1.1 Путь на балласте

1.1.1 Достоинства и недостатки пути на балласте

Путевая решетка, состоящая из рельсов и шпал, уложенная на балласт из уплотненного щебня, частицы которого имеют острые кромки, считается классическим верхним строением пути, получившим широкое распространение во всем мире [128; 78; 80; 81; 82; 13; 14;16; 129; 130; 131; 132].

Основными достоинствами классической конструкции пути являются низкие капитальные затраты, простота ремонта и обновления, достаточно большой срок службы.

С другой стороны, основание из щебеночного балласта с пустотами, распределенными между его частицами размером от 20 до 60 мм, представляет собой слабое место, так как при сжатии под воздействием подвижного состава возможно разрушение, истирание и смещение частиц щебня [133; 134].

На Рисунке 1.1 показана схема классического пути на балластном основании и напряжения в элементах пути [135]. Средние процентные составляющие несущих элементов пути в общей упругости пути изображены на Рисунке 1.2.

Отдельную проблему представляет собой растительность на пути. Удаление травы требует дополнительных затрат. Гербициды для удаления растительности оказывают негативное влияние на экологию.

В настоящее время известно достаточно много конструкций шпал, а точнее, подрельсовых оснований. Их многообразие можно представить в виде схемы, изображенной на Рисунке 1.3.







Рисунок 1.2 Средние процентные составляющие несущих элементов пути в общей упругости пути



Рисунок 1.3 Разновидности подрельсовых оснований

Балластный путь имеет преимущества по меньшим первоначальной стоимости и срокам строительства [101; 136; 137]. Он также отличается гибкостью в отношении укладки новых или замены старых стрелочных переводов и простотой выправки. Однако имеет место постоянный рост расходов на его текущее содержание, особенно на линиях с высокими динамическими нагрузками.

1.1.2 Способы уменьшения давления на балласт

Решающими факторами, влияющими на величину осадки, являются сжатие щебня (в зависимости от осевой нагрузки и параметров верхнего строения пути), эксплуатационные и климатические условия (пассажирские, грузовые или смешанные перевозки, атмосферные осадки, морозы), а также скорость движения поездов (увеличение высокочастотных колебаний при скорости более 200 км/ч) [138]. Кроме того, необходимо очищать балласт, если доля измельченных частиц, износа и загрязнений превысит 30 % массы щебня. Имеющийся опыт показывает, что на магистральных линиях это происходит через 15 лет; по истечении 30 лет

должно планироваться полное обновление щебня. На высокоскоростных линиях этот срок значительно меньше.

Оптимизировать верхнее строение пути на балласте можно за счет увеличения площади соприкосновения железобетонных шпал с балластом.

Такая конструкция имеет повышенную сопротивляемость поперечному сдвигу, что особенно важно для бесстыкового пути [139].

На зарубежных дорогах имеется тенденция к увеличению площади опирания шпал [102]. В ряде стран используется вариант сдвоенной шпалы, с увеличенным сопротивлением поперечному сдвигу, что имеет большое значение при эксплуатации бесстыкового пути.

Имеется опыт укладки широких шпал вплотную друг к другу [140]. Такой способ максимально уменьшает давление на балласт, но при этом существенно осложняется технология выправки пути по уровню и в плане. В криволинейных участках пути укладывать и эксплуатировать такой путь затруднительно.

В Таблице 1.1 приведены геометрические размеры, площадь опирания и масса отечественных и зарубежных шпал.

Тип	Macca,	Длина,	Ширина постели, мм	Площадь опирания,
	КГ	ММ		см ²
Ш3-СД	285	2700	300	7280
B55	229			5130
B70	300	2600	300 (по торцам)	5700
			271 (под подошвой рельса)	
			220 (в центре)	
B01	370	2600	300	7800
B75	390	2800	330	7560
B90	330	2600	320	6680
B320	380	2600	300	7800
BBS1	560	2400	570	13680

Таблица 1.1 - Размеры, масса и площади опирания шпал

Шпалы-лежни

Снижение давления на балласт может быть достигнуто при отказе от поперечных шпал с заменой их продольными, причем изгибная жесткость последних обеспечивает дополнительное распределение нагрузок на балласт. В Японии имеется такая конструкция, причем в ней использованы сдвоенные балки максимальной длиной 12,5 м (сечение 40x15,5 см), которые в продольном направлении предварительно напряжены профилированными тросами и через каждые 2,5 м соединены между собой стальными трубами диаметром 76 мм с толщиной стенки 9 мм [141]. Для снижения уровня излучаемого шума трубы облицованы резиной.

Благоприятное распределение нагрузки на балласт здесь достигается не только за счет увеличения поверхности опирания, но, прежде всего, благодаря большой изгибной жесткости лежней [142].

В России имеется опыт применения лежней, в том числе в Московском метрополитене под руководством Н.Д. Кравченко [58; 59; 60; 61; 62; 63]. В тоннелях лежни замоноличиваются в бетон на обратном своде тоннеля, в этом случае не требуются постоянные поперечные элементы для сохранения ширины колеи. Имеется небольшой опыт эксплуатации лежней на открытых участках, но широкого распространения он не получил, так как технология обслуживания такого пути была достаточно сложной.

Наибольшее распространение такая конструкция получила в тоннелях и линиях метро. В метро для уменьшения вибрации под лежнями укладывают полимерные демпфирующие слои.

Известен опыт применения лежней для трамвайных путей Польши [141]. Эта конструкция позволяет разместить газон внутри железнодорожной колеи, что благотворно сказывается на экологии.

Продольные бетонные балки производятся в специальных формах. предусмотрено сооружение стрелочных переводов на аналогичных блоках специальной конструкции.

Простая конструкция обеспечивает легкий монтаж. Вес продольного бетонного блока длиной 6 м составляет 3,1 т. В зависимости от пожеланий клиента применяются различные системы крепления рельсов.

Ү-образные шпалы

Для уменьшения давления на балласт и увеличения сопротивления поперечному сдвигу шпал в ряде случаев применяется конструкция из Y-металлических шпал [101; 109; 143; 144]. Такие шпалы существенно увеличивают способность пути противостоять поперечному температурному выбросу.

На приграничном участке Калининградской железной дороги эксплуатируются такие шпалы для пути с колеей 1520 и 1435 мм.

Рамные шпалы

Известны конструкции [145; 146], представляющие собой сочетание двух обычных поперечных железобетонных шпал и двух продольных балок-лежней, выполненных воедино и образующих прямоугольную раму.

Основной идеей при создании лежней и рамных шпал являлось расположение рельсов над непрерывным продольным основанием с дополнительными площадками для опирания.

Ряд зарубежных специалистов считает, что преимущества пути на рамных шпалах и плитном основании особенно полно используются при строительстве новых линий для движения поездов с высокими скоростью и осевыми нагрузками [147]:

- плитная конструкция пути оказывает практически неограниченное сопротивление поперечным силам;

- отсутствие вылетающих частиц балласта исключает нанесение повреждений подвижному составу и элементам пути;

- невозможность появления растительности в пути на плитном основании исключает необходимость борьбы с нею;

- устойчивое положение пути снижает динамические силы, действующие на ходовую часть подвижного состава;

- эксплуатация линии на плитном основании возможна более продолжительное время в силу меньших трудозатрат на текущее содержание.

Отечественный опыт создания и эксплуатации рамных и плитных конструкций

В прошлом столетии в России предпринимались попытки эксплуатировать путь и стрелочные переводы на рамных и плитных подрельсовых основаниях [2; 33; 148]. Такой путь дает преимущества в устойчивости против температурного выброса и существенно снижает давление на балласт. Однако неравномерные осадки балласта и земляного полотна не позволили в свое время широко использовать данную конструкцию. Рамные конструкции обеспечивают высокое сопротивление поперечному перемещению рельсошпальной решетки. Однако, укладывать такой путь в кривых участках достаточно сложно [4; 149].

Отечественный опыт производства и эксплуатации пути на плитном основании выявил как достоинства, так и недостатки такой конструкции при укладке ее на балласт [2]. Основное достоинство - это большая масса и огромное сопротивление поперечному перемещению, что делает бесстыковой путь абсолютно устойчивым. К недостаткам можно отнести сложность технического обслуживания при возникновении просадок балластного слоя или земляного полотна.

Необходимо отметить отечественный опыт применения плит БМП. Они успешно применяются не только на мостах. В качестве конструкции сопряжения они уложены на земляное полотно на подходах к тоннелю в г. Красноуфимск. На сегодняшний день наработка тоннажа ВСП с плитами БМП перед тоннелем составляет около 2,7 млрд. т брутто, при этом целостность конструкции не

нарушена, ее продолжают эксплуатировать с установленными скоростями движения поездов [21].

К основным достоинствам можно отнести то, что плиты изготавливают в заводских условиях, конструкция малодетальна и устраивается с небольшими затратами, отсутствуют "мокрые" процессы при устройстве пути. В качестве несущего слоя можно использовать как бетонное основание, так и балласт (в Красноуфимске плиты БМП лежат на щебеночном балласте).

Однако отечественная конструкция не лишена недостатков [63], так при изготовлении плит и рам возникает погрешность геометрических размеров, недопустимая для скоростей более 250 км/ч. Также остается открытым вопрос о стыках плит между собой, их применении в качестве основания стрелочных переводов.

В 70-е годы путь на рамном и плитном подрельсовом основании укладывался на типовое земляное полотно и в большинстве случаев на щебеночный балласт. То есть вместо обычной рельсошпальной решетки укладывались рамы или плиты. Осадки плитных и рамных конструкций пути были несколько меньше чем на типовой конструкции, но имели существенную неравномерность, особенно в зоне стыков плит, что требовало периодической выправки и подбивки. Для машинизированной выправки такой конструкции пути в тот период не было соответствующих машин. По этим причинам плитные и рамные конструкции пути не получили широкого распространения.

Современная концепция безбалластного пути предполагает специальную подготовку земляного полотна в ряде случаев с заменой грунта на глубину 2-5 м, с тщательным уплотнением и применением армирующих слоев, а также специальных мероприятий по водоотведению. Такая концепция существенно уменьшает величину осадки и ее неравномерность, что практически полностью должно исключить текущее содержание пути.

Известны исследования шпал различных типов, используемых в Германии и Франции на балластном пути [102; 150]. Из-за разных геометрии и характеристик опорной поверхности они по-разному передавали давление на балласт, что показано в Таблице 1.2. Все исследованные рельсовые скрепления также применяются в Германии.

Шпала	Площадь	Скрепление	Жесткость	Длина	Сила под	Напряжение
	опирания,		скрепления,	зоны	подошвой	сжатия в верхней
	MM ²		кН/мм	упругости,	рельса,	части
				ММ	кН	балластного слоя,
						H/mm^2
B70	684 000	w14 k900	60	740	51	0,15
B01	780 000	w21 t1000	40	780	48	0.12
B75	880 800	Ioarv 300-1	22.5	864	43	0,10
B90	797 600	W14 K900	60	728	51	0,13
B320	780 000	Ioarv 300-1	22,5	869	43	0,11
BBS1	1 368 000	W14 K900	60	697	54	0,08

Таблица 1.2 - Влияние железобетонных шпал на балласт

Профессор В.О. Певзнер [78], наглядно показал, «что расчеты по действующим правилам [151] при осевой нагрузке до 270–300 кН не лимитируются по изгибной прочности рельсов и шпал, что приводит к более интенсивному износу промежуточных скреплений и, главное, к росту напряжений в балласте под шпалой и на основной площадке земляного полотна».

Вопросы неравномерности осадок пути и их влияния на напряженнодеформированное состояние элементов верхнего строения пути неоднократно рассматривались в трудах отечественных ученых. Профессор В. П. Крачковский в работе [67] отмечал: «При определении напряжений в рельсах и других составных частях пути обычно принимают, что все шпалы вполне доброкачественны, подбиты равномерно и дают при одних и тех же давлениях одну и ту же осадку. Между тем в действительности мы никогда такого пути не имеем: в подбивке шпал всегда имеются неправильности, а, кроме того, неоднородность пути зависит также и от разнообразных атмосферных влияний, нарушающих эту однородность».

Профессор К. И. Щепотин [93; 94] также предлагал учитывать, «что в эксплуатирующемся пути нагрузки от рельсов на шпалы передаются неравномерно вследствие зазоров между элементами верхнего строения и различия упругих характеристик рядом лежащих прокладок, шпал и их основания».

Повышение мощности верхнего строения пути из-за высокой изгибной жесткости рельсов Р65 усиливает степень неравномерности опирания рельсошпальной решетки на балласт, на что указывал проф. М.Ф. Вериго в работе [17]. Вопросы накопления расстройств пути также неоднократно рассматривались и в зарубежных исследованиях [112; 113; 152].

Необходимость прогноза работы пути при повышении осевой нагрузки грузовых вагонов потребовала вновь вернуться к вопросу накопления деформаций с использованием теоретических и экспериментальных исследований [153], в частности результатов работ на стендовой насыпи Экспериментального кольца ОАО «ВНИИЖТ» на ст. Щербинка по оценке влияния характеристик подбалластного основания на деформативность пути [154; 79; 155; 156; 80]. Результаты многочисленных исследований по деформативности пути сведены в Таблицу 1.3.



Таблица 1.3 - Деформативность пути



Продолжение Таблицы 1.3



Продолжение Таблицы 1.3





Продолжение Талицы 1.3

Продолжение Таблицы 1.3



Продолжение Таблицы 1.3



Для оценки деформативности пути в местах расстройств и возможных изменений в сроках выправки пути были проведены расчеты в соответствии с методикой, изложенной в работе [157]. Из приведенных данных следует, что при увеличении модуля упругости подбалластного основания земляного полотна с 25 до 53 МПа и при пропуске расчетного тоннажа от 100 до 400 млн. т брутто, при нагрузке 300 кН на ось, постоянном модуле упругости верхнего строения пути U=50 МПа величина осадки уменьшается на 50 %.

Исходя из того, что по среднесетевым нормам планово-предупредительного ремонта при осевой нагрузке 235 кН проводится после пропуска 175 млн. т брутто, то, при нагрузке на ось 300 кН такая же осадка возникнет после пропуска 140 млн. т брутто.

Результаты наблюдений [81] за период пропуска 535 млн. т брутто показали, что с увеличением осевой нагрузки упругая осадка пути возрастет в среднем на 0,07 мм на 10 кН роста осевой нагрузки на участках с железобетонными шпалами и на 0,11 мм на 10 кН роста осевой нагрузки на участках с деревянными шпалами. Сравнение расчетной упругой осадки пути при осевой нагрузке 235 и 300 кН показало, что на различных участках стендовой насыпи рост упругой осадки составил 23-31 %, причем увеличение жесткости подбалластного основания снижало ее прирост. В результате режимных наблюдений в 2006—2007 гг. за остаточной осадкой уровня головки рельса (УГР) на участках стендовой насыпи получены зависимости по ее накоплению от 3 приведенные таблицы 1.3. пропущенного тоннажа, В пункте Экспериментальные исследования позволили также провести сравнительную оценку числа циклов приложения нагрузки 235 кН и 300 кН до достижения одинаковой деформации пути. Так, на участках с железобетонными шпалами повышение осевой нагрузки до 300 кН приводит к сокращению числа циклов в 1,25 раза, а с деревянными - в 1,32 раза.

На основе полученных экспериментальных данных была разработана аналитическая модель расчета накопления остаточных осадок пути, учитывающая помимо обычных расчетных характеристик величину жесткости подбалластного основания [81]. На графике (таблица 1.3 п. 4) видно, что при модуле упругости пути 50 МПа и приведенном модуле деформации подбалластного основания E = 25 МПа граница вертикальных неровностей между 3-й и 4-й степенью отступлений 25 мм достигается при осевой нагрузке 235 кН после пропуска 85 млн. т брутто, а при осевой нагрузке 300 кН – после пропуска 65 млн. т брутто (разница 24,5 %).

Зависимость интенсивности накопления остаточных осадок от размеров неровности при железобетонных шпалах [68] представлена в Таблице 1.3 п.5. Гиперболический зависимостей свидетельствует характер об увеличении интенсивности накопления остаточных осадок при уменьшении длины неровностей (при неизменной их глубине). Это увеличение особенно резко выражено для пути с железобетонными шпалами.

Исследования В.С. Лысюка [68] показывают, что с возрастанием пропущенного тоннажа деформации основной площадки увеличиваются по гиперболическому закону.

В той же публикации [68] показано изменение интенсивности накопления остаточных осадок железобетонных шпал в зависимости от динамической (а) и статической (б) жесткости прокладок (таблица 1.3 п.6).

Зависимость относительной осадки балластного слоя от пропущенного тоннажа [158] представлена в Таблице 1.3 п.7.

В исследованиях Лой Х., Аугустин А. [159], приведенное в п. 8 таблицы 1.3 показано, что прокладки из полиуретана снижают осадку на участках с движением большегрузных поездов.

По результатам ряда исследований [135] определена зависимость осадки пути от числа циклов нагружения для пути различного качества. Эта зависимость показана в п. 9 таблицы 1.3 и описывается выражением:
$$e_N = e_1 \cdot (1 + b \cdot \lg N), \tag{1.1}$$

где e_N - осадка пути после N циклов нагружения, мм;

N - количество циклов нагружения;

b - постоянная (≈0,2 для одинарной шпалы, ≈0,43 для рельсошпальной решетки);

е₁ - осадка после первого цикла нагружения, мм.

Зависимость осадки в мм от пропущенного тоннажа [45135] описывается выражением:

$$e_T = a_1 + a_0 \cdot \lg\left(\frac{T}{2 \cdot 10^6}\right),\tag{1.2}$$

где e_T - осадка в мм после пропущенного тоннажа *T*;

Т - пропущенный тоннаж, т брутто.

Для зависимости осадки от пропущенного тоннажа [135] определены коэффициенты выражения (1.2) для различного качества пути. Для пути хорошего качества $a_0=2...4$, $a_1=6...10$. Для пути среднего качества $a_0=4...6$, $a_1=10...15$. Для пути низкого качества $a_0=6...10$, $a_1=15...20$.

Для большого числа циклов нагружения справедливо выражение для осадки в мм:

$$e = a \cdot N^b, \tag{1.3}$$

где *а* и *b* - эмпирические коэффициенты, приведенные в Таблице 1.3 п.10 [135].

Зависимость осадки от динамической нагрузки от колес и жесткости пути иллюстрирует график (таблица 1.3 п.11) и выражение (1.4):

$$e_N = \left[\left[K_1 + K_2 \cdot \left(\frac{k_{2mi}}{K_3} \right) \right] \cdot \frac{P_{\text{дин}}}{P_{\text{эт}}} \right]^W \cdot \log N , \qquad (1.4)$$

где k_{2mi} - измеренная средняя жесткость пути на одинарной шпале после фазы стабилизации;

 K_{1-3} - постоянные факторы;

 $P_{\partial u h}$ - динамическая нагрузка от колес;

 $P_{_{9m}}$ - эталонная нагрузка от колес;

N - количество циклов нагружения;

W - коэффициент осадки пути.

Выражение (1.4) показывает, что неравномерные осадки в большей мере зависят от изменяющегося значения жесткости пути. На графике, приведенном в п. 11 таблицы 1.3, видно, что чем выше жесткость пути, тем ниже будут ожидаемые осадки. Однако, данный график так же показывает, что осадки увеличиваются с динамическими нагрузками от колес [135].

В исследовании В.О. Певзнера [84] определена зависимость роста трудозатрат на текущее содержание пути от увеличения осевой нагрузки с учетом доли тяжелых вагонов 11 %. Эта зависимость представлена в п. 12 таблицы 1.3 и определяется выражением:

$$\left(\frac{P_{H \ O \ B}}{P_{\ \delta \ a \ 3 \ O \ B \ a \ g}}\right)^{\chi} = \mathcal{K} = \frac{T_{H \ O \ B}}{T_{\ \delta \ a \ 3 \ O \ B \ a \ g}},\tag{1.5}$$

где Р_{нов} и Р_{базовая} - осевая нагрузка,

*T*_{нов} и *T*_{базовая} - трудозатраты на текущее содержание;

χ - эмпирический коэффициент.

В работе [84] определен рост интенсивности расстройств пути от изменения длины поездов. Эта зависимость представлена в Таблице 1.3 п.13.

В качестве опытных образцов в России использовались плитные и рамные конструкции верхнего строения пути, которые укладывались на балласт. Работы таких конструкций описаны в исследованиях Коншина Г.Г. [55; 56]. В них отмечалось, что распределение вертикальных напряжений на основной площадке земляного полотна на пути с железобетонными подрельсовыми основаниями в значительной степени отличается распределения при OT классической конструкции верхнего строения пути. Были получены зависимости затухания вертикальных напряжений в теле земляного полотна при различных плитных конструкциях пути. Результаты такого исследования приведены в Таблице 1.3 п. 14. Анализ результатов показывает, что при плитной конструкции верхнего строения в подрельсовой зоне напряжения от поездной нагрузки в 1,5 раза меньше, чем при пути с железобетонными шпалами. Однако, при использовании в

качестве конструкции верхнего строения пути малогабаритных рам напряжения увеличиваются практически в 2 раза. Следовательно, увеличение площади опирания подрельсового основания приводит к существенному снижению вертикальных напряжений на единицу площади основной площадки в подрельсовой зоне.

1.2 Анализ работы конструкций безбалластного пути

1.2.1 Достоинства и недостатки конструкций безбалластного пути

Сравнение балластного и безбалластного пути проводилось рядом специалистов [101; 162; 110; 108; 163; 109; 114]. Обобщенный сравнительный анализ конструкций пути выполнен автором [136; 137] и представлен в Таблице 1.4. Такой путь имеет лучшие параметры по гашению шума и вибрации [164; 165; 166; 167; 168; 169; 170; 171].

Особо следует отметить преимущество безбалластных конструкций по устойчивости бесстыкового пути к температурному выбросу.

Свойство конструкции	Балластный путь	Безбалластный путь
Удобство применения на ИССО	-	+
(тоннели, мосты, эстакады)		
Низкие капитальные затраты на	+	-
строительство		
Низкие затраты на текущее содержание	-	+
Возможность регулировки геометрии	+	-
рельсовой колеи		
Восстановление пути после сходов и	+	-
катастроф		
Гашение шума и вибрации	+	-
Устойчивость бесстыкового пути	-	+
Унификация для различных условий	+	-
эксплуатации		

Таблица 1.4 - Сравнительный анализ конструкций пути

Анализ высокоскоростных линий Японии [128], представленный в Таблице 1.5, показывает, что протяженность безбалластного пути растет, но при этом пропорционально увеличивается протяженность пути на жестком основании.

Характеристика	Линия						
	Токайдо	Санъё І	Санъё II	Тохоку	Дзоэцу	Омия —	
						Уэно	
Год сдачи в эксплуатацию	1964	1973	1974	1982	1982	1985	
Протяженность, км	1031	326	782	931	539	54	
Доля пути на балласте, %	100	95	32	10	50	0	
Доля искусственных	47	93	86	94	100	100	
сооружений, %							
Доля пути на жестком	0	5	68	90	95	100	
основании, %							

Таблица 1.5 - Характеристики высокоскоростных линий Японии

1.2.2 Классификация безбалластных конструкций пути

Многообразие безбалластных конструкций пути можно классифицировать на несколько групп [101], как показано на Рисунке 1.4.

Для дальнейшего рассмотрения выберем только конструкции без балласта с дискретным опиранием рельса, так как непрерывное опирание рельса предполагается только для трамвайных путей городского транспорта.

Для сравнения в Таблице 1.6 приведены значения общей высоты различных безбалластных конструкций.

Безбалластные системы широко используются во всем мире, особенно в последние четыре десятилетия. Протяженность безбалластных путей будет возрастать в связи с более высокими требованиями высокоскоростных железных дорог и тяжеловесных грузовых поездов.



Рисунок 1.4 Классификация конструкций верхнего строения пути

Таблица 1.6 - Сравнение общей высоты различных безбалластных конструкций (все размеры указаны в мм)

Наименование	CBL-	ABL-	HBL-	h-	Н - высота верхнего
	несущий	несущий	гидравличе-	расстояние	строения пути от
	слой бетона	слой	ски	между	головки рельса до
		асфальто-	связанный	нижним и	низа гидравлически
		бетона	слой	верхним	связанного слоя
1	2	3	4	5	6
Rheda Classic	360		300	99	931
Rhieda - Berlin	447		300	32	951
Rheda 2000	240	_	300	61-81	773-793
Züblin	240	_	300	63	775
Heitkamp	557	_	300	32	1061
LVT	216	_	300	117	805
ATD	_	300	300	249	1021
BTD	200	_	300	270	942

41

1	2	3	4	5	6
Walter	-	300	300	249	1021
Sato	-	300	300	148	920
FFYS	-	300	300	137	909
Getrac	-	300	300	236	1008
Shinkansen	190	-	300	53	715
Bögl	200	-	300	80	752
ÖBB-Porr	240	-	300	80	792
FCC	273	-	300	32	777
Hochtief	200	-	300	150	822
BES	257	_	300	32	761
BTE	200	_	320	69	761
Infundo	400	-	250	-	650

Таблица 1.7 иллюстрирует текущую длину различных конструкций безбалластного пути. Наиболее популярными безбалластными системами во всем мире являются Bögl, Shinkansen, Rheda, LVT, Züblin, Stedef и Infundo-Edilon. Еще выбор ОДНИМ важным фактором, влияющим на наиболее подходящий является опыт, конструкции, накопленный протяжении на многих лет строительства и эксплуатации.

Наименование	Страна	Протяженность, км
1	2	3
Bögl	Германия	4391
Shinkansen	Япония	3044
Rheda	Германия	2205
LVT	Швейцария	1031
Züblin	Германия	606

Таблица 1.7 - Протяженность различных безбалластных конструкций пути

Stedef	Франция	334
Infundo-Edilon	Нидерланды	211
ÖBB-Porr	Австрия	122,2
IPA	Италия	100
SATO	Германия	35,8
FFYS	Германия	33,1
BID	Германия	32
ATD	Германия	31,7
Getrac	Германия	15,3
Walter	Германия	9,4
FFC	Германия	1
LVT	Россия	1
Heitkamp	Германия	0,39
BTE	Германия	0,39
BES	Германия	0,39

1.2.3 Описание основных конструкций безбалластного пути

Конструктивные особенности различных вариантов безбалластного пути достаточно полно описаны в ряде работ [172; 173; 138; 174; 175; 176; 177; 178; 179; 180; 181; 182; 183; 184; 185; 186; 187; 188] и др. Автором диссертации эта информация обобщена в виде таблицы 1.8. В данном разделе подробно описаны только те конструкции безбалластного пути, которые были испытаны с участием автора на Экспериментальном кольце АО "ВНИИЖТ".

N⁰	Схема	Описание
		и ссылки
1	2	3
1	Рельс	НАЅ (High Attenuation System) Компания Consolis Шпалы в резиновых чехлах с демпфирующими подшпальными прокладками, замоноличенные в бетон [189; 190]
2		EBS (Embedded Block System) компания Tines Бетонный опорный блок упруго посаженый в бетонном лотке, который замоноличен в путевую плиту из армированного бетона [191; 192; 193; 194; 195; 196]
3	200 Provide and a second seco	FFC (Feste Fahrbahn Crailshein) компания Leonhard Weiss. состоит из несущего слоя бетона толщиной 20–22 см с продольным и поперечным армированием. Дюбели для скреплений устанавливают в заранее просверленные в затвердевшем бетоне отверстия и заливают специальным раствором [173]

Таблица 1.8 - Безбалластные конструкции пути











Далее приводится описание конструкций безбалластного пути, которые были испытаны в АО "ВНИИЖТ" при непосредственном участии автора [220; 221; 188; 222]. Численные значения характеристик безбалластных конструкций представлены в Приложении А.

1.2.4 Безбалластный путь Rheda

Rheda (Rheda 2000) - это конструкция компании RailOne (Германия) состоит из модифицированных двухблочных шпал с выступающей арматурой. Эти шпалы вмонтированы в монолитный армированный бетонный несущий слой так, что арматура шпал при укладке соединяется с арматурой несущего бетонного слоя. Rheda на земляном полотне - это монолитное железнодорожное полотно, состоящее из двух слоев, которые должны вступать в планомерное сцепление [136].

Бетонный несущий слой шириной 2,8 м и толщиной 240 мм опирается на гидравлически связанный несущий слой шириной 3,6 м и толщиной 300 мм, как

показано на Рисунке 1.5. Бетонная несущая плита запроектирована со стальными продольными армирующими стержнями Ø20 мм общим количеством 18 штук и одним поперечным армирующим стержнем Ø20 мм в каждом шпальном ящике.



Рисунок 1.5 Безбалластный путь Rheda

Скрепление Vossloh W300 специально разработано для безбалластных конструкций.

В сентябре 2010 г. конструкция Rheda уложена на Экспериментальном кольце ОАО "ВНИИЖТ" и на 46-м километре участка Саблино-Тосно Октябрьской железной дороги. Опытный участок на Экспериментальном кольце представляет собой собственно сам безбалластный путь длиной 25 м и два переходных участка переменной жесткости по 20 м. Переходные участки включают в себя склеенный полимерным составом балласт и дополнительную пару рельсов в середине колеи, аналогично челноку на искусственных сооружениях.

1.2.5 Безбалластный путь LVT в железобетонном коробе

Конструкция безбалластного пути LVT (Low Vibration Track) компании ОАО "РЖДстрой" (Россия) приведена на Рисунке 1.6, состоит из следующих элементов: рельсы, рельсовые скрепления типа Vossloh W30, полушпалы железобетонные ненапряженные с резиновыми чехлами и амортизирующими прокладками; несущая конструкция основания пути из неармированного бетона [136]. Конструкция пути проектируется с учетом минимизации шумовых воздействий в соответствии с требованиями СНиП 23-03-2003.

Опытный участок представляет собой нулевое место. Земляное полотно, усиленное геотекстилем Stabilenka и георешеткой Tefond «HP», после вырезки местного глинистого грунта отсыпано дренирующим грунтом. Основная площадка земляного полотна укреплена щебеночно-песчано-гравийной смесью (ЩПГС) толщиной 0,2 метра. Конструкция верхнего строения пути состоит из слоя тощего бетона мощностью 0,2 метра, железобетонного короба (конструкция, моделирующая тоннельную обделку) и забетонированных в коробе специальных железобетонных полушпал с рельсами P65 на скреплениях Vossloh.

Полушпалы в резиновых чехлах с амортизирующими прокладками заливаются путевым бетоном, толщина которого под подошвой полушпалы составляет не менее 20 см. Подрельсовая площадка полушпал выполнена без подуклонки для унификации конструкции для всех участков. Подуклонка обеспечивается позиционированием полушпалы в путевом бетоне перед заливкой.



Рисунок 1.6 Конструкция безбалластного пути LVT в железобетонном коробе

Все элементы конструкции LVT прошли сертификацию в России. В г. Сызрань начато производство полушпал для данного пути.

Конструкция LVT уложена на Экспериментальном кольце ОАО "ВНИИЖТ" в сентябре 2012 г. Опытный участок имеет длину 25 м безбалластной конструкции и по 25 м переходных участков. Путевой бетон в центре П-образной плиты имеет толщину 27 см. Уклон на поверхности путевого бетона 0,7 % для стока воды в водоотводный желоб.

Путевой бетон неармированный, класс бетона 25. Переходный участок представляет собой путь на балласте в той же П-образной плите. Под балласт уложен полимерный мат. Эластичный мат имеет толщину 15 мм и жесткость 0,1 Н/мм³. Разработана технология укладки стрелочных переводов на блоках LVT [223].

На Экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ» ст. Щербинка в период с 11 августа 2014 г. по 15 ноября 2014 г. проведены работы по сооружению опытного участка для испытаний четырех типов безбалластных конструкций пути LVT (РЖДстрой Россия), FFB (MaxBögl Германия), NBT (Alstom Франция), EBS (Tines Польша).

1.2.6 Безбалластный путь LVT

В отличии от LVT в железобетонном коробе эта конструкция сооружается без короба путем заливки неармированного бетона в опалубку.

Эта конструкция компании ОАО "РЖДстрой" (Россия) представлена на Рисунке 1.7 и представляет собой полушпалы (блоки) из армированного бетона, которые находятся в резиновом чехле с широкой амортизирующей прокладкой под блоком. Эти блоки в чехлах замоноличиваются в бетонное основание (путевой бетон) без армирования и без П-образной плиты, как в конструкции, уложенной в 2012 г. Узлы рельсовых скреплений на блоках могут быть самыми разными. На опытном участке представлены блоки со скреплениями компаний Pandrol, Vossloh, Schwihag. Конструкция LVT сертифицирована в России. В г. Сызрань установлена линия по производству блоков.



Рисунок 1.7 Безбалластный путь LVT

Блоки в резиновых чехлах замоноличены в неармированный слой путевого бетона толщиной 30 см. Расстояние от края блока до края бетонного слоя – 25 см, ширина – 3 м. Верхняя его поверхность выполнена с двухсторонним уклоном в середину колеи, где расположен водосборный желоб. Через 15 м имеются поперечные желоба для отвода воды наружу. Слой путевого бетона располагается на несущем слое армированного бетона. Толщина этого слоя – 20 см, ширина –

340 см. Под ним расположен гидравлически связанный слой неармированного тощего (с минимальным процентным содержанием цемента) бетона толщиной 20 см, шириной 380 см.

Первоначально сооружается слой из тощего бетона, затем возводится несущий слой. Далее осуществляется сооружение безбалластного верхнего строения пути LVT «сверху вниз»: из автомобильных миксеров бетон подается в бетоноукладчик, который перемещается по рельсам, рельсы находятся в подвешенном состоянии, опираясь на монтажные столбики с регулировочными элементами, И К ним подвешиваются блоки В резиновых чехлах С демпфирующими прокладками.

Размеры будущего бетонного слоя обеспечиваются опалубкой. В нижней части этого бетонного слоя задаются так называемые «провокаторы трещин» в виде металлических полос шириной 5 см, расположенных вдоль шпальных ящиков. Блоки имеют горизонтальную подрельсовую площадку, поэтому перед заливкой бетона точное положение рельсовых нитей с подвешенными блоками, задается регулировочными подуклонка И ширина колеи элементами И монтажными штангами. При заливке бетона затирка его верхней поверхности осуществляется вручную. Для поточного выполнения работ, в том числе в тоннелях, имеются специализированные поезда с приготовлением бетона на подвижном составе и укладкой его в путь.

1.2.7 Безбалластный путь MaxBögl

Безбалластный путь FFB (Feste Fahrbahn Boegl) компании MaxBögl (Германия) это железобетонные преднапряженные плиты заводского изготовления с рельсовыми скреплениями System 300 компании Vossloh. Представителем компании MaxBögl является компания OAO «БЭТ» (Россия).

Использование конструкции с применением готовых железобетонных плит заводского изготовления не требует дополнительных затрат по выполнению большого объема бетонных работ в полевых условиях. Плиты размещаются на несущей монолитной железобетонной плите с подливочным слоем, между собой соединены стяжными элементами.



Рисунок 1.8 Безбалластный путь MaxBögl

Основным элементом конструкции является железобетонная путевая плита заводского изготовления длиной 6,45 м, шириной 2,65 м, высотой 0,2 м, массой – 9,5 т. Армирование: преднапряженная стальная проволока диаметром 10 мм – в поперечном направлении, в продольном направлении – ненапряженная арматура. Рельсовые скрепления – 10 пар на плиту.

Технология сооружения безбалластного пути FFB реализуется «снизу вверх»: сначала устраивается морозозащитный гидравлически связанный слой из тощего бетона (марка бетона М 100-150, толщина слоя – 30 см). В слое пропиливаются поперечные прорези глубиной 3 см на расстоянии 6 м друг от друга. Они играют роль «провокаторов трещин». После этого плиты краном интервалом 15 Регулировка плит укладываются с друг ОТ друга. СМ осуществляется с помощью специальных винтовых домкратов. После точной регулировки производится заливка специальным раствором между плитами и гидравлически связанным несущим слоем. Заливка осуществляется через круглые отверстия в центре плиты. Толщина подливочного слоя – 3 см. После этого

соединяют плиты в продольном направлении шестью стяжными «замками», производят армирование и заполнение раствором поперечных швов между плитами.

1.2.8 Безбалластный путь Alstom

Безбалластный путь NBT (New Ballastless Track) компании Alstom (Франция) представляет собой монолитное железобетонное основание, в которое при монтаже замоноличены узлы рельсовых скреплений, предварительно закрепленные на вывешенных рельсах.

При монтаже рельсы устанавливаются на временные вертикальные опоры, к ним крепятся узлы рельсовых скреплений. При помощи винтовых регулировочных штанг устанавливается необходимая ширина колеи, подуклонка, уровень. После окончательной установки рельсов в необходимое геометрическое положение осуществляется заливка бетона так, что дюбели рельсовых скреплений оказываются замоноличеными в бетон. После застывания бетонной смеси временные опоры удаляются. Необходимо отметить, что данная технология применялась только при строительстве опытного участка на Экспериментальном кольце ввиду малой протяженности участка. При масштабном строительстве применяются специализированные комплексы [207; 224; 225].

Основу конструкции составляют две скользящие бетонные плиты, уложенные друг на друга, одна из которых имеет продольный «паз», другая – продольный «шип». Таким образом, допускается продольное перемещение плит относительно друг друга, но исключается поперечное смещение. Путевая плита выполнена из армированного бетона. Ширина плиты – 2,5 м, высота – 0,24 м. Скрепления установлены с шагом 0,6 м. Плита основания – из армированного бетона, ширина – 2,8 м, высота – 0,3 м. Поперечные стыки плит располагаются через 4,8 м (Рисунок 1.9). Путевая плита и плита основания расположены в шахматном порядке. Такое соединение плит обеспечивает их большую устойчивость в криволинейных участках пути.

На опытном участке используется два типа подкладочных скреплений: компании Pandrol типа SFC на участке протяженностью 37,5 м и компании Vossloh типа System DFF301 на участке в 37,5 м.

Монтаж безбалластного пути NBT осуществляется в следующей последовательности: плита основания армируется на месте строительства отдельными секциями по 4,8 м. При заливке бетоном в верхней части плиты устраивается «провокатор трещин» в виде пластиковой полосы, закрепленной между деревянными брусками. После затвердевания бетона сооружается путевая плита.



Рисунок 1.9 Безбалластный путь Alstom

Путевая плита также армируется на месте строительства отдельными секциями по 4,8 м таким образом, чтобы секции арматуры располагались в шахматном порядке относительно стыков плиты основания. Размеры плиты обеспечиваются опалубкой. «Провокаторы трещин» устраиваются аналогично плите основания.

Рельсы подвешиваются на монтажных стойках с регулировочными винтами. К рельсам подвешиваются полностью собранные узлы рельсовых скреплений с выступающими дюбелями. При заливке бетоном дюбели оказываются погруженными в него.

1.2.9 Безбалластный путь Tines

Безбалластный путь EBS (Embedded Block System) компании Tines компанией ОАО «БЭТ» (Россия). (Польша) совместно с Конструкция представляет собой блоки с демпфирующим полимерным слоем, замоноличенные армированного бетона. путевую плиту ИЗ Армированная В плита c деформационными швами расположена на гидравлически связанном слое с низким содержанием цемента в виде несущей плиты. Блоки сертифицированы в России и производятся на одном из заводов ОАО «БЭТ» в г. Вязьма.

Монтаж безбалластного пути EBS осуществляется следующим образом: заливается гидравлически связанный несущий слой в виде неармированной плиты из тощего бетона. Ширина плиты – 2,8 м, высота – 40 см. После этого производится связка каркаса арматуры для путевой плиты. Затем на монтажных столбиках устанавливаются рельсы, к которым подвешиваются блоки. В целом технология сооружения пути EBS аналогична технологии LVT, описанной выше. Безбалластный путь EBS компании Tines показан на Рисунке 1.10.



Рисунок 1.10 Безбалластный путь Tines

1.2.10 Земляное полотно для безбалластных конструкций пути

Перед укладкой опытных конструкций верхнего строения пути особое внимание было уделено сооружению основания (земляного полотна), которое имело однотипное устройство для всех конструкций (LVT, MaxBögl, Alstom, Tines),и сооружалось одним подрядчиком [226; 227].

Устройство укреплённого слоя нормируется Инструкцией по усилению железнодорожного пути укрепляющими добавками полифилизаторов (утверждена распоряжением ОАО «РЖД» 24.07.2013 №1619р).

Для укрепления в смесь грунта вносят жидкие и порошковые добавки. Концентрат «Консолид 44» смешивают с водой. Концентрат «Солидрай» – смесь поверхностно-активных веществ, цемент, известь, шлаки и другие компоненты, добавляют в грунт в виде готового порошка.

В основании четырёх конструкций безбалластного пути (LVT, MaxBögl, Alstom и Tines), устраиваемых на 2-ом пути Экспериментального кольца, уложен укреплённый полифилизаторами слой и слой щебёночно-гравийно-песчаной смеси (ЩГПС), рисунок 1.11 Толщина этих слоёв составляет соответственно 0,5 и 0,7 м. Их ширина равна 7 м, уклон поверху в поперечном сечении – 0,04.



Рисунок 1.11 Конструкция основания безбалластного пути: 1 – смесь грунтов, обработанных полифилизаторами; 2 – щебеночно-гравийно-песчаная смесь

По окончании укрепления грунта полифилизаторами в лабораторных условиях определена прочность на одноосное сжатие R_{Cж}. Ее устанавливали в сухом состоянии и после капиллярного водонасыщения. Среднее значения физико-механических характеристик укрепленного грунта представлены в Таблице 1.9.

60

R _{СЖ} сухих	Водонасыщение, %, от	R _{CЖ}	Коэффициент	
образцов, МПа	массы сухого грунта	водонасыщенных	водостойкости, К,	
		образцов, МПа	д.е.	
2,08	1,47	1,32	0,63	

Таблица 1.9 - Среднее значения физико-механических характеристик укрепленного грунта

При статических испытаниях применен прибор для определения несущей способности грунта InfraTest по DIN 18134-2001. Диаметр штампа равен 300 мм. Давление под штампом увеличивали ступенями по 0,1 МПа до 0,5 МПа. На Рисунке 1.12 показан график зависимости осадки штампа от давления.



Модуль деформации по DIN 18134-2001, МПа								
По перво	ой ветви на	гружения	По второй ветви нагружения					
a _o	a ₁	a ₂	a _o	a ₁	a ₂			
0,184	3,333	1,929	1,422	0,817	2,571			
	Ev ₁			Ev ₂				
52,4 107,0								
$Ev_2/Ev_1 = 2,0$								

Рисунок 1.12 График зависимости осадки штампа от давления на укрепленном полифилизаторами грунте, 3 км, ПК 1+14

Среднее значение модуля деформации по второй ветви нагружения с учетом повторной обработки грунта полифилизаторами составляет \overline{E}_{v_2} = 146 МПа.

Проектные значения модуля деформации $E_{v_2}^n$ укрепленного грунта должно быть не менее 80 МПа.

При динамических испытаниях модуля деформации использованы приборы TERRATEST 3000 и INSPECTOR 2. Из 23 определений TERRATEST 3000 в пределах 2 км ПК 8+16...3 км ПК3+31 получено среднее значение модуля деформаций $\overline{E}_{vd}^{T} = 147$ МПа (диапазон изменения E_{vd}^{T} составляет 118...221 МПа). Установленное среднее значение прибором INSPECTOR 2 при указанном выше количестве определений равно $\overline{E}_{vd}^{I} = 178$ МПа (диапазон изменений E_{vd}^{I} составляет 99...289 МПа). Данные приведены в Таблице 1.10.

Место-	Значения a ₀ , a ₁ , a ₂ и модуль деформации, МПа								Е
положе-	по пе	рвой вет	ви нагруж	сения	по вт	орой вети	ви нагруж	кения	$\frac{v_2}{r}$
ние, км,	a ₀	a ₁	a ₂	Е	a ₀	a ₁	a ₂	Е	E_{v_1}
ПК+				$-v_1$				v_2	
2, 8+50	0,018	2,237	1,571	74,4	0,358	2,761	-0,786	95,0	1,3
2, 9+98	0,144	3,44	2,00	50,7	1,39	1,52	1,21	105,7	2,1
3, 0+84	0,938	-2,37	19,71	30,0	3,32	2,90	5,21	40,8*	1,4
3, 1+14	0,184	3,333	1,929	52,4	1,422	0,817	2,571	107,0	2,0
3, 1+21	-0,210	5,710	-1,500	45,4	0,980	3,064	0,643	66,5*	1,5
3, 1+25	0,192	4,763	2,429	37,6	2,160	0,670	3,500	93,0	2,5
3, 1+26	0,032	2,347	0,071	94,4	0,494	1,573	-0,071	146,4	1,6
3, 2+8	-0,086	1,190	0,500	156,3	0,164	0,879	-0,214	291,7	1,9
3, 2+23	0,094	3,11	-1,14	88,8	1,192	1,00	0,21	203,0	2,3
3, 2+81	0,152	4,974	-0,857	49,5	1,594	1,524	0,643	121,9	2,5

Таблица 1.10 - Модуль деформации химически укрепленного грунта

Примечание: * Проведена повторная обработка полифилизаторами на участке длиной 40 м. Таким образом, полученные данные статических и динамических испытаний модуля деформации (упругости) укрепленного полифилизаторами грунта хорошо корреспондируются между собой.

После завершения работ по созданию укрепленного слоя грунта выполнена послойная отсыпка и уплотнение слоя щебеночно-гравийно-песчаной смеси, Технические условия ТУ 5711-284-01124323-2012.

Результаты статических испытаний этого слоя с использованием прибора InfraTest представлены в Таблице 1.11. Среднее значение модуля деформации по второй ветви нагружения равно $\overline{E}_{V_2} = 181,7$ МПа. График зависимости осадки штампа от давления при близком к среднему значению модуле деформации по второй ветви нагружения показан на Рисунке 1.13.

Место-		Значения a ₀ , a ₁ , a ₂ и модуль деформации, МПа								
положе-	по п	ервой вет	ви нагруж	ения	ПО В'	горой ветн	ви нагруж	ения	$\frac{v_2}{r}$	
ние, км,	a ₀	a ₁	a ₂	E	a ₀	a ₁	a ₂	Е	E _{v1}	
ПК+				² v ₁				^L v ₂		
2, 8+82	0,162	2,953	-1,071	93,1	0,750	1,603	-0,571	170,8	1,84	
2, 9+25	0,022	6,157	-3,429	50,6	1,600	1,427	0,071	153,8	3,04	
2, 9+83	0,138	2,427	-0,929	114,6	0,624	0,599	0,786	226,9	1,98	
3, 0+5	0,386	4,196	-2,643	78,3	1,270	1,180	0,000	190,7	2,44	
3, 0+15	0,614	0,130	3,500	119,7	0,978	-0,643	3,571	196,9	1,64	
3, 1+48	0,210	4,571	-2,286	65,6	1,434	1,271	-0,286	199,4	3,04	
3, 1+58	0,208	2,254	-0,857	123,2	0,558	1,166	-0,143	205,6	1,67	
3, 2+73	0,180	5,474	-2,857	55,6	1,596	1,301	0,214	159,7	2,87	

Таблица 1.11 – Модуль деформации щебеночно-гравийно-песчаной смеси

В соответствии с проектом модуль деформации щебеночно-гравийнопесчаной смеси для безбалластных конструкций верхнего строения пути должен составлять не менее 120 МПа. Фактические значения представлены на Рисунке 1.14.



Модуль деформации по DIN 18134-2001, МПа								
По первой ветви нагружения			По второй ветви нагружения					
a _o	a ₁	a ₂	a ₀ a ₁ a ₂					
0,208	2,254	-0,857	0,558	1,166	-0,143			
	Ev ₁		Ev ₂					
	123,2			205,6				

Рисунок 1.14 График зависимости осадки штампа от давления на щебеночно-гравийно-песчаной смеси, 3 км, ПК 1+45

1.3 Зарубежный опыт моделирования и испытаний безбалластного пути

Известны результаты математического моделирования напряженнодеформированного состояния безбалластного пути под поездной нагрузкой Королевского института технологий ТСК-Т 12-005 (Стокгольм), показывающие возможность применения безбалластной конструкции для высокоскоростного движения [109]. В работе [105] D. Косап проанализировал вопросы текущего содержания безбалластного пути и технологии по устранению неисправностей. Исследования Корейского национального железнодорожного института [228] направлены на обоснование характеристик переходных участков для условий высокоскоростного движения. В работе [100] С. Esveld исследует напряженное состояние и вибрации безбалластного пути, а так же параметры переходных

64

участков. Переходным участкам посвящены работы Центра транспортных технологий, Inc. (TTCI) в Пуэбло, США [229] и Технического Университет Лиссабона [230]. Исследования инженерного факультета университета Порто (Португалия) в работе [231] направлены на изучение напряжений и перемещений элементах безбалластного пути. Институт инженерии, Чжэцзянский В университет, Ханчжоу (Китай) провел лабораторные стендовые испытания осадок безбалластного пути и напряжений в нижележащих слоях [232]. Факультет машиностроения Университета Alameda Urquijo Бильбао (Испания) выполнил моделирование двух типов безбалластного пути в сравнении с путем на балласте [233].

Наибольший интерес представляют результаты математического испытаний безбалластной конструкции моделирования натурных И ДЛЯ совмещенного пассажирского И тяжеловесного грузового движения, выполненных в Центре транспортных технологий, Inc., TTCI (Пуэбло, Колорадо, США) на испытательном кольце с нагрузкой на ось 350 кН в течение 11 лет пропустив 565 млн. т брутто [234; 235].

Основной целью данного исследования демонстрация являлась долгосрочной эксплуатационной пригодности безбалластной конструкции под тяжеловесной нагрузкой от грузовых вагонов с сохранением параметров пути на уровне, требуемом для высокоскоростных пассажирских перевозок. В ходе реализации программы испытаний определялись: характеристики жесткости пути, динамический отклик, включая силы колесо-рельс, вибрация и прогиб рельса, геометрия пути и ее изменение, объем работ по текущему содержанию. Прогиб рельса не превышал 5 мм, упругая осадка не более 2 мм, остаточная осадка после 11 лет эксплуатации не более 6 мм. Увеличение ширины колеи не более 7,5 мм. Вплоть до последних лет 11-летнего периода испытаний, было проведено всего несколько эксплуатационных мероприятий, но ближе к завершению срока возникло несколько специфических проблем на участке БПК. Проблемы можно разделить на 3 группы: более высокая жесткость переходных

участков вызвала необходимость проведения подбивки и выравнивания, износ резиновых частей из-за попадания песка и пыли, и проблемы со скреплениями. Прежде всего, следует отметить, что бетонные плиты находились в хорошем состоянии на протяжении всего периода. Лишь незначительные трещины наблюдались на конец испытаний, не требовалось и не проводилось никаких ремонтных мероприятий на плитах.

Большинство описанных исследований не содержат информации о величине и интенсивности остаточных осадок безбалластного пути, а также о причинах их возникновения.

1.4 Структура диссертационного исследования

Для обозначенной проблемы нехватки провозной и пропускной способности существует множество путей решения. Выбранный в данном диссертационном исследовании путь приведен на Рисунке 1.15. На первом уровне - постановка цели. На первом уровне выбраны технические средства и организация движения. На втором уровне - технические средства инфраструктуры. На третьем уровне выбраны технические средства инфраструктуры. На третьем уровне выбраны технические пути. На четвертом уровне выбрана безбалластная конструкция пути. Сферы применения определяются конструкцией пути и видом движения. После чего разрабатываются технические требования для выбранных сфер применения и методы подтверждения этих требований путем математического моделирования и натурных экспериментов. Схема решения поставленных задач представлена на Рисунке 1.16.



Рисунок 1.15 Структура диссертационного исследования (постановка задачи)



Рисунок 1.16 Структура диссертационного исследования (решение задачи)

Выводы по главе 1:

1. С технической точки зрения безбалластный путь имеет несомненные преимущества перед путем на балласте. Это стабильность геометрии рельсовой колеи, существенно меньшая интенсивность осадок пути, минимальное текущее содержание, устойчивость бесстыкового пути.

2. С экономической точки зрения преимущества безбалластного пути не так очевидны. Увеличенная стоимость сооружения (в 5–10 раз по сравнению с балластным путем) и невысокие темпы строительства (в 3–5 раз медленнее по сравнению с балластным путем) компенсируются уменьшенными затратами на текущее содержание по прогнозу лишь через 25–30 лет.

3. Вероятность появления существенной неисправности безбалластного пути, требующей неотложного вмешательства, существенно меньше по сравнению с путем на балласте, но затраты на ее устранение существенно выше.

4. Натурные испытания безбалластного пути затруднены из-за высокой стоимости его строительства и выбора подходящих условий эксплуатации. В этой связи возрастает значение математического моделирования, которое должно позволить сократить объем испытаний. Для этого необходимо: во-первых, на начальном этапе проверить адекватность моделей, т.е. верифицировать их на большом количестве натурных экспериментов, во-вторых, определить концепцию совместного применения математического моделирования и ограниченного числа натурных экспериментов.

5. В условиях многообразия конструкций безбалластного пути целесообразно проведение их сравнительных испытаний в одинаковых условиях эксплуатации по единым методикам, в том числе для оценки затрат на текущее содержание.

Анализ мирового опыта сооружения и эксплуатации безбалластного пути показывает, что далеко не всегда увеличенные затраты на строительство безбалластного пути компенсируются уменьшенными затратами на его текущее

содержание. Это свойство безбалластных конструкций пути (БВСП) достаточно спорно и нуждается в дополнительном обосновании для условий Российских железных дорог с учетом имеющихся рисков.

6. Существенного отечественного опыта сооружения и эксплуатации безбалластного пути в настоящее время нет.

Использование зарубежных нормативных документов без адаптации к Российским условиям эксплуатации и гармонизации с отечественными нормативами не представляется возможным.

7. В результате проведенного анализа конструкций БВСП и опыта их эксплуатации в конце первой главы сформулирован ряд постановочных вопросов:

- каковы технические возможности безбалластного пути и границы экономической целесообразности его применения?

- какими должны быть требования к безбалластному пути?

- как проверить соответствие этим требованиям?

- как испытать конструкцию БВСП для высокоскоростного движения, в период, когда реальных условий эксплуатации еще не создано?

- как по результатам испытаний на Экспериментальном кольце можно судить о поведении конструкции в условиях высокоскоростного движения?

- по каким критериям сопоставлять различные конструкции безбалластного пути при сравнительных испытаниях?

- какой из элементов БВСП требует наибольших затрат на текущее содержание?

- каков срок службы безбалластного пути?

- будут ли за этот срок окупаемы повышенные затраты на строительство за счет меньших затрат на текущее содержание?

- для каких сфер применения пригоден безбалластный путь?

В следующих главах последовательно излагаются ответы на поставленные вопросы.

2. РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ БЕЗБАЛЛАСТНОГО ПУТИ

2.1 Классический расчет на прочность пути на балласте

Расчет выполнен в соответствии с Методикой оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности №ЦПТ-52/14 [193; 151]. Данный расчет распространяется на конструкции верхнего строения пути, предназначенные для эксплуатации на железных дорогах ОАО «РЖД» Российской Федерации колеи 1520 мм.

Многовариантный расчет пути на прочность [236; 151] выполнен с варьированием входных параметров пути в заданных диапазонах и получены значения напряжений в элементах путь (рельсах, шпалах, балласте и земляном полотне).

Оценочные критерии прочности пути выбраны из таблицы 2.1. По результатам этих расчетов можно определить, какой из входных параметров в наибольшей степени влияет на итоговые значения.

Результаты расчетов представлены в виде графиков в Приложении Б.

Критерии	Значения оценочных критериев		
	прочности при		
	грузонапряженности в млн. т		
	брутто на км в год		
	50-25	24-10	менее 10
Кромочные напряжения в рельсе [σ_{κ}]	200	240	340
МПа			
Напряжения в подрельсовом	1,6	2,0	3,0
основании [$\sigma_{\!\scriptscriptstyle \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! $			
Напряжения в несущем слое [σ_{δ}] МПа	0,42	0,45	0,5
Напряжения в основной площадке	0,1	0,11	0,12
земляного полотна [σ_3] МПа			

Таблица 2.1 - Оценочные критерии прочности пути

2.2 Расчет на прочность безбалластного пути

2.2.1 Методика расчета

В работе "Безбалластный путь для рельсовых путей" 2000 г. профессор Й. Айзенман и профессор Г. Лейкауф из Технического университета, г. Мюнхен предложили следующий вариант математической модели безбалластного пути [96].

Согласно их предположениям, допустимая сжимающая нагрузка на грунт в Н/мм² может быть рассчитана по формуле:

$$zul\sigma_z = \frac{0,006 * E_{dyn}}{1 + 0,7 * lg(n)},$$
 (2.2.1)

При $n = 2*10^6$ и $E_{dyn} = E_{stat} = E_{v2} = 45$ Н/мм² получаем для $zul\sigma_z = 0,050$ Н/мм²; так как фактический $E_{dyn} > E_{stat}$, то данная величина получена с некоторым запасом.

Расчет усилий в опорных точках, передаваемых от рельса в несущую плиту, может быть выполнен в расчетной модели балки на упругом основании Винклера согласно рисунку 2.6. Вследствие значительно большей жесткости при изгибе несущей плиты по сравнению с упруго опираемым рельсом, эта жесткость при расчете усилий в опорных точках может быть принята как бесконечно большая.

Уравнения для расчета сил в точках опирания рельса согласно теории балки на упругом основании:

Упругая характеристика рельса *L* в мм:

$$L = \left[\frac{4*E*I}{b*C}\right]^{0,25},$$
 (2.2.2)

Прогиб рельса y_z в мм:
$$y_{z} = \frac{1}{2*b*C*L} * \sum (Q_{i} * \eta_{i}), \qquad (2.2.3)$$

$$\eta_i = \frac{\sin\xi_i + \cos\xi_i}{e^{\xi_i}},\tag{2.2.4}$$

где

где

$$\xi_i = \frac{x_i}{L},\tag{2.2.5}$$

Сила *S* в точке опоры в Н:

$$S = b * C * a * y,$$
 (2.2.6)

где E - модуль упругости рельса, $H/мм^2$;

I - момент инерции сечения рельса, мм⁴;

b – ширина условной балки, мм;

С – коэффициент постели основания (балласта), Н/мм³;

 Q_i - осевая нагрузка, Н;

 η_i - фактор влияния для учета соседних осей;

x_i - расстояние между соседний осью и опорной, мм;

а - расстояние между опорными точками, мм.

Так как произведение b * C входит в формулы как постоянный коэффициент, то оно может быть заменено b * C = c/a, причем *с* является упругой постоянной скрепления с рельсом в Н/мм. Для упругой постоянной опорных точек рельса c = 40 кН/мм.

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 * 2,1 * 10^5 * 3055 * 10^4 * 550}{40\ 000}} = 804 \ \text{MM}.$$

При минимальной длине шпал 2,4 м происходит достаточное распределение нагрузок в точках опирания в поперечном направлении на несущую бетонную плиту шириной 3,0-3,2 м (зависит от ширины междупутья и толщины

морозозащитного слоя). В этом случае для определения размеров может применяться расчетная модель балки на упругом основании.

Для двухслойных несущих плит следует различать систему I «без сопряжения» и систему II «с сопряжением» между несущей бетонной плитой сплошного армирования и гидравлически связанным несущем слоем (ГСНС) или между асфальтобетонной несущей плитой и ГСНС. Расчет системных данных (коэффициент постели основания и h_I для системы *I*; h_{II} , *I*, e_0 и e_u для системы II) может быть сделан из условия, что реальная трехслойная система преобразуется в условную двухслойную систему (продольная балка с эквивалентной высотой h_I или h_{II}) [96]. На втором этапе упругая характеристика L_E условной балки рассчитывается по формулам, приведенным ниже. На третьем этапе по этим формулам можно рассчитать изгибающие моменты для обеих систем от сил в точках опирания, приведенных в предыдущем разделе, при этом силы в опорных точках должны учитываться только в положительной области линии моментов (μ >0). На четвертом этапе по формулам (2.2.7 – 2.2.11) рассчитываются нормальные растягивающие напряжения при изгибе σ_I и σ_2 на нижней грани обоих слоев.

Упругая характеристика *L_E* условной балки в мм:

$$L_E = \left[\frac{4*E_E*I_E}{b_E*C}\right]^{0,25},$$
(2.2.7)

Момент инерции I_E сечения условной балки, мм⁴:

$$I_E = \frac{b_E * h_{I,II}^3}{12}, \qquad (2.2.8)$$

Изгибающий момент М_{II} в условной балке, Н*мм:

$$M_{I.II} = \frac{L_E}{4} * \sum (S_i * \mu_i), \qquad (2.2.9)$$

где
$$\mu_i = \frac{-\sin\xi_i + \cos\xi_i}{e^{\xi_i}}$$
, (2.2.10)

где
$$\xi_i = \frac{x_i}{L}$$
, (2.2.11)

где E_E - модуль упругости условной балки = E, H/MM^2 ;

*b*_{*E*} – ширина условной балки, мм;

k – эквивалентный коэффициент постели основания по методу Eisenmann,
 H/мм³;

*S*_{*i*} - силы в точках опирания, H;

*µ*_{*i*} - фактор влияния для учета соседних осей.

Расчет изгибающей нагрузки в трехслойной системе, состоящей из несущей плиты, несопряженной с гидравлический связанным несущим слоем на упругом основании:

1) Эквивалентный коэффициент постели основания, Н/мм³:

$$k = \frac{E_3}{h^{x'}}$$
 (2.2.12)

где
$$h^{x} = 0,83 * h_{1} * \sqrt[3]{\frac{E_{1}}{E_{3}}} + c * h_{2} * \sqrt[3]{\frac{E_{2}}{E_{3}}},$$
 (2.2.13)

с =0,83 для неорганических связующих веществ

с = 0,90 для органических связующих веществ

2) Толщина эквивалентной системы с равной жесткостью E = E1, мм:

$$h_I = \sqrt[3]{\frac{E_1 * h_1^3 * E_2 * h_2^3}{E_1}}, \qquad (2.2.14)$$

3) Изгибающий момент М_I для эквивалентной системы — k, h_l и Ei:

4) Нормальные растягивающее напряжение при изгибе в слоях 1 и 2, Н*мм:

$$M_1 = M_I * \frac{E_1 * h_1^3}{E_1 * h_1^3 * E_2 * h_2^3},$$
 (2.2.15)

$$M_2 = M_I * \frac{E_2 * h_2^3}{E_1 * h_1^3 * E_2 * h_2^3}, \qquad (2.2.16)$$

$$\sigma_{rl} = 6 * \frac{M_1}{h_l^2}, \tag{2.2.17}$$

$$\sigma_{r2} = 6 * \frac{M_2}{h_2^2}, \tag{2.2.18}$$

5) Упругая характеристика, мм

$$L_I = \sqrt[4]{\frac{E_1 * h_1^3}{12 * (1 - \mu^2) * k}}, \qquad (2.2.19)$$

где *µ* - коэффициент поперечного расширения;

 $\mu_{Бетон} = 0,15;$

 $\mu_{Ac\phi aльm} = 0,50.$

Расчет изгибающей нагрузки в трехслойной системе, состоящей из несущей плиты, сопряженной с гидравлически связанным слоем на упругом основании:

- 1) Эквивалентный коэффициент постели основания как у системы І.
- 2) Толщина эквивалентной системы с равной жесткостью E = E, мм:

$$h_{II} = h_1 + 0.9 * h_2 * \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}},$$
 (2.2.20)

3) Определение момента M_{II} для эквивалентной системы — k, h_{II} и E_i .

4) Нормальное растягивающее напряжение при изгибе в слоях 1 и 2 в Н/мм², полученное для одной балки плиты с равной жесткостью.

$$\chi = \frac{E_2}{E_1} \operatorname{прu} E = E_1, \tag{2.2.21}$$

$$I = \sum (I_i + F_i * x_S^2); \qquad (2.2.22)$$

$$e_0 = \frac{\sum F_i * x_i}{\sum F_i},\tag{2.2.23}$$

где I - момент инерции сечения, мм⁴;

$$e_0 = \frac{h}{2} * \frac{E_2 * h_2}{E_1 * h_1 + E_2 * h_2} + \frac{h_1}{2}, \qquad (2.2.24)$$

$$e_u = h - e_0, [MM],$$
 (2.2.25)

$$\sigma_{r1,0} = \frac{M_{II}}{I} * e_0; , \qquad (2.2.26)$$

$$\sigma_{r1,u} = \frac{M_{II}}{I} * (h_1 - e_0), \qquad (2.2.27)$$

$$\sigma_{r2,0} = \chi * \frac{M_{II}}{I} * (h_1 - e_0), \qquad (2.2.28)$$

$$\sigma_{r2,u} = \chi * \frac{M_{II}}{I} * e_U , \qquad (2.2.29)$$

5) Упругая характеристика, мм

$$L_{II} = \sqrt[4]{\frac{E_1 * h_{II}^3}{12 * (I - \mu^2) * k}},$$
(2.2.30)

Разная ширина B₁ бетонной или асфальтобетонной несущей плиты и B_2 ГСНС или асфальтобетонного несущего слоя ($B_2 \leq B_1 + 2*h_2$, угол распределения нагрузки $\leq 45^\circ$) в хорошем приближении может быть учтена следующим образом.

Напряжения σ_1 и σ_2 в Н/мм² определяются следующими выражениями: система I без сопряжения:

$$\sigma_1 = \frac{6*\beta_1*M_1}{B_1*h_1^2},\tag{2.2.31}$$

(в подошве несущей плиты)

$$\sigma_2 = \frac{6*\beta_2*M_2}{B_1*h_2^2},\tag{2.2.32}$$

(в подошве несущего слоя) при этом

$$\beta_1 = \frac{E * h_1^3}{E_1 * h_1^3 + E_2 * h_2^3},\tag{2.2.33}$$

$$\beta_2 = (1 - \beta_1), \tag{2.2.34}$$

система II с сопряжением:

$$\sigma_1 = \frac{M_{II}*(h_1 - e_0)}{B_1*I},$$
(2.2.35)

(в подошве несущей плиты)

$$\sigma_1 = \frac{E_2 * M_{II} * e_u}{E_1 * B_2 * I},\tag{2.2.36}$$

(в подошве несущего слоя)

При учете ширины шпалы 300 мм получаем изгибающий момент *М* примерно на 10% меньше.

Альтернативно расчет нормальных растягивающих напряжений при изгибе может быть выполнен методом конечных элементов.

Для равномерной нагрузки q (Н/мм) в положительной области линии влияния момента (-0,25 * π) \leq (x/L) \leq (0,25 * π) изгибающий момент в Н*мм для обеих систем без и с сопряжением может быть рассчитан по следующей формуле:

$$M_{I,II} = 0,161 * q * L_{I,II}^2, \qquad (2.2.37)$$

2.2.2 Реализация расчета на прочность безбалластного пути

Математическое моделирование БВСП выполнено автором диссертации в среде Microsoft Excel в табличной форме [237]. Результаты моделирования представлены в Таблицах 2.2–2.7.

Величина	Значение	Ед.Изм.	Описание
			Модуль деформации второй ступени
$E_{dyn} = E_{stat} = E_{v2}$	45	[Н/мм2]	нагружения морозозащитного
			слоя
zulσ _z	0,050	[Н/мм2]	Допустимая сжимающая нагрузка на грунт
E	210000	[Н/мм2]	Модуль упругости рельса
Ι	3,06E+07	[мм4]	Момент инерции сечения рельса
С	40000	[Н/мм]	Упругая постоянная скрепления с рельсом
<i>a</i> ₁	550,00	[мм]	Расстояние между опорными точками
a ₂	1100,00	[MM]	r doeromine wexdy onophilian ro ikdan
Q	220000	[H]	Осевая нагрузка

Таблица 2.2 - Исходные данные для моделирования

Таблица 2.3 - Расчет силы в опорных точках для системы с отдельной осью и усилием на колесную пару 220 кН

Наимен.	S ₀	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₂	Ед.изм	Описание
L	770,723	770,723	770,723	[мм]	Упругая характеристика рельса
x	0,000	550,000	1100,000	[мм]	Расстояние между соседний осью и опорной
ε _i	0,000	0,714	1,427		Фактор влияния упругой характеристики рельса
η_i	1,000	0,691	0,272		Фактор влияния для учета соседних осей
У	0,981	0,678	0,267	[мм]	Прогиб рельса
S	39248,863	27120,823	10669,294	[H]	Сила в опорных точках

Наимен.	S ₀	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₂	Ед.изм	Описание
L	770,723	770,723	770,723	[мм]	Упругая характеристика рельса
x	0,000	550,000	1100,000	[мм]	Расстояние между соседний осью и опорной
ε _i	0,000	0,714	1,427		Фактор влияния упругой характеристики рельса
η_i	1,000	0,691	0,272		Фактор влияния для учета соседних осей
У	1,004	0,915	0,904	[мм]	Прогиб рельса
S	40165,566	36614,411	36151,550	[H]	Сила в опорных точках

Таблица 2.4 - Расчет силы в опорных точках для системы с двухосной тележкой (расстояние между осями 1850 мм) и усилием на колесную пару 220 кН

Таблица 2.5 - Расчет силы в опорных точках для тележки от скоростного поезда "Сапсан" и усилием на колесную пару 198 кН

Наимен.	S ₀	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₂	Ед.изм	Описание
L	770,723	770,723	770,723	[мм]	Упругая характеристика рельса
x	0,000	550,000	1100,000	[мм]	Расстояние между соседний осью и опорной
ε_i	0,000	0,714	1,427		Фактор влияния упругой характеристики рельса
η_i	1,000	0,691	0,272		Фактор влияния для учета соседних осей
У	0,956	0,640	0,255	[мм]	Прогиб рельса
S	38230,609	25596,400	10207,325	[H]	Сила в опорных точках

Таблица 2.6 - Расчет силы в опорных точках для системы с 4 осями и напряжениями на колесную пару 250 кН

Наимен.	S ₀	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₂	Ед.изм	Описание
L	770,723	770,723	770,723	[MM]	Упругая характеристика рельса
x	0,000	550,000	1100,000	[мм]	Расстояние между соседний осью и опорной
ε _i	0,000	0,676	1,353		Фактор влияния упругой характеристики рельса
η_i	1,000	0,630	0,189		Фактор влияния для учета соседних осей
у	1,096	0,665	0,266	[мм]	Прогиб рельса
S	55600,34	48456,35	53000,74	[H]	Сила в опорных точках

Силы в опорных точках для системы с двухосной тележкой (с межосевым расстоянием 1850 мм) будет использована как основной вид нагрузок для дальнейших расчетов.

Расчет нагрузок для модифицированного верхнего строения пути Rheda приведен в Таблице 2.7.

	Система 1 (без		Система 2 (с		Примечание
	сопряжен	ия между	сопряжени	ием между	
Наименование	слоя	іми)	слоя	ами)	
1	2	2	Ĩ	3	4
<i>В1</i> , [мм]	32	00	32	.00	
<i>B2</i> , [мм]	38	00	38	00	Геометрические
<i>h1</i> , [мм]	18	30	180		размеры БВСП
<i>h2</i> , [мм]	30	00	300		
<i>Е1</i> , [Н/мм2]	340	000	34000		Деформативные
<i>E2</i> , [Н/мм2]	5000	10000	5000	10000	характеристики
<i>ЕЗ</i> , [Н/мм2]	120	120	120	120	материалов
С	0,83	0,83	0,83	0,83	
<i>hx</i> , [мм]	1844,493	2068,866	1844,493	2068,866	
<i>С=к,</i> [Н/мм3]	0,065	0,058	0,065	0,058	Эквивалентный
					коэф. постели
					основания

Таблица 2.7 - Расчет нагрузок, возникающих внутри БВСП

Продолжение Таблицы 2.7

1	2	3	4	5	6
<i>h1,2</i> , [мм]	214,016	239,706	322,515	359,558	Толщина
					эквивалентной
					системы
<i>L1,2</i> [мм]	1143,138	1280,813	1554,805	1736,016	Упругая
					характеристика
μ1	0,268	0,327	0,421	0,470	Факторы
μ2	-0,090	-0,038	0,061	0,120	влияния учета
					соседних осей
<i>Iu</i> [мм4/мм]	-	-	2,80E+06	3,87E+06	Момент
					инерции сечения
$\beta I(e0)$	0,595	0,423	342,756	311,053	
β2 (eu)	0,405	0,577	137,244	168,947	
<i>M1,2</i> [мН/мм]	3,383E+07	4,063E+07	5,462E+07	6,410E+07	Изгибающий
					момент
<i>σ1</i> [Н/мм2]	1,165	0,996	0,261	0,057	Нормальное
					растягивающее
					напряжение при
					изгибе в слое 1
<i>σ2</i> [Н/мм2]	0,240	0,411	0,259	0,398	Нормальное
					растягивающее
					напряжение при
					изгибе в слое 2
max <i>σ1</i> [Н/мм2]	2,097	1,792	0,470	0,103	Предельное
					нормальное
					растягивающее
					напряжение при
					изгибе в слое 1
тах σ2 [Н/мм2]	0,433	0,740	0,466	0,717	Предельное
					нормальное
					растягивающее
					напряжение при
					изгибе в слое 2

Результатом работы данной модели является определение изгибающих моментов и нормальных растягивающих напряжений при изгибе в БВСП Rheda.

В данной математической модели существуют две системы расчета: одна система описывает конструкцию пути без сопряжения между слоем ГСНС и бетонной несущей плитой, а вторая обладает таким сопряжением.

Расчет ведется сразу для двух состояний с ГСНС, которые выражаются через изменяющийся модуль деформации второй ступени нагружения:

1) Состояние ГСНС с наличием структурных трещин, соответствующих снятию напряжения ($E_2 = 5000$ H/мм2).

2) Состояние ГСНС без выраженных структурных трещин ($E_2 = 10000$ H/мм²).

Расчеты бетонных и железобетонных конструкций производятся в соответствии с требованиями ГОСТ 27751-2014 [238]. Трещиностойкость железобетонных элементов, материал которых испытывает осевое или двухосное растяжение, определяется длительной прочностью:

$$\sigma_{max} < \sigma_3, \tag{2.2.38}$$

Согласно опытным данным строительства дорог и аэродромов в качестве максимально допустимых напряжений возможно принять для ГСНС – 0,8 Н/мм2, а для бетонной несущей плиты сплошного армирования – 1,8 Н/мм².

Если значение напряжения на нижней стороне слоя оказывается выше допустимого, то увеличивается количество трещин, их длина и раскрытие, что ведет к ускоренному износу и деградации конструкции.

С помощью данной математической модели возможно найти оптимальные параметры ВСП. Данные параметры напрямую зависят от нагрузки, прикладываемой к конструкции.

Рассмотрим результаты расчета максимально возможных нормальных растягивающих напряжений при изгибе на нижней стороне ГСНС и нижней стороне бетонной несущей плиты в Таблицах 2.8–2.11. Диаграммы представлены на Рисунках 2.1–2.4.

Таблица	2.8	-	Результаты	расчета	максимальных	растягивающих
напряжений, во	зника	ющі	их в БВСП бо	ез сопряже	ния между слоям	1И

Нагрузка на	max <i>σ1</i> [Н/мм2]	max <i>σ1</i> [Н/мм2]	max <u>σ2</u> [Н/мм2]	тахσ2 [Н/мм2]
ось, кН	при <i>E2</i> =5000	при <i>E2</i> =10000	при <i>E2</i> =5000	при <i>E2</i> =10000
225	2,102	1,798	0,434	0,742
250	2,341	2,002	0,483	0,827
331,3	3,105	2,656	0,641	1,097

Таблица 2.9 - Результаты расчета максимальных растягивающих напряжений, возникающих в БВСП с сопряжением между слоями

Нагрузка на	maxσ1 [Н/мм2]	maxσ1 [Н/мм2]	тахσ2 [Н/мм2]	maxsσ2 [Н/мм2]
ось, кН	при <i>E2</i> =5000	при <i>E2</i> =10000	при <i>E2</i> =5000	при <i>E2</i> =10000
225	0,472	0,103	0,469	0,721
250	0,526	0,115	0,522	0,803
331,3	0,697	0,153	0,692	1,065



Рисунок 2.1 Нормальные растягивающие напряжения в несущей бетонной плите (система без сопряжения между слоями)



Рисунок 2.2 Нормальные растягивающие напряжения в ГСНС(система без



сопряжения между слоями)

Рисунок 2.3 Нормальные растягивающие напряжения в несущей бетонной плите

(система с сопряжением между слоями)



Рисунок 2.4 Нормальные растягивающие напряжения в ГСНС (система с сопряжением между слоями)

Из представленных выше данных видно, что система, не обладающая сопряжением между слоями конструкции, не может выполнить условия эксплуатации, прочности И надежной предъявляемые К конструкции безбалластного пути при данных геометрических характеристиках. Поэтому для таких нагрузок применение данной конструкции пути нецелесообразно. В системе сопряжением между слоями за счет большей жесткости конструкции С уменьшаются напряжения, возникающие на нижней стороне бетонной несущей плиты, но возрастают напряжения на нижней стороне ГСНС. Система 2 является оптимальной с точки зрения прочностных характеристик для нагрузок 225 и 250 кН/ось, но не может долговременно работать при нагрузке в 335 кН/ось.

Одним из методов компенсации избыточных напряжений является изменение толщины бетонной несущей плиты и ГСНС в большую сторону.

Проведем расчет усилий в слое при изменении размеров бетонной несущей плиты от 180 мм до 350 мм. Расчетная нагрузка составит 335 кН/ось.

Результаты расчета максимальных растягивающих напряжений возникающих в БВСП без сопряжения между слоями при изменении толщины несущей плиты приведены в Таблице 2.10. Результаты расчета максимальных

растягивающих усилий возникающих в БВСП с сопряжением между слоями при изменении толщины несущей плиты представлены в Таблице 2.11. Графически нормальные растягивающие напряжения в конструкции для систем без сопряжения между слоями и с сопряжением между слоями представлены соответственно на Рисунках 2.5 и 2.6.

Таблица 2.10 - Результаты расчета максимальных растягивающих напряжений, возникающих в БВСП без сопряжения между слоями при изменении толщины несущей плиты

Толщина	maxσ1 [Н/мм2]	max <i>σ1</i> [Н/мм2]	тахσ2 [Н/мм2]	тахσ2 [Н/мм2]
плиты, [мм]	при <i>E2</i> =5000	при <i>E2</i> =10000	при <i>E2</i> =5000	при E2 =10000
180	3,296	2,82	0,68	1,164
250	3,248	3,003	0,483	0,892
300	3,054	2,917	0,378	0,722
350	2,834	2,761	0,301	0,586



Рисунок 2.5 Нормальные растягивающие напряжения в конструкции (система без

сопряжения между слоями)

Таблица 2.11 - Результаты расчета максимальных растягивающих напряжений, возникающих в БВСП с сопряжением между слоями при изменении толщины несущей плиты

Толщина	maxσ1 [Н/мм2]	max <i>σ1</i> [Н/мм2]	тахσ2 [Н/мм2]	тахσ2 [Н/мм2]
плиты, [мм]	при <i>E2</i> =5000	при <i>E2</i> =10000	при <i>E2</i> =5000	при <i>E2</i> =10000
180	1,018	0,713	0,698	1,074
250	0,98	0,63	0,574	0,914
300	0,896	0,493	0,505	0,822
350	0,623	0,237	0,45	0,745



Рисунок 2.6 Нормальные растягивающие напряжения в конструкции (система с сопряжением между слоями)

Также необходимо проверить влияние изменения толщины ГСНС на прочностные характеристики конструкции. Просчитаем постепенное увеличение толщины плиты ГСНС под постоянной нагрузкой 335 кН/ось. Результаты сведены в таблицы 2.12 и 2.13 Нормальные растягивающие напряжения в конструкции в виде графиков представлены на Рисунках 2.7 и 2.8.

Толщина	тахσ1 [Н/мм2]	тахσ1 [Н/мм2]	тахσ2 [Н/мм2]	тахσ2 [Н/мм2]
плиты, [мм]	при E2 =5000	при E2 =10000	при E2 =5000	при E2 =10000
300	3,296	2,82	0,68	1,164
350	2,995	2,438	0,721	1,174
400	2,683	2,095	0,738	1,153
450	2,386	1,801	0,739	1,115



Рисунок 2.7 Нормальные растягивающие напряжения в конструкции (система без

сопряжения между слоями)

Таблица 2.13 - Результаты расчета максимальных растягивающих напряжений, возникающих в БВСП с сопряжением между слоями при изменении толщины ГСНС

Толщина	тахσ1 [Н/мм2]	тахσ1 [Н/мм2]	тахσ2 [Н/мм2]	тахσ2 [Н/мм2]
плиты, [мм]	при E2 =5000	при E2 =10000	при E2 =5000	при Е2 =10000
300	0,467	0,247	0,698	1,074
350	0,368	0,185	0,697	1,047
400	0,285	0,154	0,691	1,016
450	0,226	0,138	0,682	0,983



Рисунок 2.8 Нормальные растягивающие напряжения в конструкции (система с сопряжением между слоями)

Для увеличения прочности конструкции также возможно увеличивать ширину несущей плиты и слоя ГСНС. Сведем результаты расчетов в таблицы 2.14–2.17. Нормальные растягивающие напряжения в конструкции графически представлены на Рисунках 2.9 - 2.12.

Таблица 2.14 - Результаты расчета максимальных растягивающих напряжений, возникающих в БВСП без сопряжения между слоями при изменении ширины несущей плиты

Ширина	maxσ1 [Н/мм2]	тахσ1 [Н/мм2]	тахσ2 [Н/мм2]	тахσ2 [Н/мм2]
плиты, [мм]	при E2 =5000	при E2 =10000	при E2 =5000	при Е2 =10000
3200	3,296	2,82	0,68	1,164
3400	3,102	2,654	0,68	1,164
3600	2,93	2,506	0,68	1,164
3800	2,776	2,375	0,68	1,164



Рисунок 2.9 Нормальные растягивающие напряжения в конструкции (система без

сопряжения между слоями)

Ширина плиты	maxσ1 [Н/мм2]	тахσ1 [Н/мм2]	тахσ2 [Н/мм2]	тахσ2 [Н/мм2]
плиты, [мм]	при E2 =5000	при E2 =10000	при E2 =5000	при E2 =10000
3200	0,74	0,162	0,735	1,13
3400	0,697	0,153	0,735	1,13
3600	0,658	0,144	0,735	1,13
3800	0,623	0,137	0,735	1,13



Рисунок 2.10 Нормальные растягивающие напряжения в конструкции (система с

сопряжением между слоями)

Ширина	тахσ1 [Н/мм2]	maxσ1 [Н/мм2]	тахσ2 [Н/мм2]	тахσ2 [Н/мм2]
ГСНС, [мм]	при E2 =5000	при E2 =10000	при E2 =5000	при E2 =10000
3800	3,296	2,82	0,68	1,164
4000	3,296	2,82	0,646	1,106
4200	3,296	2,82	0,616	1,053
4400	3,296	2,82	0,588	1,005



Рисунок 2.11 Нормальные растягивающие напряжения в конструкции (система без сопряжения между слоями)

Таблица 2.17 - Результаты расчета максимальных растягивающих напряжений, возникающих в БВСП с сопряжением слоями при изменении ширины ГСНС



Рисунок 2.12 Нормальные растягивающие напряжения в конструкции (система с сопряжением между слоями)

Для оценки влияния выведена удельная величина уменьшения значения напряжений на миллиметр приращения геометрического параметра для увеличения ширины плиты, ГСНС, и толщины плиты и ГСНС. Результаты представлены в Таблице 2.18. Исходя из полученных данных, её следует выводить для системы с сопряжением между слоями, как наиболее полно удовлетворяющей условиям прочности при заданной нагрузке.

Таблица 2.18 – Сводная таблица уменьшения напряжений в конструкции при изменении геометрических характеристики несущих слоев

Среднее уменьшение напряжений	maxσ1 [Н/мм2] при E2 =5000	maxσ1 [Н/мм2] при E2 =10000	maxσ2 [Н/мм2] при E2 =5000	maxσ2 [Н/мм2] при E2 =10000
Для увеличения толщины плиты	0,00232	0,00280	0,00146	0,00194
Для увеличения толщины ГСНС	0,00161	0,00073	0,00011	0,00061
Для увеличения ширины плиты	0,00020	0,00004	0,00000	0,00000
Для увеличения ширины ГСНС	0,00000	0,00000	0,00017	0,00026

Вывод по разделу 2.2. Из зависимостей видно, что изменение толщины бетонной несущей плиты положительно сказывается на увеличении прочности конструкции пути как в системе с сопряжением между слоями, так и в системе без сопряжения.

Изменение толщины ГСНС, в свою очередь, не оказывает настолько заметного влияния на уменьшение усилий на нижней стороне ГСНС, но уменьшает напряжения на нижней стороне бетонной несущей плиты, особенно в системе с сопряжением между слоями.

Изменение ширины несущей плиты оказывает влияние только на уменьшение напряжений в первом слое. Изменения в ГСНС также оказывают влияния только на напряжения во втором слое.

По сводной ведомости хорошо видно, что увеличение толщин несущих слоев безбалластного пути оказывает куда больший эффект на прирост прочности конструкции, чем увеличение ширины несущих слоев.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, ЧТО увеличение геометрических размеров несущих безбалластного слоев ПУТИ В целом положительно сказывается на прочностных характеристиках данной конструкции.

Необходимо ввести систему ограничений для оценки оптимальности конструкций пути. Такими факторами могут стать трудозатраты, необходимые для возведения конструкции пути при различных геометрических параметрах.

2.3 Безбалластный путь как многослойная балка на упругом основании

2.3.1 Расчетные схемы

В настоящее время в технической литературе и проектной практике наиболее широко применяются следующие модели упругого основания [239; 240; 241; 242; 243; 244]:

1) модель Винклера (модель коэффициента постели);

2) модель упругого однородного изотропного полупространства;

3) модель основания с двумя упругими характеристиками.

Кроме выше перечисленных существуют другие модели - они являются комбинациями этих трех.

Модель Винклера

Гипотеза Винклера, которая впервые была применена для расчета железнодорожных путей в 1868 году, предполагает, что между осадкой и реактивным давлением грунта существует прямая зависимость.

С физической точки зрения модель Винклера может быть представлена множеством несвязных между собой одинаковых упругих пружин, опирающихся на абсолютно жесткое основание (Рисунок 2.13).



Рисунок 2.13 Физическое представление модели Винклера

Достоинства модели Винклера:

- исключительная простота и наглядность расчетной модели основания;

- возможность учета разнообразных расчетных факторов при проектировании сооружении;

- возможность использования относительно невысокой точности параметров, характеризующих деформативные свойства грунтов;

- малое влияние неточности, допущенной при определении величины коэффициента жесткости на конечные результаты расчета;

Недостатки модели Винклера:

- деформация основания происходит только в области, приложенной к нему нагрузки;

- значение коэффициента постели К зависит от размеров штампа, которым производится испытание для определения этой величины.

Модель линейно деформируемого полупространства

В основу модели линейно деформируемого полупространства положен закон Гука – линейная зависимость между напряжениями и деформациями и, что весьма существенно, представления об идеальной упругости материала – полное восстановление деформаций при снятии нагрузки, т. е. в условиях одноосного простого сжатия или растяжения (рисунок 2.14)



Рисунок 2.14 Модель линейно деформируемого полупространства

Для грунтов, наоборот, характерно наличие преимущественно остаточных деформаций. Поэтому модель линейно деформируемого полупространства может применяться только на этапе однократного нагружения грунтовой среды без последующей разгрузки, что для большинства практических строительных случаев статических нагрузок и происходит в действительности.

При использовании модели линейно деформируемого полупространства любая задача сводится к решению системы уравнений, в состав которой, как известно из курса теории упругости, входят статические уравнения, геометрические соотношения и физические уравнения.

Модель упругопластической среды

Эта модель представляет собой синтез модели линейно деформируемого полупространства и модели среды теории предельного равновесия, что предполагает наличие в грунтовой среде как области среды линейно деформируемого полупространства, так и области среды теории предельного равновесия (Рисунок 2.15).



Рисунок 2.15 Представление модели упругопластической среды

Данная модель грунтовой среды может быть проиллюстрирована на примере одноосного сжатия. В этом случае после начального этапа линейных деформаций образец грунта переходит в предельное состояние.

Данная модель рекомендуется для приближенной оценки напряженнодеформированного состояния. Она учитывает основные свойства грунта, такие как упругое поведение при малых нагрузках, малая жесткость материала при разрушении, условие разрушения и упругая разгрузка после течения.

Явление поверхностных волн

В ряде фундаментальных работ [245; 246; 247; 248; 249; 250; 251] посвященных изучению явления поверхностных волн Релея справедливо отмечается непригодность для этих целей упрощенных моделей железнодорожного пути. Как правило, использовались такие модели грунтовых оснований, как основание Винклера, Власова-Леонтьева, не учитывающие тот факт, что деформация тела в точке зависит не только от давления в этой точке, но и в соседних точках.

В работе [245] отмечается, что «достаточно хорошо описывая процесс статического и квазистатического нагружения конструкции, гипотеза Винклера не дает возможность исследовать динамические явления, эффекты, связанные с движущимися высокоскоростными нагрузками. Приближенные модели оснований не позволяют изучать вопросы о распространении поверхностных волн типа Релея, вызванных движением и вибрацией нагрузки, о наличии конечнорезонансных явлений и волноводных эффектов в балластной призме, слоях грунтового массива».

Как отмечено в работах [245; 246; 247; 248; 249; 250; 251], поверхностные волны в основном имеют место для конструкций пути на балласте или с обводненным земляным полотном или иными причинами появления "мягкого" грунта, в котором скорость распространения волн Релея сопоставима со скоростью движения поезда. Когда поезд "догоняет" поверхностную волну Релея возникает резонанс и "почвенный удар".

В исследовании, проведенном в Университете Хериота-Уатта (Великобритания) Heriot–Watt University (HWU) Report - February 2015: Geodynamic Modelling of Track Bed and Earthworks, document number C469-HWU-PM-REP-000001-Final Draft [252], обобщили данные о возникновении динамического эффекта при высокой скорости движения поезда для грунтов различной деформативности и плотности. В этом исследовании определена допустимая скорость движения 100м/с (360км/ч) при заданном отношении к скорости распространения волн Релея. Это отношение в соответствии с требованиями HS2 в Великобритании HS2 Technical Standards for Earthworks (Document no. HS2-HS2-GT-STD-000-000001) for Earthworks [253] для высокоскоростного движения составляет 0,6.

Модуль Юнга ЩПГС составляет более 300 МПа, для песка защитного слоя и грунта замены – более 100 МПа. Материалы с модулем более 70 МПа обеспечивают скорость прохождения волн Релея достаточную для того, чтобы избежать динамических эффектов.

В случае с современными конструкциями безбалластного пути маловероятно появление "мягких" или обводненных грунтов в насыпи. Специальной подготовке подвергается от 2 до 5 м полотна с заменой грунта и его послойным уплотнением со специальными мероприятиями по водоотведению. Кроме того на поверхности сплошной бетонный слой имеет толщину от 30 до 80 см.

Явление поверхностных волн Релея целесообразно рассмотреть не на Экспериментальном кольце, а на высокоскоростном полигоне, которым станет первая очередь BCM2 на участке Железнодорожный-Владимир.

2.3.2 Обоснование расчетной схемы на модифицированном основании Винклера

В ряде работ [241; 242; 242; 244] отмечается, что с формальной точки зрения модель Винклера не является достаточно строгой. Действительно, наблюдения за натурными сооружениями и экспериментальные исследования работы оснований и фундаментов показывают, что осадка основания: зависит не только от нагрузки в данной точке, но и от нагрузки соседних точек; что грунт оседает не только под фундаментом, но и по соседству с ним; что величина коэффициента постели зависит не только от вида грунта, но также от величины и формы загруженной площади и, наконец, что грунт на растяжение не работает. Эти формальные недостатки модели привели к появлению предложений о замене ее в практических расчетах моделью упругого полупространства и возникновению ряда новых моделей грунтового основания, в большей или меньшей мере устраняющих указанные недостатки. Однако степень погрешности, вносимая гипотезой коэффициента постели в расчет конструкций па грунтовом основании, при этом достаточно мала. Проведенные испытания [241] показали следующее:

1. Деформации поверхности грунта за пределами загруженной части очень быстро затухают, поэтому грунты обладают весьма малой распределительной способностью. Модель упругого полупространства сильно преувеличивает распределительную способность грунта и опытами не подтверждается.

2. Сравнительные расчеты показали, что модель Винклера, полностью пренебрегающая осадками вне грузовой площади, приводит к практически совпадающим результатам с моделью П.Л. Пастернака при определении прогибов и усилий в плитах. Следовательно, модель Винклера может применяться для практических расчетов конструкций, лежащих на грунтовом основании.

3. Исследования действительной работы балок, лежащих на различных грунтовых основаниях (насыпной песок, уплотненный илистый грунт), также подтвердили правильность вывода о приемлемости модели Винклера для практических расчетов. Эпюры осадок и изгибающих моментов, построенные на основе опытных и теоретических данных, показали, что действительные условия работы системы «балка-основание» наилучшим образом отражает модель Винклера.

4. Опыты свидетельствуют о том, что величина коэффициента жесткости основания зависит не только от вида грунта, но и от размеров и формы подошвы фундамента. Однако это обстоятельство не может служить основанием для критики модели в целом, так как при определении коэффициента жесткости можно учесть и форму, и размеры плиты.

Кроме того необходимо учесть, что при проведении инженерногеологических изысканий имеют место неточности при определении характеристик основания, не даёт ЧТО возможности выполнять точные нелинейные расчеты на основании неточных данных. В процессе строительства и свойства последующей эксплуатации здания грунтов основания могут изменяться.

В работе Терегуловой Э.Р. [242] представлены «экспериментальные исследования, посвященные определению осадок в окрестности грузового штампа и охватившие более двухсот испытаний грунтов в естественном залегании показали, что модель упругого полупространства значительно преувеличивает распределительную способность грунта по экспериментальным данным объем осадочной лунки вне грузового штампа составляет не менее 10% от того же объема теоретической осадочной лунки упругого полупространства, если даже пренебречь той частью теоретической осадочной лунки, где осадки составляют менее 5% от осадки под штампом».

Е.А. Палатников [254] показал непосредственным сравнением, «что гипотеза Винклера, полностью пренебрегающая осадками вне грузовой площадки, приводит к совпадающим результатам по схеме упругого слоя в весьма широких пределах, то есть наличие достаточно быстро затухающих осадок вне грузовой площадки не вносит заметных возмущений в работу плиты, определенную без учета этих осадок.»

В ряде случаев расчетные величины для упругого слоя и по гипотезе Винклера с необходимой для практики точностью совпадают. А это означает, что на основе гипотезы коэффициента постели можно вести расчеты даже тогда, когда в основании плиты находится мощный слой идеально упругого тела (каковым не является грунт). Исходя из изложенного выше, принимаем в качестве расчётной модели - модифицированное основание Винклера и расчетную схему, представленную на Рисунке 2.16.

В настоящее время гипотеза Винклера включена в ряд действующих нормативных документов [255; 256].



Рисунок 2.16 Расчетная схема

2.3.3 Методика расчета безбалластного пути как многослойной балки на упругом основании

А.Я. Коганом в ряде работ [44; 10; 48] предложено рассматривать безбалластный путь для тоннелей как многослойную балку. Эту модель целесообразно применить для современных конструкций безбалластного пути [257; 188].

В предлагаемой модели колебания пути рассматриваются как колебания конструкции, содержащей три бесконечно длинные балки, нижняя из которых лежит на модифицированном основании Винклера, а верхняя и средняя опираются на упругие прослойки, в основном имеющие характеристики основания Винклера. Для конкретной конструкции безбалластного пути это соответственно рельс, бетонная несущая плита (путевой бетон) и гидравлически связанный слой (тощий бетон).

На верхнюю балку действует переменная во времени динамическая нагрузка Q(t), движущаяся с постоянной скоростью v. Колебания данной системы описываются следующей системой дифференциальных уравнений в неподвижной системе координат [10]:

$$\begin{cases} E_{1}I_{1}\frac{\partial^{4}z_{1}}{\partial x^{4}} + m_{1}\frac{\partial^{2}z_{1}}{\partial t^{2}} + f_{1}\left(\frac{\partial z_{1}}{\partial t} - \frac{\partial z_{2}}{\partial t}\right) + U_{1}(z_{1} - z_{2}) = 0; \\ E_{2}I_{2}\frac{\partial^{4}z_{2}}{\partial x^{4}} + m_{2}\frac{\partial^{2}z_{2}}{\partial t^{2}} + f_{1}\left(\frac{\partial z_{2}}{\partial t} - \frac{\partial z_{1}}{\partial t}\right) + f_{2}\left(\frac{\partial z_{2}}{\partial t} - \frac{\partial z_{3}}{\partial t}\right) + \\ + U_{1}(z_{2} - z_{1}) + U_{2}(z_{2} - z_{3}) = 0; \\ E_{3}I_{3}\frac{\partial^{4}z_{3}}{\partial x^{4}} + m_{3}\frac{\partial^{2}z_{3}}{\partial t^{2}} + f_{2}\left(\frac{\partial z_{3}}{\partial t} - \frac{\partial z_{2}}{\partial t}\right) + f_{3}\frac{\partial z_{3}}{\partial t} + U_{2}(z_{3} - z_{2}) + U_{3}z_{3} = 0, \end{cases}$$

$$(2.3.1)$$

где z_i – вертикальный прогиб *i*-го слоя в подрельсовом сечении;

- *E_i* модуль упругости материала *i*-го слоя;
- *I_i* момент инерции *i*-го слоя при его изгибе относительно поперечной горизонтальной оси, отнесенный к одной рельсовой нити;
- *m_i* распределенная приведенная масса *i*-го слоя, отнесенная к одной рельсовой нити;
- *f_i* распределенное приведенное демпфирование *i*-го слоя, отнесенное к одной рельсовой нити;
- *U_i*-приведенный модуль упругости основания *i*-го слоя при вертикальном изгибе, отнесенный к одной рельсовой нити;
- *x* абсцисса текущего сечения балки, отсчитываемая от некоторого неподвижного начала координат;
- t время;
- Q(t) переменная нагрузка.

Рассмотрим решение задачи в подвижной системе координат, перемещающейся вдоль оси со скоростью v путем замены u = x - vt, где u -абсцисса текущего сечения балки, отсчитываемая от начала координат, совмещенного с движущейся нагрузкой.

Считая функции $z_i(u, t)$ реакциями системы (2.3.1) на воздействие $Q(t) = e^{i\omega t}$, с учетом линейности оператора, можно записать:

$$z_i(u,t) = e^{i\omega t} W^Q_{zi}(u,i\omega); \quad i = \overline{1,3}.$$
 (2.3.2)

где о – частота колебаний.

Тогда уравнения системы (2.3.1) примут следующий вид:

$$\begin{cases} W_{z1}^{IV} + a_1 W_{z1}^{II} + a_2 W_{z1}^{I} + a_3 W_{z1} + b_1 W_{z2}^{I} + b_2 W_{z2} = 0; \\ W_{z2}^{IV} + b_3 W_{z2}^{II} + b_4 W_{z2}^{I} + b_5 W_{z2} + a_4 W_{z1}^{I} + a_5 W_{z1} + c_1 W_{z3}^{I} + c_2 W_{z3} = 0; \\ W_{z3}^{IV} + c_3 W_{z3}^{II} + c_4 W_{z3}^{I} + c_5 W_{z3} + b_6 W_{z2}^{I} + b_7 W_{z2} = 0. \end{cases}$$

$$(2.3.3)$$

В уравнении (2.3.3) введены следующие обозначения:

$$\begin{split} W_{zi}^{IV} &= \frac{\partial^4 z_i}{\partial u^4} ; \ W_{zi}^{II} = \frac{\partial^2 z_i}{\partial u^2} ; \ W_{zi}^{I} = \frac{\partial z_i}{\partial u} ; \ i = \overline{1,3}; \\ a_1 &= \frac{m_1 v^2}{E_1 I_1} ; \ a_2 = -\frac{v(f_1 + m_1 \omega i)}{E_1 I_1} ; \ a_3 = \frac{U_1 - m_1 \omega^2 + f_1 \omega i}{E_1 I_1} ; \\ a_4 &= \frac{f_1 v}{E_2 I_2} ; \ a_5 = -\frac{U_1 + f_1 \omega i}{E_2 I_2} ; \ b_1 = \frac{f_1 v}{E_1 I_1} ; \ b_2 = -\frac{U_1 + f_1 \omega i}{E_1 I_1} ; \ b_3 = \frac{m_2 v^2}{E_2 I_2} ; \\ b_4 &= -\frac{v(f_1 + f_2 + 2m_2 \omega i)}{E_2 I_2} ; \ b_5 = \frac{U_1 + U_2 - m_2 \omega^2 + \omega (f_1 + f_2) i}{E_2 I_2} ; \ b_6 = \frac{f_2 v}{E_3 I_3} ; \\ b_7 &= -\frac{U_2 + f_2 \omega i}{E_3 I_3} ; \ c_1 = \frac{f_2 v}{E_2 I_2} ; \ c_2 = -\frac{U_2 + f_2 \omega i}{E_2 I_2} ; \ c_3 = \frac{m_3 v^2}{E_3 I_3} ; \\ c_4 &= -\frac{v(f_2 + f_3 + 2m_3 \omega i)}{E_3 I_3} ; \ c_5 = \frac{U_2 + U_3 - m_3 \omega^2 + \omega (f_2 + f_3) i}{E_3 I_3} . \end{split}$$

Частотные характеристики систем, определяющих при входе по силам $Q_i(t)$ прогибы слоев конструкции, могут быть представлены в виде

$$W_{zi}^{Q}(u,i\omega) = \begin{cases} W_{zi+}^{Q}(u,i\omega) & \text{при } u \ge 0; \\ W_{zi-}^{Q}(u,i\omega) & \text{при } u \le 0, \end{cases}$$
(2.3.4)

где

$$\begin{cases} W_{z1+}^{Q}(u,i\omega) = \sum_{i=1}^{6} A_{(2i-1)} e^{\lambda_{(2i-1)}u} & \text{при } u \ge 0; \\ W_{z1-}^{Q}(u,i\omega) = \sum_{i=1}^{6} A_{2i} e^{\lambda_{2i}u} & \text{при } u \le 0; \\ W_{z2+}^{Q}(u,i\omega) = \sum_{i=1}^{6} B_{(2i-1)} e^{\lambda_{(2i-1)}u} & \text{при } u \ge 0; \\ W_{z2-}^{Q}(u,i\omega) = \sum_{i=1}^{6} B_{2i} e^{\lambda_{2i}u} & \text{при } u \le 0; \\ W_{z3+}^{Q}(u,i\omega) = \sum_{i=1}^{6} C_{(2i-1)} e^{\lambda_{(2i-1)}u} & \text{при } u \ge 0; \\ W_{z3-}^{Q}(u,i\omega) = \sum_{i=1}^{6} C_{2i} e^{\lambda_{2i}u} & \text{при } u \le 0. \end{cases}$$

С учетом краевых условий задачи коэффициенты A_i , B_i и C_i $(i = \overline{1,12})$ определятся так:

$$\begin{split} A_{i} &= C_{i} \frac{\left(\lambda_{i}^{4} + c_{3}\lambda_{i}^{2} + c_{4}\lambda_{i} + c_{5}\right)\left(\lambda_{i}^{4} + b_{3}\lambda_{i}^{2} + b_{4}\lambda_{i} + c_{5}\right) - (b_{6}\lambda_{i} + b_{7})(c_{1}\lambda_{i} + c_{2})}{(b_{6}\lambda_{i} + b_{7})(a_{4}\lambda_{i} + a_{5})}, \\ B_{i} &= -C_{i} \frac{\lambda_{i}^{4} + c_{3}\lambda_{i}^{2} + c_{4}\lambda_{i} + c_{5}}{b_{6}\lambda_{i} + b_{7}}, \\ C_{i} &= (-1)^{i+1} \prod_{1 \leq l \leq 12} (\lambda_{i} - \lambda_{l})^{-1} \times \\ \times \left\{ \gamma_{11} - \sum_{\substack{j=1\\j \neq i}}^{12} \lambda_{j}^{11} \prod_{\substack{1 \leq l \leq 12\\l \neq i, j}} (\lambda_{j} - \lambda_{l})^{-1} \left[\gamma_{10} - \gamma_{9} \sum_{\substack{n=1\\n \neq i, j}}^{12} \lambda_{n}^{10} \prod_{\substack{1 \leq l \leq 12\\l \neq i, j, n}} (\lambda_{n} - \lambda_{l})^{-1} \right] \right\}, \\ \gamma_{9} &= \frac{a_{4}b_{6}}{E_{1}l_{1}}, \ \gamma_{10} = \frac{a_{5}b_{6} + a_{4}b_{7}}{E_{1}l_{1}}, \ \gamma_{11} = \frac{a_{5}b_{7} - a_{4}b_{6}(a_{1} + b_{3} + c_{3})}{E_{1}l_{1}}. \end{split}$$

Величины λ_i определяются из уравнения $\Delta = 0$, где Δ – характеристический определитель системы (2.3.3),

$$\Delta = \begin{vmatrix} \lambda^4 + a_1 \lambda^2 + a_2 \lambda + a_3 & b_1 \lambda + b_2 & 0 \\ a_4 \lambda + a_5 & \lambda^4 + b_3 \lambda^2 + b_4 \lambda + b_5 & c_1 \lambda + c_2 \\ 0 & b_6 \lambda + b_7 & \lambda^4 + c_3 \lambda^2 + c_4 \lambda + c_5 \end{vmatrix},$$

причем λ_i удовлетворяет условиям $Re\lambda_{(2i-1)} \ge 0$, $Re\lambda_{2i} \le 0$.

Воспользовавшись найденными частотными характеристиками $W_{zi}^Q(u, i\omega)$ (2.3.4), находим среднюю величину вектора прогибов $\langle z_i \rangle$ под действием вектора нагрузки Q(t) по формулам:

$$\langle \boldsymbol{z}_i \rangle = \boldsymbol{W}_{zi}^Q(0) \cdot \langle \boldsymbol{Q} \rangle; \quad i = \overline{1,3},$$

 $\langle \boldsymbol{Q} \rangle$ – вектор-столбец средних значений вертикальных сил Q.

Среднеквадратическое отклонение величин прогибов σ_{zi} от их средних значений определяется диагональными членами матрицы спектральных плотностей прогибов слоев балки:

$$\sigma_{z_i}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\int_0^\infty \boldsymbol{S}_{z_i j j}(\omega) d\omega \right),$$

где $n \times n$ - размерность матрицы спектральных плотностей $S_{z_i}(\omega)$,

$$\boldsymbol{S}_{z_i}(\omega) = \overline{\boldsymbol{W}}_{z_i}^Q(i\omega) \cdot \boldsymbol{S}_Q(\omega) \cdot \boldsymbol{W}_{z_i}^{Q^T}(i\omega).$$
(2.3.5)

В выражении (2.3.5) через $\overline{W}_{zi}^{Q}(i\omega)$ обозначена матрица, комплексно сопряженная с матрицей $W_{zi}^{Q}(i\omega)$, а через $W_{zi}^{Q^{T}}(i\omega)$ – матрица, транспонированная по отношению к матрице $W_{zi}^{Q}(i\omega)$,

где $W_{z_i}^Q(i\omega)$ – матрица частотных характеристик, определяющих прогибы *i*-го слоя балки под воздействием вектора вертикальных сил.

 $S_Q(\omega)$ – матрица спектральных плотностей процесса изменения динамических сил в контактах колес экипажа и рельса.

Для четырехосного грузового вагона имеем n = 4 и

$$\boldsymbol{W}_{z_{i}}^{Q}(i\omega) = \begin{pmatrix} W_{z_{i}}^{Q}(0,i\omega) & W_{z_{i}-}^{Q}(-d,i\omega) & W_{z_{i}-}^{Q}(-l,i\omega) & W_{z_{i}-}^{Q}(-l-d,i\omega) \\ W_{z_{i}+}^{Q}(d,i\omega) & W_{z_{i}+}^{Q}(0,i\omega) & W_{z_{i}-}^{Q}(d-l,i\omega) & W_{z_{i}-}^{Q}(-l,i\omega) \\ W_{z_{i}+}^{Q}(l,i\omega) & W_{z_{i}+}^{Q}(l-d,i\omega) & W_{z_{i}+}^{Q}(0,i\omega) & W_{z_{i}-}^{Q}(-d,i\omega) \\ W_{z_{i}+}^{Q}(l+d,i\omega) & W_{z_{i}+}^{Q}(l,i\omega) & W_{z_{i}+}^{Q}(d,i\omega) & W_{z_{i}+}^{Q}(0,i\omega) \end{pmatrix}$$

где *d* – расстояние между колесными парами,

l – расстояние между центрами тележек,

$$\boldsymbol{S}_{Q}(\omega) = \begin{pmatrix} S_{Q11} & S_{Q12} & S_{Q13} & S_{Q14} \\ S_{Q21} & S_{Q22} & S_{Q23} & S_{Q24} \\ S_{Q31} & S_{Q32} & S_{Q33} & S_{Q34} \\ S_{Q41} & S_{Q42} & S_{Q43} & S_{Q44} \end{pmatrix},$$
(2.3.6)

где *S*_{*Qij*} - взаимные спектральные плотности динамических вертикальных сил, возникающих при пространственных колебаниях экипажа.

Частотные характеристики изгибающих моментов в слоях определяются следующим образом:

$$W_{Mi}^{Q}(u,i\omega) = \begin{cases} W_{Mi+}^{Q}(u,i\omega) & \text{при } u \ge 0; \\ W_{Mi-}^{Q}(u,i\omega) & \text{при } u \le 0, \end{cases}$$
(2.3.7)

где

 $W_{Mi}^{Q}(u, i\omega)$ — частотная характеристика, определяющая при входе по динамической силе в контакте колеса и рельса Q(t) изгибающие моменты в балках трех слоев безбалластной конструкции пути в сечениях *u*.
$$\begin{split} & W_{M1+}^Q(u,i\omega) = \frac{-1}{E_i I_i} \sum_{i=1}^6 \lambda_{(2i-1)}^2 A_{(2i-1)} e^{\lambda_{(2i-1)} u} \quad \text{при} \quad u \ge 0; \\ & W_{M1-}^Q(u,i\omega) = \frac{-1}{E_i I_i} \sum_{i=1}^6 \lambda_{2i}^2 A_{2i} e^{\lambda_{2i} u} \qquad \text{при} \quad u \le 0; \\ & W_{M2+}^Q(u,i\omega) = \frac{-1}{E_i I_i} \sum_{i=1}^6 \lambda_{(2i-1)}^2 B_{(2i-1)} e^{\lambda_{(2i-1)} u} \quad \text{при} \quad u \ge 0; \\ & W_{M2-}^Q(u,i\omega) = \frac{-1}{E_i I_i} \sum_{i=1}^6 \lambda_{2i}^2 B_{2i} e^{\lambda_{2i} u} \qquad \text{при} \quad u \le 0; \\ & W_{M3+}^Q(u,i\omega) = \frac{-1}{E_i I_i} \sum_{i=1}^6 \lambda_{(2i-1)}^2 C_{(2i-1)} e^{\lambda_{(2i-1)} u} \quad \text{при} \quad u \ge 0; \\ & W_{M3+}^Q(u,i\omega) = \frac{-1}{E_i I_i} \sum_{i=1}^6 \lambda_{2i}^2 C_{2i} e^{\lambda_{2i} u} \qquad \text{при} \quad u \ge 0; \end{split}$$

На Рисунке 2.17 представлены амплитудно-частотные характеристики изгибающих моментов во втором слое безбалластной конструкции пути $|W_{M2}^Q(u, i\omega)|$.

С учетом того, что амплитудно-частотная характеристика не зависит от осевой нагрузки, вычисления произведены для частного случая при значениях u = 0, u = +185 см и u = -185 см (расстояние u = 185 см соответствует базе двухосной тележки d вагона скоростного поезда) и скоростях движения v = 80 км/ч и v = 300 км/ч при следующих параметрах, представленных в Таблице 2.19.



Рисунок 2.17 Амплитудно-частотные характеристики $|W_{M2}^Q(u, i\omega)|$: а – для скорости v = 80 км/ч; б – для скорости v = 300 км/ч; 1,2,3 – соответственно при u = 0, u = -185см и u = +185см

Воспользовавшись частотными характеристиками $W_{Mi}^{Q}(u, i\omega)$ (2.3.7), найдем среднюю величину векторов напряжений в заданных точках слоев $\langle \sigma_i \rangle$ под действием вектора нагрузки Q(t) по формулам:

$$\langle \boldsymbol{\sigma}_i \rangle = \boldsymbol{W}_{Mi}^Q(0) \cdot \frac{\langle \boldsymbol{Q} \rangle}{W_i}; \qquad i = \overline{1,3};$$
 (2.3.8)

 $\langle Q \rangle$ — вектор-столбец средних значений вектора вертикальных сил Q; W_i — момент сопротивления в заданной точке *i*-го слоя.

Среднеквадратическое отклонение величин напряжений от их средних значений определяется диагональными членами матрицы спектральных плотностей напряжений в слоях балки:

$$\sigma_{\sigma_i}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\int_0^\infty S_{\sigma_i j j}(\omega) d\omega \right), \tag{2.3.9}$$

где $n \times n$ - размерность матрицы спектральных плотностей $S_{\sigma_i}(\omega)$,

$$\boldsymbol{S}_{\sigma_i}(\omega) = \frac{\overline{\boldsymbol{W}}_{M_i}^Q(i\omega)}{W_i} \cdot \boldsymbol{S}_Q(\omega) \cdot \frac{{\boldsymbol{W}_{M_i}^Q}^T(i\omega)}{W_i}, \qquad (2.3.10)$$

 $W^{Q}_{M_{i}}(i\omega)$ — матрица частотных характеристик, определяющих изгибающие моменты *i*-го слоя балки под воздействием вектора вертикальных сил.

Для вагона имеем *n*=4 и

$$W^{Q}_{M_{i}}(i\omega) = \begin{pmatrix} W^{Q}_{M_{i}}(0,i\omega) & W^{Q}_{M_{i-}}(-d,i\omega) & W^{Q}_{M_{i-}}(-l,i\omega) & W^{Q}_{M_{i-}}(-l-d,i\omega) \\ W^{Q}_{M_{i+}}(d,i\omega) & W^{Q}_{M_{i+}}(0,i\omega) & W^{Q}_{M_{i-}}(d-l,i\omega) & W^{Q}_{M_{i-}}(-l,i\omega) \\ W^{Q}_{M_{i+}}(l,i\omega) & W^{Q}_{M_{i+}}(l-d,i\omega) & W^{Q}_{M_{i+}}(0,i\omega) & W^{Q}_{M_{i-}}(-d,i\omega) \\ W^{Q}_{M_{i+}}(l+d,i\omega) & W^{Q}_{M_{i+}}(l,i\omega) & W^{Q}_{M_{i+}}(d,i\omega) & W^{Q}_{M_{i+}}(0,i\omega) \end{pmatrix}, (2.3.11)$$

а матрица $S_Q(\omega)$ определяется выражением (2.3.6).

Как показали исследования на Экспериментальном кольце в 2010-2014 г. [188], основной причиной выхода из строя безбалластного пути становится разрушение несущей бетонной плиты вследствие образования пустот на стыке второго и третьего слоя. Это происходит из-за разницы прогибов бетонной несущей плиты и тощего бетона. В момент прохода поезда в этом месте периодически образуется зазор, куда в период дождей или таяния снега попадет вода. Испытания четырех типов безбалластных конструкций пути на Экспериментальном кольце в 2014-2016 гг. также подтверждают, что основная неисправность безбалластного пути это повреждаемость бетонного несущего слоя вследствие образования пустот под ним, что нашло отражение и в зарубежных исследованиях [258]. На основе описанного алгоритма расчета составлена программа расчета в среде MatLab. Листинг программы приведен в Приложении В. Результаты расчета для различных вариантов исходных данных представлены в Приложении Г.

Верифицирована предложенная математическая модель путем сравнения расчетных значений с результатами измерений напряжений и вертикальных прогибов слоев БВСП. Прогибы и осадки ЩПГС и слоя химически укрепленного грунта измерялись при помощи оптоволоконной системы диагностики земляного полотна [226; 259; 260; 261], разработанной при непосредственном участии автора.

Натурными испытаниями на Экспериментальном кольце подтверждены расчетные значения напряжений и прогибов несущей бетонной плиты, которые оказались существенно меньше допустимых значений, что свидетельствует о возможности применения безбалластного пути, в том числе и в сфере грузового движения.

Адекватность предложенной математической модели подтверждена удовлетворительной сходимостью значений напряжений и прогибов с экспериментальными данными для различных конструкций безбалластного пути на Экспериментальном кольце.

Исходные данные для математической модели представлены в Таблице 2.19. В Таблице 2.20 представлены результаты расчета и измерений на ЭК прогибов слоев БВСП как многослойной балки и напряжений в слоях для скорости 80 км/ч и осевой нагрузке 235 кН.

В Таблице 2.21 представлены результаты расчета для перспективных условий ВСМ прогибов слоев БВСП как многослойной балки и напряжений в слоях для скорости 300 км/ч и осевой нагрузке 180 кН.

112

Таблица 2.19 - Исходные данные

Слой	Материал	Толщина, мм	Ширина, мм	Объем в 1 погонном метре, м ³	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, <i>E</i> , H/M ²	Момент инерции (верт.) <i>I</i> , м ⁴	Распределенная приведенная масса <i>m</i> , кг/м	Распределенное приведенное демпфирование <i>f</i> , H·c/m ²
1	Рельс	180				$0,21.10^{12}$	0,355 [.] 10 ⁻⁴	65	$0,173 \cdot 10^5$
2	Бетонный	240	2500	0,6	2300	$34,5^{\cdot}10^{3}$	0,00288	690	$0,29^{\circ}10^{5}$
	слой								
3	Тощий	300	3500	1,05	1800	$23,4.10^3$	0,007875	945	$0,65.10^{5}$
	бетон								
	ЩПГС	700	4500	3,15	1500	$18,1.10^3$	0,128625	1420	$0,69.10^5$
	Химически	500	6000	3,0	1350	$14,6.10^3$	0,0625	750	$0,73.10^{5}$
	укрепленн								
	ый грунт								

Таблица 2.20 - Прогибы и напряжения для 80 км/ч и 235 кН на ось

		Номер слоя	1 слой -	2 слой-	3 слой-	Химически
			рельс	бетон	тощий бетон	укрепленный
						грунт
нение	ба под	Измеренное	3,7	2,5	1,5	1
Знач	проги	Расчетное	3,5	2,9	0,7	0,5
	Цоп	Измеренное	950	7,5	1,3	0,8
чение	кинэ	Расчетное	820	6,3	1,12	0,92
Зна	напряж	Критическое	2000	16	4,2	1

Номер слоя	1 слой -	2 слой-	3 слой-	Химически
	рельс	бетон	ЩПГС	укрепленный
				грунт
Расчетное значение прогиба под	1,2	0,9	0,3	0,01
нагрузкой, мм				
Расчетное значение напряжения	670	4,9	1,23	0,95
под нагрузкой, кгс/см ²				

Таблица 2.21 - Прогибы и напряжения для 300 км/ч и 180 кН на ось

Для четырех типов БВСП (LVT, MaxBögl, Alstom, Tines) получены экспериментальные и расчетные данные, аналогичные Таблице 2.24. Расчетные и экспериментальные данные хорошо корреспондируются между собой. Проверив адекватность математической модели на БВСП, испытанных на ЭК, можно прогнозировать значения прогибов и напряжений в условиях ВСМ.

2.4 Модели накопления осадок балластного и безбалластного пути

По результатам ряда отечественных работ [157; 81; 68; 158; 159; 73; 161] и зарубежных исследований [150; 107; 176; 135; 235; 231] осадки балластного и безбалластного пути, рассмотренных в первой главе, автором предложено обобщить графики зависимости осадки от пропущенного тоннажа в виде логарифмической функции (2.4.1), с уточненными коэффициентами a_0 и a_1 .

В работах зарубежных исследователей Mitchas G. [118], Yang S.Y. [118], Bastin R. [95], Sunil K. [111], Wang P. [115], Wang S.R. [116], Wei J. [117] указывается, что на повреждаемость безбалластного пути существенно влияет состояние грунтов земляного полотна и их осадка.

Зависимость осадки в мм от пропущенного тоннажа для пути различного качества можно описать выражением:

$$e_T = a_0 \cdot \ln(T) - a_1$$
, (2.4.1)

*a*⁰ и *a*¹ - эмпирические коэффициенты для пути различного качества;

Т - пропущенный тоннаж, млн. т брутто.

Эмпирические коэффициенты *a*⁰ и *a*¹ для балластного и безбалластного пути различного качества можно обобщить в виде таблицы 2.22.

Вид и качество пути	Коэффициенты		
	a_0	a_1	
Путь на балласте высокого качества	8,5	5,0	
Путь на балласте низкого качества	5,0	3,0	
БВСП высокого качества	2,5	2,0	
БВСП низкого качества	1,5	1,6	

Таблица 2.22 - Эмпирические коэффициенты

Таким образом, большинство известных зависимостей осадки пути на балласте от пропущенного тоннажа укладываются между графиками 1 и 2 на Рисунке 2.21. При этом видно, что в начальный период времени интенсивность осадки достаточно большая, но со временем она существенно падает. Большинство известных зависимостей [57; 33] осадки пути на плитном основании и безбалластного пути [188] от пропущенного тоннажа укладываются между графиками 3 и 4 на Рисунке 2.18. Коэффициенты a_0 и a_1 будут уточнены в главе 3 по результатам полигонных испытаний на Экспериментальном кольце.



Рисунок 2.18 Зависимость осадки от пропущенного тоннажа:

1-2 область для пути на балласте, 3-4 область для безбалластного пути

Выводы по главе 2:

1. Для определения технической возможности применения БВСП в России, во-первых, выполнен статический и динамический расчет условий достижения первого предельного состояния, во-вторых, аппроксимирована (экстраполирована) эмпирическая зависимость осадки БВСП от пропущенного тоннажа для нахождения условий достижения второго предельного состояния.

2. Используя многослойную балку как модель для четырех типов БВСП (LVT, MaxBögl, Alstom, Tines), получены расчетные данные напряжений и прогибов слоев БВСП. Расчетные и экспериментальные данные имеют хорошую сходимость.

3. Расчетные значения напряжений и прогибов в слоях безбалластного пути для условий Экспериментального кольца и высокоскоростной линии Москва-Казань не превышают предельно допустимых значений для бетонных строительных конструкций. Это позволяет утверждать, что безбалластный путь возможно эксплуатировать как для грузового, так и для высокоскоростного движения.

4. Известные математические модели пути не дают представления о его долговечности (сроке службы). Необходима разработка метода прогнозирования срока службы безбалластного пути.

3. ИССЛЕДОВАНИЯ БЕЗБАЛЛАСТНОГО ПУТИ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОЛЬЦА И ОКТЯБРЬСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

3.1 Испытания безбалластной конструкции пути Rheda в 2010 г.- 2014 г.

В 2009 г. по проекту компании RailOne (Германия) при участии AO «Росжелдорпроект» на Московской железной дороге (Экспериментальное кольцо ОАО «ВНИИЖТ», ст. Щербинка) [213; 216; 136; 188] и на Октябрьской железной дороге (перегон Саблино – Тосно линии Санкт-Петербург – Москва) [212; 216; 136; 188] были сооружены и введены в опытную эксплуатацию два участка с безбалластной конструкцией пути типа Rheda.

Ниже приведены некоторые наиболее значимые результаты испытаний и эксплуатационных наблюдений. Измерения проводились сотрудниками отделений «Комплексные исследования по взаимодействию пути и подвижного состава» и "Путь и путевое хозяйство" ОАО "ВНИИЖТ" под руководством и при непосредственном участии автора.

Задача данных испытаний состояла в определении работоспособности безбалластной конструкции в условиях Российских железных дорог. Для этого проводились измерения следующих параметров:

- вертикальных сил, действующих от колес на рельсы;

- динамических напряжений в кромках подошвы рельса при различных типах подвижного состава (электровоз, пассажирский вагон, грузовой вагон);

- вертикальных ускорений на безбалластном основании;

- вертикальной осадки уровня головки рельса и бетонной плиты от пропущенного тоннажа;

- целостности бетонной плиты и элементов узлов рельсовых скреплений.

3.1.1 Краткая характеристика опытных участков пути

С целью сравнительной оценки процессов взаимодействия подвижного состава с элементами верхнего строения пути и проведения эксплуатационных наблюдений за текущим техническим состоянием на 2-м кольцевом пути ЭК в 2009 г. был уложен опытный участок с безбалластной конструкцией пути типа Rheda. Движение поездов по опытному участку было открыто 21 сентября 2010 г. Практически одновременно участок пути с аналогичной конструкцией был уложен на 46-м километре линии Санкт-Петербург – Москва Октябрьской железной дороги (перегон Саблино – Тосно, 2-й главный путь).

Опытный участок на ЭК представлял собой собственно безбалластный путь длиной 25 м и два переходных участка переменной жесткости [215] длиной по 20 м, примыкающие с двух сторон к безбалластному участку. Опытная эксплуатация участка производилась в течении 4 лет, в сентябре 2014 г. участок был демонтирован. В этот период на участке осуществлялось регулярное движение грузовых поездов со скоростями до 70 км/ч. Грузонапряженность участка – 300 млн. т брутто в год при средней статической осевой нагрузке 235 кН. Суммарный пропущенный тоннаж составил 957 млн. т брутто.

Участок безбалластного пути типа Rheda на перегоне Саблино – Тосно расположен в прямой на отдельной насыпи и имеет длину 1000 м с двумя переходными участками длиной по 75 м.

В настоящее время участок Октябрьской железной дороги находится в опытной эксплуатации. К началу проведения комплексных испытаний по опытному участку пути было пропущено 3,5 млн. т брутто. В соответствии с приказом начальника Октябрьской железной дороги на участке Саблино – Тосно 2-го главного пути линии Санкт-Петербург – Москва на момент проведения испытаний скорость пассажирского движения составляет до 200 км/ч, грузового движения – 80 км/ч. По участку, главным образом, обращаются пассажирские и пригородные поезда. По паспортным данным профиль участка (по ходу поезда)

119

имеет подъем 5,0–3,5 ‰ протяженностью 300 м, площадку 0,6 ‰ протяженностью 200 м и спуск 4,2 ‰ протяженностью 500 м.

3.1.2 Испытания опытной конструкции пути на ЭК ОАО «ВНИИЖТ»

Ходовые испытания по оценке воздействия различных типов подвижного состава на элементы конструкции безбалластного пути проводились в сентябре 2010 г. Для сравнительной оценки весь опытный участок разделен на три части по 25 м каждая: типовой путь на балласте, переходный участок, безбалластный путь.

В процессе испытаний регистрировались динамические напряжения в кромках подошвы рельса, вертикальные силы, передающиеся от колес на рельсы, а также вертикальные ускорения на верхней поверхности шпал. Тензометрические схемы для измерения напряжений и вертикальных сил монтировались вблизи рельсовых стыков; акселерометры устанавливались на ближайшей к стыку шпале, как показано на Рисунке 3.1.

Результаты статистической обработки реализаций динамических напряжений в кромках подошвы рельса и вертикальных сил по наибольшим значениям показателей при движении со скоростью 80 км/ч представлены в виде диаграмм на Рисунке 3.2.



Рисунок 3.1 Схема расположения акселерометров на опытном участке пути

Установлено, что наибольшие динамические напряжения в кромках подошвы рельса под воздействием подвижного состава опытного поезда составляли 91–95 МПа, т.е. оказались существенно меньше допустимой величины 240 МПа. При этом под воздействием колес электровоза и пассажирского вагона напряжения в рельсах на безбалластной конструкции пути выше, чем для типовой конструкции пути на 10–40 %.

Под воздействием колес груженого полувагона отмеченные различия напряжений в рельсах на безбалластной и типовой конструкциях менее выражены. В частности, напряжения в рельсах на пути с безбалластной конструкцией, зарегистрированные под первой по направлению движения тележкой, несколько меньше, чем на пути с типовой конструкцией (колесная пара № 7 на Рисунке 3.2). Наибольшие величины напряжений характерны для подвижного состава с большей статической осевой нагрузкой – для груженого полувагона.



Рисунок 3.2 Показатели воздействия на путь при скорости движения 80 км/ч (опытный участок ЭК)

Кромочные напряжения от воздействия колес электровоза и пассажирского вагона оказались существенно ниже, соответственно, в 1,32 и 1,94 раза.

На участках с «переходной» жесткостью и с типовой конструкцией верхнего строения пути средние величины напряжений в кромке подошвы рельса близки между собой и при этом на 12–20 % меньше, по сравнению с безбалластной конструкцией.

Полученные экспериментальные данные указывали на более высокий уровень динамических напряжений в кромках подошвы рельса и вертикальных сил в рельсах на пути с безбалластной конструкцией верхнего строения по сравнению с типовой конструкцией верхнего строения для подвижного состава со статической осевой нагрузкой 210 кН и 240 кН. Возможной причиной этого являлась более высокая жесткость подрельсового основания пути с безбалластной конструкцией верхнего строения.

На Рисунке 3.3 показана типичная реализация вертикальных ускорений на поверхности шпалы в зоне рельсового стыка с отчетливым проявлением ударного характера взаимодействия колеса и рельса. Наибольшие амплитуды импульсов соответствовали колесам опытного поезда (6-осный электровоз, 4-осный полувагон и 4-осный пассажирский вагон).

С целью экспериментальной оценки влияния конструкции верхнего строения пути на уровень динамического взаимодействия экипажа и пути на буксах пассажирского вагона монтировались акселерометры для регистрации вертикальных ускорений неподрессоренных частей вагона.



Рисунок 3.3 Осциллограмма вертикальных ускорений на шпале безбалластного пути

Статистическая обработка реализаций ускорений производилась в частном диапазоне 0–50 Гц как в зонах сварных рельсовых стыков, так и при следовании колес в бесстыковой части рельсов. При скорости движения 80 км/ч наибольшие амплитуды вертикальных ускорений буксового узла при следовании колеса по междустыковым участкам рельса с типовой конструкцией верхнего строения составляли 4,0–5,5 м/c² при среднем значении 4,4 м/c², а с безбалластной и переходной конструкцией пути – были близки между собой и составляли 3,0-4,0 м/c² при среднем значении 3,4 м/c².

Значительно более высокие ускорения возникали при проследовании колесами сварных рельсовых стыков: в стыках рельсов между типовой и переходной конструкциями верхнего строения наибольшие ускорения достигали $46,4-63,6 \text{ м/c}^2$ при среднем значении $42,6 \text{ м/c}^2$; ускорения буксового узла в зоне сварных рельсовых стыков на безбалластной конструкции верхнего строения были существенно ниже – наибольшие амплитуды $26,4-30,8 \text{ м/c}^2$ при среднем значении $24,8 \text{ м/c}^2$.

Нивелировка уровня головки рельса и плиты

На опытном участке проведена нивелировка по уровню головки рельса (УГР) правой и левой рельсовых нитей с шагом 5,4 м (10 шпал), а также нивелировка бетонной несущей плиты по левой и правой стороне. Полученные данные представлены в виде графиков на Рисунках 3.4 и 3.5. На Рисунке 3.4 графики уровней головок левого и правого рельсов совмещены со схемой расположения бетонной плиты и переходных участков; на Рисунке 3.5 представлены осадки по левой и правой сторонам, совмещенные со схемой несущей плиты с концевыми бетонными "зубьями".

Нивелировка, произведенная в сентябре 2010 г. в период проведения комплексных испытаний, показала, что по левой рельсовой нити на безбалластной конструкции имелась «яма» длиной около 11 м и глубиной до 5 мм. В период 2010-2011 гг. осадка бетонной плиты была достаточно равномерна и составляла 5 мм. В этот период эксплуатации осадки переходных участков были неравномерны и достигали 30 мм. Этим была вызвана необходимость выправки переходных участков подбивкой щебня. При этом склеенный слой щебня оказался разрушенным. В дальнейшем на переходных участках с балластным слоем осадки составили большие значения, что и было обусловлено, главным образом, разрушением склеенного слоя.

Начиная с мая 2013 г., по причине просачивания воды под бетонную плиту и разрушения тощего бетона в зимне-весенний период, осадки бетонной плиты стали более существенными (до 20 мм) и неравномерными. Ко времени окончания опытной эксплуатации участка в конце июля 2014 г. максимальная осадка плиты составила 33 мм в месте наибольшего вымывания тощего бетона из под бетонной плиты.

Наряду с нивелировкой уровня головок рельсов проводились периодические измерения осадки поверхности бетонной плиты. Анализ осадок монолитной плиты показал, что, начиная с октября 2013 г., плита стала работать как балка на двух опорах. Посередине плиты образовалось свободное пространство из-за

вымывания тощего бетона и края плиты поднялись. Из графиков видно, что в период с сентября 2010 г. по октябрь 2013 г. положение плиты было достаточно стабильным. Измерения, проведенные в июле 2014 г., показали, что края плиты опустились на величину до 9 мм, а середина плиты поднялась на величину до 10 мм.

На Рисунке 3.6 представлен график зависимости осадки и СКО от пропущенного тоннажа. Наибольшая осадка 52 мм зафиксирована в период наработки 900-950 млн. т брутто, когда происходило интенсивное разрушение слоя ГСНС. Эту зависимость можно аппроксимировать линейной функцией y = 0,0662T - 18,181 достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9141$. На Рисунке 3.7 показана гистограмма интенсивности осадки. Наибольшая интенсивность 0,331 мм/млн. т брутто наблюдается в заключительный период эксплуатации с 900 до 950 млн. т брутто.

На Рисунке 3.8 представлены результаты нивелировки уровня головки рельса без нагрузки и под статической нагрузкой от колесной пары на рельсы 235 кН. Из Рисунке 3.8 видно, что в 2013 г. максимальная упругая осадка под нагрузкой составила 14 мм, а в 2014 г. – 12 мм. В 2013 г. упругие осадки были более равномерны по длине плиты, чем в 2014 г. Это связано с тем, что первый переходной участок и тощий бетон под плитой в первой половине участка были в большей мере разрушены по сравнению со второй его частью.



а) левый рельс; б) схема участка; в) правый рельсРисунок 3.4 Нивелировка уровня головки рельса



а) левая сторона; б) схема плиты; в) правая сторонаРисунок 3.5 Нивелировка уровня бетонной плиты



Рисунок 3.6 Зависимость осадки и СКО от пропущенного тоннажа



Рисунок 3.7 Интенсивность накопления осадки





Ширина колеи

Ширина колеи в пределах опытного участка, измеренная в сентябре 2010 г., соответствовала нормативу и составляла 1519–1524 мм: среднее значение ширины колеи на безбалластной конструкции 1520,1 мм при величине среднего квадратического отклонения (СКО) 0,44 мм; на переходных участках среднее значение ширины колеи 1521,0 мм (на первом переходном участке) и 1522,3 мм (на втором переходном участке) при величинах СКО 0,82 и 1,26 мм, соответственно.

Анализ данных по ширине колеи, измеренной в июле 2014 г., показал, что ширина колеи на опытных участках оставалась стабильной и составляла в среднем 1522–1524 мм, при значениях СКО 1,1–1,26 мм.

Измерения проводили в сентябре 2010 г. и в сентябре 2014 г., отступления рельсовых нитей по уровню не превышали +6 мм, т.е. находились в пределах допустимых отклонений. Однако следует отметить, что в указанный период на опытном участке производилась выправка пути на регулировочные прокладки в узлах рельсовых скреплений.

Подуклонка рельсов

В сентябре 2010 г. подуклонка рельсов на обследованных участках составляла 1/15–1/32, при среднем значении по левой рельсовой нити 1/18, а по правой – 1/23. Зафиксированы скачкообразные изменения подуклонки на концах плиты безбалластной конструкции, что можно объяснить наличием сварного стыка. Замеры, проведенные в сентябре 2014 г. показали, что подуклонка рельсов изменилась незначительно и составляла 1/15–1/23, при среднем значении по левой рельсовой нити 1/18, а по правой – 1/21.

Дефекты, выявленные визуально

В мае 2013 г. при входе на безбалластную конструкцию по направлению движения поездов были обнаружены полушпалки, потерявшие связь с основной

плитой конструкции, как показано на Рисунке 3.7. В период с мая по октябрь 2013 г. произошел полный отрыв от монолитной плиты с зазорами по краю полушпалков от 2 до 3 мм. При движении поездов по опытному участку визуально наблюдались вертикальные перемещения полушпалков отдельно от монолитной плиты.

Кроме того, в июне 2013 г. были обнаружены цементно-песчаные выплески на поверхность щебеночной призмы, приведенные на Рисунках 3.8 и 3.9. С целью выявления причин выплесков в августе 2013 г. производилось специальное обследование, которое показало, что между плитой и гидравлически связанным несущим слоем (ГСНС) появился зазор величиной до 20 мм. В этих местах было обнаружено также разрушение тощего бетона. Из-за скопления воды вследствие недостаточного водоотвода (отсутствие поперечного дренажа) под воздействием знакопеременных вертикальных динамических нагрузок от колес подвижного состава произошел отрыв (отслоение) монолитной плиты и тощего бетона.



Рисунок 3.7 Отрыв полушпалков от бетонной плиты



Рисунок 3.8 Выплески цементной смеси из-под плиты



Рисунок 3.9 Зазор между бетонной плитой и ГСНС

Результаты визуального обследования состояния опытной конструкции пути в течение всего периода наблюдений с перечнем неисправностей элементов скреплений и бетонной плиты представлены в Таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Данные визуального обследования элементов скреплений и бетонной плиты

Номера шпал или полушпалков от		
начала переходного участка пути	Неисправность	
по направлению движения поезда		
6, 17, 22	Излом наружной клеммы скрепления	
26	Излом 2 клемм на контррельсе	
27	Излом 4 клемм на контррельсе	
28	Излом внутренней клеммы скрепления	
28	Излом 3 клемм на контррельсе	
29	Излом 1 клеммы на контррельсе	
37	Вырваны 8 полушпалков от начала плиты по обеим	
57	рельсовым нитям с выкрашиванием бетона	
79	Излом наружной клеммы скрепления	
94-96	Вырваны полушпалки по обеим нитям	
97 и 98	Вырваны полушпалки по правой нити	
103	Излом 3 клемм на контррельсе	
104	Излом 2 клемм на контррельсе	
106	Излом 1 клеммы на контррельсе	
108	Излом наружной клеммы скрепления	
117	Излом наружной клеммы скрепления	

Анализ причин разрушения конструкции опытного участка пути в эксплуатации позволил выявить ряд факторов, перечисленных ниже.

1. Основной причиной интенсивного разрушения гидравлически связанного несущего слоя является отсутствие поперечного дренажа, не предусмотренного проектом, что вызвало образование застоя воды. Т.к. безбалластный путь расположен на части земляного полотна двухпутного участка, то при сооружении основания безбалластного пути часть грунта вынималась и заменялась другим, что способствовало просачиванию воды между бетонной несущей плитой и гидравлически связанным слоем. Механизм просачивания воды схематично представлен на Рисунке 3.10.



Рисунок 3.10 Схема просачивания воды

2. Вымывание материала гидравлически связанного несущего слоя требует наличия начальной пустоты, в которую могла бы просочиться собравшаяся вода. Причиной образования начальной пустоты, вероятно, явился эффект рычага на входе на безбалластный участок пути по направлению движения поездов, что приводило к подъему вверх безбалластного пути за бетонным "зубом". Это было обусловлено наличием пустот под примыкающими шпалами переходного участка вследствие разрушенного склеенного балласта, так что нагрузка от колесной пары поднимала участок за концевым зубом с опорой по центру вращения (жесткий концевой "зуб"). При поднятии вверх этого участка, застаивающаяся вода засасывалась в пустоту и затем выдавливалась под воздействием поездной нагрузки, как показано на Рисунке 3.11.

3. К причинам образования эффекта рычага следует отнести также ограниченную длину опытного участка и близкое расположение концевых бетонных "зубьев", что способствовало работе безбалластной конструкции как балки на двух опорах.



Рисунок 3.11 Эффект рычага при работе бетонной несущей плиты при воздействии колесной пары в разных ее точках

4. Проседание концевых участков бетонной плиты происходило также из-за «несанкционированного» разрушения склеенного балластного слоя на переходном участке при проведении работ по выправке просадок на подходах к безбалластному пути.

5. Существенным фактором являлось дополнительное динамическое воздействие на бетонное основание пути от неровностей на поверхности катания рельсов и наличия стыков на участках переменной жесткости.

Выявленные отклонения в техническом состоянии опытного участка безбалластного пути (просадка бетонной плиты, выплески, отслоение шпал от бетона) можно было бы предотвратить своевременным проведением профилактических мероприятий. Например, для устранения незначительных несоответствий нужно было провести шлифовку рельсов, алюминотермитную повторное склеивание балласта на переходных участках, сварку стыков, своевременную замену клемм И выправку типовыми регулировочными прокладками в узлах рельсовых скреплений.

3.1.3 Испытания опытной конструкции пути на перегоне Саблино-Тосно

В качестве опытного поезда применялся состав электропоезда ЭВС «Сапсан» № 01 без пассажиров с вагонами, имевшими среднюю статическую осевую нагрузку 150 кН. Вагоны электропоезда находились в нормальном эксплуатационном состоянии [262; 263].

По данным о фактическом состоянии рельсовых нитей по геометрии на опытном участке пути отступления рельсовых нитей 2-й и более высоких степеней отсутствовали. Движение электропоезда по измерительным участкам пути осуществлялось «челноком» в специально выделенные «окна» со скоростями до 210 км/ч.

Сравнительная оценка динамического взаимодействия колес электропоезда с рельсами производилась на основе статистического анализа реализаций динамических процессов, исследованных по аналогии с опытным участком ЭК, в том числе: напряжений в кромках подошвы рельсов, вертикальных сил, передающихся от колес на рельсы, вертикальных ускорений неподрессоренных масс вагона (буксовый узел).

Сравнение безбалластной и типовой конструкций пути по величинам наибольших динамических напряжений в кромках подошвы рельса, приведенное в Таблице 3.2 и Рисунке 3.12, не показало значимых различий. При этом сравнительно более высокий уровень динамических напряжений в 1,25 – 1,34 раза был зарегистрирован в рельсах на участке с «переходной» жесткостью, что обусловлено повышенным воздействием колес электропоезда на путь в вертикальном направлении. В целом наибольшие величины напряжений не превышали 30% от нормативного значения. Устойчивые зависимости наибольших динамических напряжений в кромках подошвы рельса от скорости движения на всех исследованных типах конструкции верхнего строения пути отсутствовали.

136

Конструкция	Динамическое напряжения в кромках подошвы					
верхнего строения	рельсов, МПа					
пути		Нормативное				
					значение	
	160	180	200	210		
Типовая	48	44	47	46	240	
С «переходной»	61	60	68	63		
жесткостью						
Безбалластная	46	48	50	47		

Таблица 3.2 - Динамические напряжения в кромках подошвы рельсов



Рисунок 3.12 Динамические напряжения в кромках подошвы рельса

Сравнение наибольших величин напряжений в рельсах с напряжениями, зарегистрированными на типовой конструкции верхнего строения по испытаниям ЭВС «Сапсан» в 2009 г., показало достаточно близкую сходимость: при скоростях движения 200–225 км/ч динамические напряжения в рельсах на прямой 231 км линии Санкт-Петербург – Москва не превышали 46 МПа.

В рассматриваемом диапазоне скоростей движения наибольший уровень вертикальных сил от колес электропоезда, приведенные в Таблице 3.3 и на Рисунке 3.13, зарегистрирован при движении по пути с «переходной» жесткостью: на 13–17 кН и 2–7 кН выше по сравнению, соответственно, с типовой и безбалластной конструкцией верхнего строения.

Конструкция	Вертикальные силы, кН					
верхнего строения	при скорости, км/ч					
пути	160	180	200	210		
Типовая	82,3	80,5	84,1	85,0		
С «переходной»	95,7	96,6	97,0	102,5		
жесткостью						
Безбалластная	93,2	90,6	93,8	95,6		

Таблица 3.3 - Вертикальные силы



Рисунок 3.13 Вертикальные силы

Вероятной причиной такого соотношения вертикальных сил является «скачкообразное» изменение жесткости подрельсового основания на незначительном по протяженности участке с «переходной» жесткостью, в связи с чем возникают неустановившиеся переходные процессы вертикальных колебаний неподрессоренных масс вагонов электропоезда. На основе зарегистрированных реализаций вертикальных ускорений буксового узла головной тележки ЭВС «Сапсан», приведенных в Таблице 3.4, получены зависимости вертикальных ускорений от скорости движения по рельсу, расположенному между сварными стыками, и по сварным рельсовым стыкам.

Таблица Ј.т - Эскорсния буксового уз	Габлица 3.4	скорения буксового	о узла
--------------------------------------	-------------	--------------------	--------

Частотный	Диапазон	Ускорения буксового узла, м/с2				
диапазон при	скоростей	Опытные участки,				
обработке, Гц	движения, км/ч	конструкция верхнего строения пути				
		типовая	с «переходной»	безбаллас		
			жесткостью	тная		
0 - 50	110 - 120	<u>2,76</u>	<u>2,96</u>	<u>3,17</u>		
		8,28	8,88	9,51		
	190 - 210	3,22	4,23	3,78		
		9,66	12,69	11,34		

Примечание: в числителе - с.к.о. реализаций ускорений; в знаменателе – максимальные вероятные значения

Из таблицы 3.4 следует, что в зависимости от скорости движения максимальные вероятные значения ускорений буксового узла при движении электропоезда по участку с типовой конструкцией пути меньше, чем при движении по безбалластной конструкции пути в диапазоне скоростей движения 110-120 км/ч на 15 %, а в диапазоне скоростей 190–210 км/ч – на 18 %, соответственно, 8,3 и 9,5 м/с² и 9,7–12,7 м/с². В диапазоне скоростей движения 190-210 км/ч наибольший уровень ускорений зарегистрирован при движении по переходному пути: на 31 % выше, чем по типовой конструкции пути и на 12 %, чем на безбалластной конструкции пути соответственно.

Напротив, при движении колеса по сварным рельсовым стыкам уровень ускорений на участке пути с типовой конструкцией верхнего строения пути оказался выше, чем на участке с безбалластной конструкцией пути при скоростях 190–210 км/ч на 33 %, что, главным образом, может быть обусловлено различием геометрических параметров и жесткости рельсов в зоне сварных стыков. В последнем случае наибольшая зарегистрированная величина ускорений составила 53 м/с².

Нивелировка уровня головки рельса

Измерения геометрических параметров рельсовых нитей с нивелировкой уровня головки рельса (УГР) на опытном участке в соответствии со схемой расположения отметок пути, приведенной на Рисунке 3.14, производились в декабре 2010 г. Полученные данные представлены в виде графиков отметки высот УГР на Рисунке 3.15.

Участок с безбалластной конструкцией условно можно разделить на 4 участка с различным профилем: первый участок протяженностью 180 м с уклоном 7 ‰, второй участок длиной 340 м с уклоном 4 ‰, третий участок протяженностью 240 м с уклоном 0 ‰ и четвертый участок с уклоном -6 ‰. Данные нивелировки показали высокую стабильность бетонной плиты и переходных участков. Разность уровней левого и правого рельса не превышала 2 MM.

Ширина рельсовой колеи оказалась равной 1520–1522 мм; значения по уровню не превышали +4 мм (по проектной документации +0), что соответствовало интервалам параметров отступлений I степени. Среднее значение ширины колеи на безбалластной конструкции составило 1520,3 мм при величине СКО – 0,5 мм. Подуклонка рельсов находилась в пределах 1/18–1/21, что соответствовало допустимым величинам подуклонки по Инструкции ЦП-774 [264] (1/12–1/60).



Рисунок 3.14 Схема нивелировки опытного участка пути на перегоне Саблино-Тосно, 2-й главный путь



Рисунок 3.15 Нивелировка головки рельса

На Рисунок 3.16 приведены зависимости просадок рельсовых нитей от пропущенного тоннажа по данным проходов дорожных вагонов-путеизмерителей. Анализ показал, что изменение среднего значения просадок происходит в пределах 1 мм.



Рисунок 3.16 Зависимость просадок от пропущенного тоннажа

Выводы по результатам испытаний Rheda

1. Конструкция безбалластного пути на Экспериментальном кольце была демонтирована по причине образования выплеска из-под бетонной плиты и, как следствие, просадки в середине плиты. Кроме того, первые 6 полушпал потеряли связь с основной бетонной плитой и стали интенсивно разрушаться.

2. Результат ресурсных испытаний безбалластного пути Rheda на Экспериментальном кольце нельзя считать отрицательным. Причиной неудовлетворительного итогового состояния конструкции стали ошибки при проектировании и несоответствующее текущее содержание.

Пропущенный тоннаж 957 млн. т брутто соответствует сроку эксплуатации в реальных условиях около 50 лет при грузонапряженности 18 млн. т брутто в год.

3. Динамико-прочностные испытания показали, что данная конструкция может применяться не только для скоростного и высокоскоростного движения, как предполагалось ранее, но и для совмещенного и грузового движения.

Необходимо провести технико-экономическое обоснование сфер применения безбалластного пути. Предположительно, он будет эффективнее именно при совмещенном движении. 4. На безбалластном пути не должно допускаться наличие болтовых стыков. Необходимо пересмотреть требования по временному восстановлению дефектных плетей бесстыкового пути. Такие плети должны восстанавливаться сразу, например, алюминотермитной сваркой.

5. Безбалластный путь нецелесообразно устраивать на одном из путей двухпутного участка. Необходимо исключить попадание воды между несущей бетонной плитой и тощим бетоном.

6. Существенные риски состоят в том, что безбалластный путь более требователен к соблюдению технологии строительства, состава бетонных смесей и качества подготовки основания.

По этим причинам безбалластный путь предпочтительнее устраивать на эстакадах, мостах и в тоннелях.

7. Теоретически затраты на сооружение безбалластного пути больше, поэтому они должны компенсироваться минимальными затратами на его текущее содержание. Вероятность появления неисправности на безбалластном пути существенно меньше, но риск резкого увеличения затрат на ее устранение существенно выше. Например, просадка на балластном пути устраняется относительно недорогой процедурой подбивки щебня, а просадка бетонной плиты на безбалластном пути требует огромных затрат времени и средств. Эти факторы риска необходимо учесть при расчете стоимости жизненного цикла железнодорожного пути на безбалластном основании.

3.2 Испытания безбалластной конструкции LVT с армированным коробом на Экспериментальном кольце 2011 г. - 2014 г.

Опытная конструкция уложена 26 августа 2011 г. на 3 км II пути в переходную кривую из прямой на радиус R=590 м Экспериментального кольца ОАО «ВНИИЖТ» ст. Щербинка на звенья 184-185 в железобетонный короб, имитирующий нижний свод тоннеля, специально изготовленный для безбалластной конструкции, имитирующий тоннельную конструкцию. Всего

было уложено 84 шт. полушпал. Длина участка пути LVT составляет 25 м, рельсы P65, скрепление Фоссло W30.

Полушпалы типа LVT2-ДФ изготовлены по рабочим чертежам РЧ 2011-06 и техническим условиям ТУ 5864-268-01124323-2011, разработанным ОАО «ВНИИЖТ» на Сызранском заводе железобетонных шпал – филиал ОАО «РЖДстрой». Опытные полушпалы изготовлены по Швейцарской технологии без предварительного натяжения.

Воздействие на опытную конструкцию осуществляется грузовым составом из 80 полувагонов с осевой нагрузкой 230 кН. Скорость движения 80 км/ч, грузонапряженность 300 млн. т брутто в год.

В процессе испытаний контролировалось состояние рельсовой колеи, изменение подуклонки рельсов на участке с железобетонными полушпалами типа LVT2-ДФ, затяжка шурупов узлов рельсовых скреплений W30. Произведена геодезическая съемка осадок пути без нагрузки и под нагрузкой от подвижного состава. Кроме того, проведены тензометрические и вибродинамические испытания.

Испытания проведены с участием специалистов кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса» ФГБОУ ВО ПГУПС «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» в части тензометрических измерений напряжений в слоях конструкции и вибродинамических воздействий [265].

Состояние рельсовой колеи и путевого бетона

В процессе испытаний контролировалось состояние рельсовой колеи по шаблону и уровню (Таблица 3.6), изменение подуклонки рельсов на участке с железобетонными полушпалами типа LVT2-ДФ (Таблица 3.7), затяжка шурупов узлов рельсовых скреплений W30 (Таблица 3.8).

144
N⁰	Дата замера шаблона и уровня, пропущенный тоннаж млн. т бр.										
п/п	II путь, 3-ий км, звено 184-185										
шпал	15.09.2011 T=0),69	07.10.2011	T=19,87	16.11.2011 T=54,26						
	шаблон	уров.	шаблон	уров.	шаблон	уров.					
1	1518	6	1518	5	1518	4					
3	1518	7	1518	7	1518	7					
5	1520	8	1519	8	1520	8					
7	1522	8	1521	8	1520	9					
9	1523	10	1522	10	1523	10					
11	1523	10	1523	10	1524	10					
13	1522	10	1523	10	1523	12					
15	1522	12	1522	12	1522	12					
17	1522	14	1522	17	1522	16					
19	1522	20	1522	20	1522	20					
21	1523	19	1522	20	1528	20					
23	1523	20	1522	20	1522	20					
25	1523	20	1522	21	1522	20					
27	1522	22	1521	21	1521	22					
29	1522	22	1521	22	1521	22					
31	1522	22	1521	23	1521	22					
33	1522	24	1522	23	1522	24					
35	1523	26	1522	26	1522	26					
37	1524	28	1523	28	1522	28					
39	1523	30	1522	28	1522	28					
41	1522	31	1521	31	1521	30					
42	1523	32	1521	31	1521	30					
СР	1522	18,23	1521,36	521,36 18,23		18,18					
СКО	1,51		1,4		2						

Таблица 3.6 - Состояние рельсовой колеи

Таблица 3.7 - Изменение подуклонки рельсов на участке с железобетонными полушпалами типа LVT2-ДФ

	Дата замера подуклонки рельсовых нитей,												
Nº ¤∕¤		пропуще	енный тонн	аж млн. т б	p.								
11/11		II путь,	3-ий км, зв	ено 184-18	5								
	15.09.2011	07.10.201	1 T=19,87	16.11.2011 T=54,26									
	шаблон	уров.	шаблон	уров.	шаблон	уров.							
1	1/16	1/17	1/16	1/16	1/17	1/17							
3	1/16	1/15	1/16	1/15	1/17	1/15							
5	1/17	1/16	1/16	1/16	1/17	1/15							
7	1/18	1/16	1/16	1/16	1/17	1/15							
9	1/18	1/15	1/16	1/15	1/17	1/15							
11	1/17	1/16	1/16	1/15	1/17	1/15							
13	1/18	1/15	1/17	1/15	1/17	1/15							
15	1/18	1/16	1/17	1/15	1/17	1/15							
17	1/17	1/16	1/17	1/15	1/17	1/15							
19	1/18	1/15	1/17	1/15	1/17	1/15							
21	1/17	1/16	1/16	1/15	1/17	1/15							
23	1/17	1/16	1/16	1/15	1/17	1/15							
25	1/17	1/16	1/16	1/15	1/17	1/15							
27	1/17	1/15	1/16	1/15	1/17	1/15							
29	1/18	1/16	1/18	1/15	1/17	1/15							
31	1/18	1/15	1/17	1/15	1/17	1/15							
33	1/18	1/15	1/16	1/15	1/18	1/15							
35	1/18	1/15	1/17	1/16	1/17	1/15							
37	1/18	1/15	1/16	1/15	1/17	1/15							
39	1/20	1/15	1/16	1/16 1/15		1/15							
41	1/20	1/15	1/18	1/16	1/17	1/15							

N⁰	Величина затяжки шурупов								
полу- шпал	II путь, 3-ий км, звено 184-185								
	внутренняя	наружная							
33	420	420							
35	420	420							
37	420	400							
41	420	300							
45	420	420							
47	300	280							
70	420	400							

Таблица 3.8 - Результаты замеров величины затяжки шурупов

Общий вид опытного участка показан на Рисунке 3.17.

В начальный период полигонных испытаний в путевом бетоне безбалластного полотна LVT, который объединяет полушпалы, возникло 6 поперечных трещин раскрытием до 0,5 мм (Рисунок 3.18). В процессе наработки их развитие не происходило.

В середине опытного участка имело место выкрашивание путевого бетона возле блоков (Рисунок 3.19).

Контрольное вскрытие рельсовых узлов опирания на полушпалы показало, что узлы имеют хорошее состояние. Резиновые подрельсовые прокладки практически не имеют износа.

Состояние шурупов прикрепления удовлетворительное, однако в верхней части резьбы хорошо видна коррозия, как показано на Рисунке 3.20. Это может объясняться неудачным подбором смазки, которую следует в будущем заменить.

Состояние дюбелей в полушпалах хорошее, следов их вырова из бетона не наблюдается, за исключением одного случая. На крайней полушпале установлено разрушение бетона вокруг оголовка дюбеля и его смещения на величину 0,5мм. Очевидно данная полушпала испытывает повышенное динамическое воздействие, что было подтверждено инструментальными измерениями прогибов рельса на переходном участке вблизи от начала безбалластного пути.

При визуальном осмотре, проведенном в июне 2012 года, также обнаружены трещины в бетоне и сколы бетона на границе соприкосновения некоторых полушпал с ним. В момент прохода поезда наблюдались вертикальные перемещения полушпал относительно бетонной обделки, а также выдавливание воды из-под них. Скол бетона и выдавливание воды из-под полушпал показывают, что в момент прохода подвижного состава происходит перемещение полушпал относительно бетона и в процессе эксплуатации между полушпалами и бетонной обделкой образовались зазоры, которые впоследствии заполнились водой.

В процессе дальнейшей эксплуатации при наработке тоннажа 300 млн. т брутто бетонные блоки были заменены на блоки с другой схемой армирования. Путевой бетон ремонтным работам не подвергался.



Рисунок 3.17 Общий вид опытного участка



Рисунок 3.18 Трещины в путевом бетоне



Рисунок 3.19 Сколы и выкрашивание путевого бетона



Рисунок 3.20 Ржавчина на шурупах

Измерения напряжений и вибрации

В декабре 2011 года с участием специалистов кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса» ФГБОУ ВО ПГУПС измерены максимальные вертикальные напряжения на основной площадке земляного полотна регистрировались в сечении по оси пути и при проходе локомотива ВЛ-80 и составили 0,31 кг/см², а при проходе вагонов грузового поезда с осевой нагрузкой 25 тонн - 0,48 кг/см² [265].

Вертикальные напряжения на основной площадке земляного полотна в подрельсовом сечении при проходе локомотива ВЛ-80 составили 0,23 кг/см², при проходе вагонов грузового поезда с осевой нагрузкой 25 тонн - 0,34 кг/см², а на расстоянии 1,6 метра от оси пути 0,21 кг/см² и 0,32 кг/см² соответственно.

Таким образом, в подрельсовом сечении и на расстоянии 1,6 метра от оси пути вертикальные напряжения на основной площадке земляного полотна составляют в среднем 67-74 % от вертикальных напряжений, проявляющихся по оси пути.

В июне 2012 года максимальные вертикальные напряжения на основной площадке земляного полотна также регистрируются в сечении по оси пути и при

проходе локомотива ВЛ-80 составляют 0,31 кг/см², а при проходе вагонов грузового поезда с осевой нагрузкой 25 тонн - 0,45 кг/см².

Вертикальные напряжения на основной площадке земляного полотна в подрельсовом сечении составили при проходе локомотива ВЛ-80 - 0,19 кг/см², при проходе вагонов грузового поезда с осевой нагрузкой 25 тонн - 0,29 кг/см², а на расстоянии 1,6 метра от оси пути 0,19 кг/см² и 0,33 кг/см² соответственно.

В подрельсовом сечении и на расстоянии 1,6 метра от оси пути вертикальные напряжения на основной площадке земляного полотна составляют в среднем 61-73 % от вертикальных напряжений, проявляющихся по оси пути.

Таким образом, средний уровень давлений на основной площадке земляного полотна в июне 2012г. снизился на 7-21 % по сравнению с декабрем 2011г.



Рисунок 3.21 Распределение вертикальных напряжений на основной площадке земляного полотна при проходе локомотива ВЛ-80 в июне 2012 г.



Рисунок 3.22 Распределение вертикальных напряжений на основной площадке земляного полотна в июне 2012г. при проходе вагонов с осевой нагрузкой 250 кН

Сравнение графиков распределения вертикальных напряжений на основной площадке земляного полотна в декабре 2011г и в июне 2012г показывает, что качественная и количественная картина распределения напряжений не изменилась.

При экспериментах, выполненных в июне 2012 г., в сечении по оси пути получено значение вертикальных напряжений от вагонов с нагрузкой на ось 25 тонн на основной площадке земляного полотна равное 0,45 кг/см², что практически совпадает с результатом, зафиксированным в декабре 2011г. Разница составляет 6 %, что лежит в пределах точности измеряемых параметров.

В подрельсовом сечении в июне 2012г. вертикальные напряжения от вагонов с нагрузкой на ось 25 тонн составили 0,29 кг/см², а в декабре 2011г. 0,34 кг/см², то есть их величины снизились. Разница составляет 17 %. Указанные выше изменения уровня вертикальных напряжений лежат в пределах точности измерений. Следовательно, после девяти месяцев эксплуатации напряженное состояние грунтов земляного полотна при конструкции верхнего строения пути типа LVT не изменилось, и, в среднем, величины напряжений составили:

- по оси пути для локомотива - 0,31 кг/см², для вагонов с нагрузкой на ось 25 тонн - 0,47 кг/см²;

- по оси рельса для локомотива - 0,21 кг/см², для вагонов с нагрузкой на ось 25 тонн - 0,32 кг/см²;

- на расстоянии 1,6 метра от оси пути для локомотива - 0,20 кг/см², для вагонов с нагрузкой на ось 25 тонн - 0,33 кг/см².

Сопоставление полученных величин с результатами отечественных исследований напряженного состояния железнодорожного земляного полотна при конструкции верхнего строения пути на балласте показывает, что напряжения на основной площадке земляного полотна при безбалластной конструкции верхнего строения пути при проходе опытного грузового поезда ниже примерно в 2 раза.

Кроме того, безбалластная конструкция пути по сравнению с балластной значительно лучше сглаживает эпюру вертикальных напряжений, то есть в пределах несущей плиты разброс между максимальным и минимальным напряжений Необходимо вертикальных значительно меньше. значениями отметить, что при фактическом состоянии безбалластной конструкции верхнего строения пути меняется качественная картина распределения напряжений. Максимальные величины напряжений регистрируются не по оси рельса, а по оси пути по сравнению с железнодорожным путем на балласте, где максимальные напряжения фиксируются по оси рельса, а минимальные по оси пути, и составляют на основной площадке 30-35 %, а у конца шпал – в среднем до 70-84 % от напряжений в подрельсовом сечении. При этом разброс между максимальным и минимальным значениями при безбалластной конструкции не 39 %. Это явление объясняется большой распределяющей превышает способностью несущей плиты и слоя тощего бетона.

Важным отличием в работе конструкций является то, что балластный слой в большей степени перерабатывает (гасит) напряжения, а плитная конструкция просто передает напряжения, распределяя их на большую площадь.

153

В октябре 2012 года максимальные вертикальные напряжения на основной площадке земляного полотна регистрируются в сечении по оси пути и составляют при проходе локомотива ВЛ-80 - 0,15 кг/см², а при проходе вагонов грузового поезда с осевой нагрузкой 25 тонн - 0,22 кг/см².

Вертикальные напряжения на основной площадке земляного полотна в подрельсовом сечении составили при проходе локомотива ВЛ-80 - 0,15 кг/см², при проходе вагонов грузового поезда с осевой нагрузкой 25 тонн - 0,21 кг/см², а на расстоянии 1,6 метра от оси пути 0,12 кг/см2 и 0,22 кг/см² соответственно.

Таким образом, при проходе локомотива на расстоянии 1,6 метра от оси пути вертикальные напряжения на основной площадке земляного полотна составляют в среднем 85 % от вертикальных напряжений, проявляющихся в подрельсовом сечении и по оси пути. При проходе вагонов с осевой нагрузкой 25 тонн разброс в значениях вертикальных напряжений на основной площадке по оси пути, в подрельсовом сечении и на расстоянии 1,6 метра от оси пути не превышает 5 %.

Сравнение усредненных значений вертикальных напряжений, полученных в декабре 2011г. и июне 2012г. с вертикальными напряжениями на основной площадке земляного полотна в октябре 2012 г. показывает, что уровень напряженного состояния снизился на 37 %. Обоснованием снижения вертикальных напряжений, является увеличение «люфта» между поверхностью бетона и подошвой полушпалы. Вследствие этого происходит неплотное прижатие полушпалы к бетонной плите, вследствие чего существенная доля нагрузки, передающейся от поезда, воспринимается и перерабатывается рельсом. Поэтому действующие напряжения в земляном полотне снижаются [265].

Затухание вертикальных напряжений по глубине земляного полотна

В декабре 2011г. распределение вертикальных напряжений по глубине в подрельсовом сечении при проходе локомотива ВЛ-80 и вагонов с нагрузкой на ось 25 тонн показано на Рисунках 3.23 и 3.24 соответственно.

154



Рисунок 3.23 Распределение вертикальных напряжений по глубине в подрельсовом сечении при проходе локомотива ВЛ-80 в декабре 2011г



Рисунок 3.24 Распределение вертикальных напряжений по глубине в подрельсовом сечении при проходе вагонов с нагрузкой на ось 25 тонн в декабре 2011г

Сравнение графиков затухания вертикальных напряжений по глубине показало, что как в декабре 2011г, так в июне 2012г, так и в октябре 2012 г характер затухания вертикальных напряжений в земляном полотне практически одинаков. Отличие в графиках распределения напряжений по глубине как при проходе локомотивов, так и при проходе вагонов с нагрузкой на ось 25 тонн за разные периоды заключается в том, что в июне 2012г вертикальные напряжения на границе тощего бетона и ЩПГС стали значительно меньше (на 24%) по сравнению с напряжениями на границе ЩПГС и песка. В декабре 2011г эта разница составляла всего 8%.

В трёх экспериментах, проведенных в декабре 2011г., в июне 2012г и в октябре 2012 г напряжения под слоем тощего бетона оказались меньше, чем на глубине 20 сантиметров от его подошвы. Такое обстоятельство может быть вызвано наличием «люфта» между мессдозой и слоем тощего бетона; фактическим распределением напряжений, вызванным текущим состоянием верхнего строения пути в октябре 2012г.

Учитывая, что мессдозы на опытном участке устанавливались в период строительства, а верхний слой ЩПГС тщательно уплотнялся, первую причину, следует исключить в качестве объяснения такого факта. Следует обратить внимание на то, что между полушпалой и несущей плитой есть люфт, полушпала висит на рельсе и не опирается на подшпальное основание, при этом имеется подуклонка рельса.

Таким образом, при проходе поезда, полушпала передает давление на несущую плиту своим торцом со стороны оси пути, вызывая тем самым эффект «местного контактного давления». Это объясняет тот факт, что наибольшие напряжения фиксируются по оси пути, а не по оси рельса.

В октябре 2012г. во всех сечениях по глубине под локомотивами и вагонами вертикальные напряжения снизились на 4 - 37 %. Падение напряжений, обусловлено увеличением «люфта» между шпалой и бетонной плитой. Исследования доказывают, что безбалластная конструкция верхнего строения

пути LVT не является жесткой плитой (в этом случае возникало бы равномерно распределенное напряженное состояние). Тогда объяснением роста напряжений на глубине 20 сантиметров под слоем тощего бетона является увеличение зоны распространения давлений на земляное полотно.

Трещины в полушпалах, возникли из-за люфта между полушпалой и бетоном, а также из-за наличия подуклонки, которая, при проходе поезда по опытному участку, стремится повернуть рельс с полушпалой внутрь колеи. В результате такого поворота полушпала опирается на подшпальное основание не всей подошвой, а только гранью со стороны оси пути, при этом внешняя грань полушпалы осуществляет движение вверх-вниз по боковой поверхности бетона омоноличивания при проходе осей состава, вызывая сколы бетона. Опирание полушпалы только двумя гранями приводит к тому, что подрельсовая зона полушпалы висит в воздухе, возникает изгибающий момент, который приводит к возникновению и развитию трещин в полушпалах, а также к выходу из строя полушпал, что подтверждается опытом эксплуатации и необходимостью двойной замены [265].

Результаты измерений колебательного процесса безбалластной конструкции верхнего строения пути типа LVT и пути на балласте

Проведенные исследования показали, что характер колебательного процесса по составляющим колебаний на участке с конструкцией верхнего строения пути LVT и на участке со стандартной конструкцией на балласте одинаковый, а величины амплитуд колебаний на различных стоянках и по составляющим разные.

Результаты определения амплитуд колебаний по всем стоянкам и составляющим сведены в Таблицу 3.9.

Таблица 3.9 - Величины амплитуд колебаний (результирующих и по составляющим) безбалластной конструкции пути и пути на балласте

Тип конструкции верхнего строения	Амплитуда колебаний, микрон							
пути и номер стоянки	X	У	Z	r				
Безбалластная конструкция верхнего стро	оения пути типа (LVT)							
Стоянка №1 (на монолитной плите)	30	119	298	352				
Стоянка №2 (в земляном полотне на уровне верха тощего бетона, на расстоянии 3,8 метра от оси пути и на глубине 0,9 метра от головки рельса)	23	86	209	249				
Стоянка №3 (в земляном полотне на уровне низа тощего бетона, на расстоянии 3,8 метра от оси пути на глубине 1,1 метра от головки рельса)	19	73	188	226				
Стандартная конструкция верхнего строе	ния пут	и на балла	асте					
Стоянка №1 (у торца шпалы в уровне ее подошвы)	47	86	392	431				
Стоянка №2 (в земляном полотне на расстоянии 3,8 метра от оси пути на глубине 0,8 метра от головки рельса)	17	33	157	174				
Стоянка №3 (в земляном полотне на расстоянии 3,8 метра от оси пути на глубине 1,1 метра от головки рельса)	14	29	143	157				

Примечание: х – горизонтальная вдоль оси пути составляющая колебаний;

у – горизонтальная поперек оси пути составляющая колебаний;

z – вертикальная составляющая колебаний;

r – результирующая колебаний.

При конструкции LVT горизонтальная составляющая амплитуды колебаний вдоль оси пути по трем стоянкам – 10-11% от вертикальной составляющей, а горизонтальная составляющая поперек оси пути – 39-41% соответственно.

На участке со стандартной конструкцией железнодорожного пути горизонтальная составляющая амплитуды колебаний вдоль оси пути по трем стоянкам – 10-12% от вертикальной составляющей, а горизонтальная

составляющая поперек оси пути – 20-22% соответственно. Следовательно в процентном соотношении горизонтальные амплитуды вдоль оси пути на исследуемых участках практически одинаковые, а горизонтальные амплитуды поперек оси пути при конструкции LVT примерно в 2 раза выше, чем при пути на балласте.

Сравнение результирующих амплитуд колебаний <u>№</u>1 на стоянке показывает, что величины амплитуд колебаний на поверхности бетонной плиты конструкции верхнего строения пути типа LVT на 18% меньше, чем амплитуды колебаний на балласте при стандартной конструкции верхнего строения пути. колебаний Вертикальные амплитуды И горизонтальные вдоль оси железнодорожного пути также меньше на 24% и 36% соответственно. А вот горизонтальные амплитуды поперек оси пути на безбалластной конструкции на 38% выше, чем на стандартной.

Пониженный по сравнению стандартной конструкцией уровень co вибродинамического воздействия безбалластной LVT конструкции на объясняется ее массивностью. От одного и того же поезда на разные конструкции верхнего строения пути приходит одинаковое силовое воздействие. Конструкция LVT поглощает и перераспределяет его. Поэтому результирующие, вертикальные и горизонтальные амплитуды колебаний вдоль оси пути снизились, а горизонтальные амплитуды колебаний поперек оси пути, в силу особенности взаимодействия подвижного состава с тяжелой и жесткой конструкцией, увеличились.

На стоянках №2 и №3 соотношение амплитуд колебаний в земляном полотне на расстоянии 3,8 метра от оси пути и на глубине 0,9 и 1,1 метра от головки рельса при рассматриваемых конструкциях изменилось. Уровень вибродинамического воздействия на стоянках №2 и №3 при стандартной конструкции железнодорожного пути получился значительно ниже, чем при безбалластной конструкции пути типа LVT.

Результаты исследований показывают, что, несмотря на более высокий уровень колебаний у торца шпалы, на стоянке №1 стандартная конструкция верхнего строения пути на балласте эффективнее гасит колебания в поперечном оси пути направлении, так как балласт лучше перерабатывает вибродинамическое воздействие.

Конструкция LVT снижает вертикальные амплитуду колебаний, но при этом увеличивает горизонтальные поперек оси пути. Кроме того, безбалластная конструкция является в целом жесткой и поэтому эффективность снижения амплитуд у нее меньше. Повышенный уровень вибродинамического воздействия на железнодорожный путь при безбалластной конструкции верхнего строения пути LVT, прежде всего, связан с наличием «люфта» [265].

Осадка безбалластного пути

Осадка измерялась геодезическим способом по головке рельса через каждые 5 м пути по левой и правой рельсовым нитям. На Рисунке 3.25 представлена зависимость средних значений осадки и СКО осадки от пропущенного тоннажа. Эту зависимость можно аппроксимировать линейной функцией y = 1,4686T + 2,0267 с точностью аппроксимации $R^2 = 0,8762$. Максимальное значение осадки составляет 10 мм за 600 млн. т брутто, что можно считать вполне удовлетворительным. Максимальное значение СКО составляет 2,88. На Рисунке 3.26 показана интенсивность осадки. Максимальное значение осадки составляет 0,034 мм/млн. т брутто.



Рисунок 3.25 Зависимость осадка и СКО осадки от пропущенного тоннажа



Рисунок 3.26 Интенсивность осадки

Выводы по результатам испытаний безбалластной конструкции LVT в 2011г. - 2013 г.

1. В результате исследований выявлено, что после 7 месяцев эксплуатации (в период между измерениями с декабря 2011г. по июнь 2012г.) значения напряжений на уровне основной площадки под слоем тощего бетона по оси пути, в подрельсовом сечении и на расстоянии 1,6 метра от оси пути, при проходе локомотива ВЛ-80 и вагонов с нагрузкой на ось 25 тонн, оказались на 7-21 % меньше.

2. Сравнение значений вертикальных усредненных напряжений, полученных в декабре 2011г. и июне 2012г. с вертикальными напряжениями на основной площадке земляного полотна в октябре 2012г показало, что уровень 37 %. снизился на Обоснованием напряженного состояния снижения вертикальных напряжений, является увеличение «люфта» между поверхностью бетона и подошвой полушпалы.

3. Сравнение графиков затухания напряжений по глубине показывает, что характер распределения напряжений, как по локомотиву, так и по вагонам не изменился. В декабре 2011г. и июне 2012г. усредненные вертикальные напряжения составили при проходе локомотива ВЛ-80 на глубине 0,2 метра 0,25 кг/см², на глубине 0,7 метра 0,20 кг/см², при проходе вагонов с нагрузкой на ось 25 тонн на глубине 0,2 метра 0,37 кг/см², на глубине 0,7 метра 0,30 кг/см².

4. Максимальные вертикальные напряжения на уровне подошвы тощего бетона были зафиксированы в декабре 2011г. по оси железнодорожного пути 0,48 кг/см², а уровень напряжений под рельсом и на расстоянии 1,6 метра от оси пути ниже, и приблизительно одинаковый, в отличие от традиционного пути на балласте, где наибольшие напряжения всегда проявлялись в подрельсовом сечении, а наименьшие по оси пути.

5. На поверхности монолитной бетонной плиты результирующая амплитуда колебаний составила 352 микрона, что на 18% меньше, чем при стандартной

конструкции железнодорожного пути на балласте у торца шпалы в уровне ее подошвы (431 микрон).

6. В земляном полотне на глубине 0,9 и 1,1 метра уровень вибродинамического воздействия при безбалластной конструкции пути LVT оказался на 30 % выше, чем при стандартной конструкции пути на балласте. Повышенный уровень динамики, вызван неполным опиранием полушпалы на монолитную бетонную плиту.

3.3 Испытания безбалластных конструкций Tines, Alstom, MaxBögl, LVT на Экспериментальном кольце 2014 г. - 2017 г.

Строительство опытного участка безбалластных конструкций пути производилось в период с 05.08.2014 г. по 20.11.2014 г. В период до 03.12.2014 г. произведена обкатка пути с целью стабилизации переходных участков на щебеночном балласте. В эксплуатацию опытный участок сдан 03.12.2014 г. Протяженность каждой из четырех безбалластных конструкций составляла 75 м (без переходных участков). Протяженность всего опытного участка – 500 м. Измерения проводились сотрудниками отделений «Комплексные исследования по взаимодействию пути и подвижного состава» и "Путь и путевое хозяйство" ОАО "ВНИИЖТ" под руководством и при непосредственном участии автора.

3.3.1 Результаты контроля путеизмерительным вагоном

Копия данных поезда вагона-путеизмерителя КВЛ-П (Инфотранс) 06.03.2016 г. представлена на Рисунке 3.27. и Рисунке 3.28. Основные критерии оценки состояния опытных конструкций безбалластного пути (максимальные значения) приведены в Таблице 3.10.



Рисунок 3.27 Поезд КВЛ-П (Инфотранс) 06.03.2016 г. (2 км)



Рисунок 3.28 Поезд КВЛ-П (Инфотранс) 06.03.2016 г. (3 км)

Таблица 3.10 - Основные критерии оценки состояния опытных конструкций безбалластного пути (максимальные значения) по состоянию на 28.10.2016 г.

					Фактические значения											
	ы								OI	іытная кон	струкция					
Параметр	Единица измерени	Норматив по 2 ст.	Норматив по 3 ст.	Балластный путь	Переходный участок Tines входной	Конструкция Tines	Переходный участок Tines выходной	Переходный участок Alstom входной	Конструкция Alstom	Переходный участок Alstom выходной	Переходный участок MaxBögl входной	Конструкция MaxBögl	Переходный участок MaxBögl выходной	Переходный участок LVT входной	Конструкция LVT	Переходный участок LVT выходной
Уширение колеи	ММ	14	16	5	9	7	4	4	6	5	9	6	3	6	5	4
Сужение колеи	ММ	6	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Перекос	ММ	12	16	0	0	14	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0
Просадка правая	ММ	15	20	4	11	9	14	14	14	10	5	3	4	14	6	6
Просадка левая	ММ	15	20	6	12	8	13	13	13	9	5	4	3	13	6	5
Рихтовка правая	ММ	15	25	5	9	9	8	9	8	9	5	3	5	7	6	8
Рихтовка левая	ММ	15	25	7	9	9	7	9	7	8	4	4	4	8	6	9
Уровень	ММ	16	20	4	8	7	7	6	9	6	4	4	3	5	6	5
Ширина колеи	ММ			1525	1529	1527	1524	1524	1526	1525	1529	1526	1523	1526	1525	1524

3.3.2 Момент затяжки шурупов (болтов) рельсовых скреплений

Момент затяжки шурупов или болтов рельсовых скреплений проверяется динамометрическим ключом по ГОСТ 51254-99. Результаты оформлены в виде таблицы 3.11.

Наименование конструкции	Переходный участок Tines	Tines	Переходный участок Tines	Переходный участок Alstom	Alstom	Переходный участок Alstom	Переходный участок MaxBögl MaxBögl		Переходный участок MaxBögl	Переходный участок LVT	TVT	Переходный участок LVT
Макс. момент, Н м	380	420	410	390	360	310	430 400		410	320	400	300
Мин. момент, Н м	250	315	150	220	280	230	210	250	210	240	250	240

Таблица 3.11 - Момент затяжки в узлах рельсовых скреплений

3.3.3 Количество дефектных элементов скреплений

По каждой из опытных конструкций (Tines, Alstom, MaxBögl, LVT) составлена дефектная ведомость элементов рельсовых скреплений по форме таблицы 3.12.

Дата	Пропущенный	Место	Наименование	Количество	Примечание
	тоннаж, млн.т	расположения	элемента	вышедших	
	бр.	элемента	скреплений	элементов	
		скреплений			
09.12.2015	300	MaxBögl	боковой упор	1	ИЗЛОМ
00.12.2015	200	M Dr. 1		1	
09.12.2015	300	MaxBögl	клемма	1	ИЗЛОМ
09.12.2015	300	Alstom	Болты	16	ИЗЛОМ
			крепления		
			дополнительных		
			рельсов		
17.03.2016	400	MaxBögl	клемма	1	ИЗЛОМ
13.10.2016	600	MaxBögl	клемма	1	ИЗЛОМ
13.10.2016	600	Alstom	подкладка	1	ИЗЛОМ
			Vossloh		
1				1	

Таблица 3.12 - Дефектность элементов скреплений

3.3.4 Наличие трещин в бетоне

Результаты наблюдений за состоянием (дефектностью) подрельсового основания 23.03.2016 г. при пропуске 400 млн. т брутто представлены в Таблице 3.13. Дефекты бетонного основания представлены на Рисунках 3.29 – 3.47

Виды дефектов"Tines"														
Дата	Тоннаж млн.т брутто	Трещи в лот шт	Трещины , ины в блоке гке, по г. дюбелю,			Трещи блоке рельс	Трещины в блоке под рельсом, шт.			ы в по ке,	Трещины в заливочном слое шт. до 0,5 >0,5			
18.03.	100	6			шт. 38	6		32			ММ 16		мм 15	
13.10. 2016	600	54	<u>.</u>		86	7		43			128		24	
13.10. 2016 Потеря сцепления блоков и бетонной армированной плиты (отслоение блоков) 6 шт. 13.10. 600 Излом армированной несущей плиты по всей ширине. Разрушение гидравлически связанного несущего слоя из тощего бетона (выплеск)											ън щего			
Виды дефектов"Alstom"														
Пата	Тоннаж	Гоннаж Трещины по торцу			Грещины		Трещины				рещины в заливочном слое, шт.			
дата млн.т плит брутто шт			Ъ,	П	литы, шт.	всей	всей плите, шт.			до 0,5 мм			0,5 мм	
18.03.20 15	100	-			-		-			-			-	
13.10.20 16	600	41			8		5				53		3	
	I	I		Bı	іды дефек	тов Ма	x Bogl							
Дата	Расположение		Треп ны блок шт	ещи Трещи- ы в ны на оке, плите, ит. шт.		Окол (скол) плиты , шт.	кол Размеј сол) трещин иты длина, Ш шт. мм р		ер ины Шир на раскј ытия мм	И р	Описание дефе		ефекта	
18.03.15	На пл -№	плите: -№2			1	-	70		до 0,5		Поперечная трещина с торца плиты по правой нитке с выходом к блоку			
	На плите: -№1 -№7 от блока №63 -№8 от блока						210 470				Увеличени внутрь плите от поперечна посередин	ие т кол блс ая т не п	рещины еи на ока №2 рещина литы от 63 72	
	/ פונ דם No12.	№72 -№12 от блока					300				111 BHV	LDN LDN	03, 72, колеи	

Таблица 3.13 – Дефектность подрельсового основания

Продолжение Таблицы 3.13

1	2	3		4	5		6	7		8	
	-№4 от блока			1					трещи	на от блока	
	<u>№</u> 39						360		№39 по	правой нитке	
	-№4 от блока			1			120	0.5	внут	ри колеи;	
	N <u></u> 240						130	до 0,5	увеличе	ние трещины	
									внутр	ь колеи на	
									плите о	т олока №40	
									по пр	авои нити	
	На плите:			-	Окој	I	-	-	Разруше	ение боковой	
	-N <u>o</u> 3								поверхи	ности плиты	
									около	блока №21	
									снар. ко	леи по левой	
	TT						220			нитке	
	На плите:			1			320 560		Про	дольные	
	- JN <u>0</u> 8 N⇔0			1			560		трещи	ны внутри	
	-JN <u>0</u> 9 N₀11			4			Max		колеи н	на плитах от	
	-JN≌11			5			800 Max		шпо	нки около	
							мах		No No	κοβ. μΩ70 ωΩ1 μΩ2	
									No102 (x	№01и02 Ивелколтр	
									J12102 ()	5 IIIT.)	
	На плите:								Трещин	а от шпонки	
	-№12			1			830		к блок	у № 118 по	
									лев	ой нитке	
	На плите:								Трещин	ы на плите от	
	№ 11		2				250		блокон	ов 99 и 98 по	
									правой нитке внутри		
									1	колеи	
10 10 16	На плите:	-		•	-				Попереч	ная трещина	
13.10.16	-№1 и 2 от			2					от торца	олока №10 и	
	ОЛОКОВ №10 И							0.5	п	11;	
	11 N-7							до 0,5	110	перечная	
	-№/ ОТ ОЛОКА №61			1					трещи	на по левои	
	JNº01 No11 on 5πorro			1					ните	е (торец)	
				1						аливочного	
	Л⊻104 Около блока			1					Изпом	клемиц по	
									перой ш		
	N₀118								ловои пі	колеи	
	512110			1		(T)			· · · ·	колен	
		В	идь	ы дефе	ектов	'L'	V I ''				
	Тоннаж	Трещин	њ	Трещ	ины в	T	рещины	в Тр	ещины в з	аливочном	
Дата	МЛН.Т	под		ОЛОК		-	олоке по		сло		
	брутто	рельсо	м,	дюо	елю, т	В	ыкружке	, до	0,5 мм	>0,5 мм	
		ш1.		ш	1.		ш1.				
18.03.2015	100	4		Z	1		1		27	16	
						1				-	
10.10.0011		•									
13.10.2016	600	28)		21		63		
						1				1	



Рисунок 3.29 Поперечная трещина от торца блока №5 MaxBögl



Рисунок 3.30 Трещина по правой нитке с выходом на торец плиты от торца блока №32 MaxBögl



Рисунок 3.31 Трещина от скрепления с выходом на торец на участке Alstom



Рисунок 3.32 Трещины в заливочном слое бетона на участке LVT



Рисунок 3.33 Множественные трещины в заливочном слое на участке Tines



Рисунок 3.34 Отслоение блоков от заливочного слоя на участке Tines



Рисунок 3.35 «Выплеск» из-под плиты Tines



Рисунок 3.36 Выделение цементных составляющих из швов и трещин



Рисунок 3.37 Выплески из-под плиты Alstom



Рисунок 3.38 Трещины плиты Alstom



Рисунок 3.39 Трещины плиты Alstom



Рисунок 3.40 «Выплеск» из-под плиты MaxBögl



Рисунок 3.41 Разрушение стыка плит MaxBögl



Рисунок 3.42 Выделение цементных составляющих из трещин плит MaxBögl



Рисунок 3.43 Трещины на стыке плит MaxBögl



Рисунок 3.44 Трещины несущей плиты LVT



Рисунок 3.45 «Выплеск» из-под несущей плиты LVT



Рисунок 3.46 Выделение продуктов истирания чехлов LVT



Рисунок 3.47 Трещины несущей плиты LVT
3.3.5 Трудозатраты на текущее содержание

Объем трудозатрат на текущее содержание каждой безбалластной конструкции и переходных участков с указанием вида работ, количества занятых монтеров пути, используемой техники и затраченном времени представлен в Приложении Д.

Основной объем работ по всем конструкциям составляет выправка переходных участков. На Рисунках 3.48 - 3.51 представлены фотографии отрясенных шпал в непосредственной близости от бетонной плиты.



Рисунок 3.48 Отрясенные шпалы на переходном участке Tines



Рисунок 3.49 Отрясенные шпалы на переходном участке Alstom



Рисунок 3.50 Отрясенные шпалы на переходном участке MaxBögl



Рисунок 3.51 Отрясенные шпалы на переходном участке LVT

3.3.6 Осадка безбалластных конструкций пути

Согласно методике проведения испытаний безбалластных конструкций пути на ЭК ОАО «ВНИИЖТ» на станции Щербинка проведено первоначальное измерение уровня головки рельса (УГР) на всех четырех конструкциях.

На Рисунках 3.52–3.53 приведены профили УГР всех конструкций отдельно по правой и левой рельсовым нитям.

На Рисунках 3.54–3.61 приведены УГР по каждой конструкции с указанием начала и конца плиты (границы вертикальные черные линии).



Рисунок 3.52 УГР по правой нити на всем участке укладки безбалластных конструкций



Рисунок 3.53 УГР по левой нити на всем участке укладки безбалластных конструкций.



Рисунок 3.54 Уровень головки рельса на участке конструкции Tines по правой нити



Рисунок 3.55 Уровень головки рельса на участке конструкции Tines по левой нити



Рисунок 3.56 Уровень головки рельса на участке конструкции Alstom по правой нити



Рисунок 3.57 Уровень головки рельса на участке конструкции Alstom по левой нити







Рисунок 3.59 Уровень головки рельса на участке конструкции MaxBögl по левой нити







Рисунок 3.61 Уровень головки рельса на участке конструкции LVT по левой

нити

Осадки конструкции Tines в зависимости от пропущенного тоннажа характеризуются средним значением от -0,5 до 2,4 мм при этом СКО колеблется 0,9 до 5,7. На переходных участках среднее значение осадки от -13 до 5 мм, СКО от 0,5 до 12. В целом осадка плиты равномерна на величину 2 мм. Наибольшее значение осадки до 5 мм наблюдается в местах зафиксированного "выплеска" изпод бетонной несущей плиты.

У конструкции Alstom среднее значение осадки от пропущенного тоннажа составляет от -2,5 до 11,7 при СКО 0,7 до 2,9. На переходных участках средне значение от -19,7 до 3,5 мм, СКО от 0,7 до 11,5. По сравнению с исходным положением плиты она имеет достаточно равномерную осадку по всей длине участка величиной 18 мм.

Безбалластный путь MaxBögl имеет среднее значение осадки от -2,5 до 5,5 мм, СКО от 0,9 до 4,6. Переходные участки имеют среднее значение осадки от - 19,7 до 10 мм при СКО от 1,2 до 11,5. По сравнению с исходным положением плиты осадка в основном составляет 10 мм за исключением последних по ходу движения 20 м, где осадка достигает 16 мм.

Конструкция LVT имеет среднее значение осадки от 0,5 до 1,8 мм при СКО от 0,9 до 3,7. Переходные участки характеризуются средним значением осадок от -15,8 до 3,8 мм, СКО от 1,4 до 9,3. По сравнению с исходным положением плиты осадка неравномерна от 2 до 10 мм, возможно, это связано с различным типом блоков на разных участках конструкции.

Эти значения говорят о существенном разбросе средних показателей осадок и их СКО, что свидетельствует о значительных конструктивных особенностях и их влиянии на поведение безбалластного пути.

Следует отметить, что плитные конструкции пути Alstom и MaxBögl имеют более равномерную осадку всего участка на величину 16–18 мм, а блочные конструкции Tines и LVT имеют неравномерную осадку по длине плиты, но на значительно меньшую величину. Осадку переходных участков оценить достаточно сложно, так как они периодически выправляются и подбиваются машиной ВПР и электрошпалоподбойками. Величина подъемки достигает 40 мм. Существенных отличий в величине и количестве подбивок на различных конструкциях не отмечено.

В Таблице 3.14 приведены средние значения осадок и СКО на участках безбалластных конструкций при различном тоннаже.

На Рисунке 3.62 представлены зависимости просадок средней части плиты безбалластных конструкций пути в сравнении с осадкой пути на балласте.

Таблица 3.14 - Средние значения осадок и СКО на участках безбалластных конструкций при различном тоннаже

Ы		ΓO	Tines		Alstom		MaxBogl			LVT				
Пропущенн	й тоннаж	млн. т брут	тереход	плита	тереход	тереход	плита	тохэдэп	тереход	плита	переход	переход	плита	тереход
0 - 100	осадка	пр.	1,33	2,13	5,00	-13,0	1,93	-19,75	5,5	-1,23	-2,5	1,2	1,37	-6,0
		лев	4,00	1,91	13,20	-6,25	2,71	-13,0	10,75	-0,85	1,5	5,8	1,89	-1,92
	СКО	пр.	1,15	1,50	2,24	2,16	2,37	1,59	4,65	4,22	6,4	9,36	1,21	1,77
		лев	1,00	1,73	2,59	1,26	1,59	3,74	2,87	5,27	9,33	5,5	1,56	2,31
200	осадка	пр.	-0,33	2,47	-8,8	-14,5	-2,50	-3,25	-0,25	2,69	-18,75	-15,8	1,87	0,46
		лев	1,33	2,63	-1,6	-9,75	-1,14	-2,00	2,5	4,54	-13,5	-10,8	0,79	0,54
-00	CKO	пр.	1,53	0,97	3,7	1,29	2,93	2,63	2,63	6,12	8,5	6,38	0,91	4,24
1		лев	0,58	0,67	3,58	2,75	3,37	4,08	3,7	5,11	9,33	2,77	1,40	4,71
200-300	осадка	пр.	4,33	-0,59	-13,8	3,5	11,79	-6,75	-2,25	10,0	-8,25	-3,80	0,82	-4,38
		лев	6,67	-2,03	-16,8	5,75	12,79	-2,5	0,50	8,31	-8,50	-2,8	1,26	-0,58
	CKO	пр.	12,86	5,79	8,11	5,26	2,67	11,53	4,65	5,37	4,92	7,6	3,7	3,06
		лев	7,02	5,82	5,81	9,32	3,31	7,33	5,74	4,01	6,24	5,97	3,36	2,42
300-400	осадка	пр.	-3,67	2,00	2,60	2,0	1,71	-0,5	0,25	0,46	-0,25	0,80	0,53	0,19
		лев	-3,33	1,5	3,6	2,75	1,82	-0,75	0,75	0,15	0,00	-1,60	0,79	0,62
	СКО	пр.	0,58	2,13	0,55	0,82	0,73	1,91	0,96	1,2	2,5	3,11	1,22	1,44
		лев	0,58	3,33	1,34	0,5	0,67	1,5	1,26	1,41	1,41	0,55	0,92	0,90
100-500	осадка	пр.	-2,33	1,44	2,20	1,50	1,57	-0,25	0,75	0,77	0,50	0,40	0,58	0,77
		лев	-1,0	1,06	1,60	2,0	1,68	0,0	1,00	0,69	0,50	-1,00	0,84	0,92
	СКО	пр.	0,58	0,51	0,84	0,58	0,65	1,50	1,26	1,36	1,73	1,82	0,51	0,82
7		лев	1,73	1,77	0,55	0,82	0,46	1,15	1,41	1,11	1,73	0,71	0,83	0,80
500-600	осадка	пр.	-1,67	2,0	2,40	2,00	1,36	-0,25	1,5	1,15	0,75	1,40	0,84	0,92
		лев	-1,67	1,81	1,80	1,50	1,61	1,25	1,25	1,46	0,75	-0,60	0,84	0,81
	СКО	пр.	1,15	0,52	0,55	0,00	0,5	1,5	0,56	1,28	1,89	0,55	0,37	0,39
		лев	0,58	1,22	0,45	0,58	0,49	0,50	0,50	0,52	1,89	0,89	0,60	0,49
0 - 600	осадка	пр.	-2,33	9,44	-10,4	-18,5	15,86	-30,75	5,50	13,85	-28,50	-15,80	6,00	-8,04
		лев	6,00	6,88	1,80	-4,00	19,46	-17,0	16,75	14,31	-19,25	-11,0	6,42	0,38
	СКО	пр.	12,66	3,52	9,96	9,15	4,47	9,91	4,12	3,76	4,93	13,75	3,68	4,41
		лев	9,64	3,52	10,23	5,48	4,09	7,07	2,63	2,66	4,92	13,60	3,72	4,29



Рисунок 3.62 Зависимость осадки от пропущенного тоннажа

безбалластных 3.62 Зависимости осадок конструкций на Рисунке аппроксимированы функциями, приведенными в Таблице 3.15. Осадка пути на балласте аппроксимируется логарифмической функцией с достоверностью 0,9686. аппроксимации Осадка четырех типов БВСП аппроксимируется линейными функциями с достоверностью аппроксимации от 0,8162 до 0,9723.

В Таблицу 3.15 включены аппроксимирующие функции осадок безбалластной конструкции Rheda и LVT (с железобетонным коробом), которые были описаны в разделах третьей главы 3.1 и 3.2.

Наименование	Пропущенный	Аппроксимирующая	Достоверность		
конструкции	тоннаж, млн. т	функция	аппроксимации		
	брутто		\mathbb{R}^2		
Путь на	750	$y = 8,3563\ln(x) - 11,074$	$R^2 = 0,9686$		
балласте					
Rheda	950	y = 0,0662x - 18,181	$R^2 = 0,9141$		
LVT (с коробом)	1350	y = 1,4686x + 2,0267	$R^2 = 0,8762$		
Tines	750	y = 0,0107x + 1,1263	$R^2 = 0,8528$		
Alstom	750	y = 0.039x + 1.202	$R^2 = 0,8682$		
MaxBögl	750	y = 0,0262x + 0,4283	$R^2 = 0,8638$		
LVT	750	y = 0,0088x + 1,0593	$R^2 = 0,9828$		

Таблица 3.15 - Аппроксимирующие функции осадок от пропущенного тоннажа

Из графиков на Рисунке 3.62 видно, что осадка всех БВСП существенно ниже осадки пути на балласте. Допустимое значение осадки для БВСП в 15 мм [266] превышены для конструкций Alstom и MaxBögl.

Таблица 3.16 - Величины осадок и среднего квадратического отклонения осадок по безбалластным участкам

Показатель	Tines	Alstom	MaxBögl	LVT	Балласт
Осадка после 100 млн. т брутто	3,085	3,285	-1,655	2,315	29,21
Осадка после 600 млн. т брутто	12,89	32,63	20,99	9,215	43,11
Δ Осадки	9,805	29,345	22,645	6,9	14,54
СКО после 100 млн. т брутто	1,5	2,37	4,22	1,21	1,16
СКО после 600 млн. т брутто	0,52	0,5	1,28	0,37	0,49
Δ СКО	-0,98	-1,87	-2,94	-0,84	-0,71

На Рисунке 3.62 обозначена аппроксимирующая зависимость осадки безбалластного пути от пропущенного тоннажа в сравнении с осадкой пути на балласте.

Наименьшие значения осадок демонстрируют конструкции Tines и LVT. Осадка Tines после пропуска 600 млн. т брутто в 3,3 раза меньше, чем для пути на балласте. Осадка LVT в 4,7 раза меньше.

Существенно большие значения осадок наблюдаются у конструкций Alstom и MaxBögl. Осадка Alstom после пропуска 600 млн. т брутто всего в 1,3 раза меньше, чем для пути на балласте, а MaxBögl в 2,1 раза меньше.

На Рисунках 3.63 - 3.67 представлены графики зависимости осадок от пропущенного тоннажа и СКО значений этих осадок.



На Рисунках 3.68-3.72 показаны гистограммы интенсивности осадки.

Рисунок 3.63 Осадка и СКО осадки для БВСП Tines



Рисунок 3.64 Осадка и СКО осадки для БВСП Alstom



Рисунок 3.65 Осадка и СКО осадки для БВСП MaxBögl



Рисунок 3.66 Осадка и СКО осадки для БВСП LVT



Рисунок 3.67 Осадка и СКО осадки для пути на балласте

Анализ графиков зависимости осадок от пропущенного тоннажа и СКО значений этих осадок на Рисунках 3.63 - 3.67 показывает, что наибольшая неравномерность осадки наблюдается у конструкций Tines (СКО=5,79) и Alstom (СКО=6,12) при максимальном значении осадки не более 14 и 35 мм соответственно. Максимальные значения СКО наблюдаются для измерений осадки, выполненных при пропуске 300 млн. т брутто.

Более равномерное распределение осадок по длине, наблюдается у конструкций MaxBögl (СКО=2,98) и LVT (СКО=3,7) при максимальном значении осадки не более 25 и 10 мм соответственно. Максимальные значения СКО наблюдаются для измерений осадки, выполненных при пропуске 300 млн. т брутто.

Значение СКО для пути на балласте составляет 3,6 при максимальном значении осадки не превышающем 45 мм. Максимальные значения СКО наблюдаются для измерений осадки, выполненных при пропуске 300 млн. т брутто. Этот тоннаж был пропущен по всем конструкциям в декабре 2015 г.

Интенсивность осадки

Интенсивность осадки, изображенная в виде гистограмм на Рисунках 3.58-3.62 показывает, что для безбалластных конструкций стабилизация наступила после пропуска 300 млн. т брутто.

Максимальная интенсивность осадки наблюдается у конструкции Alstom, она составляет 0,1179 мм/млн. т брутто и наблюдается при тоннаже 200 млн. т брутто. Для Tines наибольшая интенсивность составляет 0,0247 мм/млн. т брутто и наблюдается при тоннаже 300 млн. т брутто. Для LVT наибольшая интенсивность составляет 0,0187 мм/млн. т брутто и наблюдается при тоннаже 200 млн. т брутто. Для MaxBögl показатель интенсивности наименьший и составляет 0,1 мм/млн. т брутто, наблюдается при тоннаже 300 млн. т брутто.



Рисунок 3.68 Интенсивность осадки БВСП Tines



Рисунок 3.69 Интенсивность осадки БВСП Alstom



Пропущенный тоннаж, млн. т брутто

Рисунок 3.70 Интенсивность осадки БВСП MaxBögl



Рисунок 3.71 Интенсивность осадки БВСП LVT



Рисунок 3.72 Интенсивность осадки БВСП пути на балласте

Уклон вертикальной неровности, вызванной осадкой

На всех безбалластных конструкциях осадка достаточно неравномерна. График разности отметок начального положения и после пропуска 600 млн. т брутто для БВСП Tines, Alstom, MaxBögl, LVT представлен на Рисунке 3.73.

У конструкции Tines наблюдается три ярко выраженные вертикальные неровности, вызванные осадкой. Длина этих неровностей от 20 до 25 м. Уклоны, вызванные осадкой, составляют от 0,13 до 1,2 ‰.

На участке с конструкцией Alstom зафиксировано пять неровностей, вызванных осадкой. Длина этих неровностей от 10 до 15 м. Уклоны, вызванные осадкой, составляют от 0,6 до 2 ‰.

У конструкции MaxBögl наблюдается три ярко выраженные вертикальные неровности, вызванные осадкой. Длина этих неровностей от 10 до 25 м. Уклоны, вызванные осадкой составляют от 0,4 до 1,2 ‰.

На участке с конструкцией LVT зафиксировано три неровности вызванных осадкой. Длина этих неровностей от 10 до 20 м. Уклоны, вызванные осадкой, составляют от 0 до 1,6 ‰.

На безбалластных конструкциях Rheda и LVT с коробом осадка также достаточно неравномерна. На Рисунке 3.74 представлен график разности отметок начального положения и после пропуска 950 млн. т брутто для БВСП Rheda и LVT с коробом.

У конструкции Rheda наблюдается вертикальная неровность, длиной 20 м, вызванная осадкой. Уклоны, вызванные осадкой составляют от 0 до 2,1 ‰

У конструкции LVT с коробом наблюдается вертикальная неровность, длиной 10 м, вызванные осадкой. Уклоны, вызванные осадкой составляют от 0 до 1 ‰.

В соответствии с [266] величина остаточной деформации основной площадки должна быть равномерной в продольном направлении: уклон, вызванный осадкой, не должен превышать 0,25‰. Таким образом, уклоны неровностей, вызванных осадкой, в ряде случаев в 8 раз превышают допустимые.

Причина таких уклонов неровности состоит в неравномерности модуля деформации химически укрепленного грунта и слоя ЩПГС по длине опытного участка. На длине 500 м значения модуля деформации химически укрепленного грунта колеблются от 40,8 до 291,7 МПа (Таблица 1.10). Для слоя ЩПГС значения модуля деформации колеблются от 153,8 до 226,9 МПа (Таблица 1.11). Такая неравномерность связана с тем, что достаточно сложно обеспечить равномерную концентрацию и влажность химических компонентов химически укрепленного грунта. Для ЩПГС проблема также связана с равномерным перемешиванием всех фракций перед укладкой, так как при хранении и транспортировке более мелкие фракции опускаются вниз.



Рисунок 3.73 Разность осадок после пропуска 100 и 600 млн. т брутто для БВСП Tines, Alstom, MaxBögl, LVT



Рисунок 3.74 Разность осадок после пропуска 100 и 950 млн. т брутто для БВСП Rheda и LVT с коробом

3.3.7 Просадки переходных участков

Осадка переходных участков как абсолютное перемещение, измерялась геодезическими средствами один раз в квартал, как и на безбалластных конструкциях, и представлена на Рисунках 3.52 и 3.53. При этом интенсивность осадки требовала периодической выправки пути. По этой причине проанализирована не осадка, а просадка пути, которая измерялась один раз в месяц штатным путеизмерительным вагоном.

Просадки переходных участков проанализированы по результатам проходов путеизмерительных вагонов с периодичностью 1 раз в месяц или примерно через каждые 30 млн. т брутто.

Наиболее интенсивные просадки до 35 мм наблюдались в первый месяц что требовало еженедельной эксплуатации, ИХ выправки электрошпалоподбойками (ЭШП) И выправочно-подбивочно-рихтовочной машиной (BΠP). Максимальные просадки, зафиксированные вагономпутеизмерителем, в процессе дальнейшей эксплуатации составили 16 мм. При этом просадки входных переходных участков существенно больше, чем выходных.

Наихудшее состояние по истираемости щебня наблюдается у входного переходного участка LVT, конструктивно выполненного с металлической консолью переменного сечения в щебеночном балласте. При этом лучшее зафиксировано LVT состояние выходного переходного участка С У обрезиненными подошвами шпал и у Alstom на переходном участке с подшпальными прокладками. Следует отметить, что переходные участки Alstom имеют дополнительные рельсы внутри колеи. В процессе эксплуатации потребовалась полная замена скреплений для этих рельсов, так как резьбовые шпильки крепления к бетонному основанию не выдерживали нагрузки.

Наименьшая величина просадки переходных участков наблюдается у конструкции MaxBögl.

Графики интенсивности просадок на переходных участках по результатам проходов вагона-путеизмерителя и периодичности их выправки представлены на Рисунках 3.75 - 3.78.



Рисунок 3.75 Просадки переходных участков Tines



Рисунок 3.76 Просадка переходных участков Alstom



Рисунок 3.77 Просадка переходных участков MaxBögl



Рисунок 3.78 Просадка переходных участков LVT

3.3.8 Состояние рельсовых скреплений

Состояние узлов рельсовых скреплений определялось по показателям геометрии рельсовой колеи. Ввиду отличительных особенностей в конструкции опытных участков применяются различные рельсовые скрепления, одной из задач

которых является закрепление и сохранение ширины рельсовой колеи в пределах нормативных допусков.

Все применяемые рельсовые скрепления являются упругими. Основными и наиболее ответственными их элементами являются упругая клемма и подрельсовая прокладка, они определяют физико-механические показатели всего узла в целом.

По данным, полученным в результате натурных измерений и расшифровки лент вагона-путеизмерителя, имеется возможность сравнить изменение ширины рельсовой колеи на момент начала испытаний и после наработки тоннажа в 300 млн. т брутто, приведенное на Рисунке 3.79.

На рисунках по оси X указаны наименования конструкций узлов рельсовых скреплений в той последовательности, в которой они уложены на опытном участке.





Конструкция пути EBS (Tines). На всей протяженности данного участка пути применяется упругое шурупно-дюбельное рельсовое скрепление компании Vossloh W30 HH (heavy-haul), аналог применяемого на сети ОАО «РЖД» скрепления W30. Основным отличием является использование модернизированных углонаправляющих плит и адаптированной подрельсовой



подкладки. На Рисунке 3.80 представлен график состояния ширины рельсовой колеи на момент начала испытаний и после пропуска 300 млн. т брутто груза.

Рисунок 3.80 Ширина рельсовой колеи до начала испытаний и после пропуска 300 млн. т брутто на участке пути EBS (Tines)

Среднее значение ширины рельсовой колеи до начала испытаний составило 1522,25 мм, а на момент измерения – 1520,69 мм.

Конструкция пути FFB (MaxBögl). На всей протяженности данного участка пути применяется упругое шурупно-дюбельное рельсовое скрепление System 301 компании Vossloh. Состояние ширины колеи до начала испытаний и после наработки требуемого тоннажа представлены на Рисунке 3.81.



Рисунок 3.81 Ширина рельсовой колеи до начала испытаний и после пропуска 300 млн. т брутто на участке пути FFB (MaxBögl)

Среднее значение ширины рельсовой колеи до начала испытаний составило 1521,69 мм, а на момент измерения 1520,23 мм.

Конструкция пути NBT (Alstom). На опытном участке представлены два различных типа рельсовых скреплений: System DFF 301 (Vossloh) и SFC (Pandrol). Скрепления имеют существенные конструктивные различия [314]. Значения ширины колеи представлены на Рисунке 3.82



Рисунок 3.82 Ширина рельсовой колеи до начала испытаний и после пропуска 300 млн. т брутто на участке пути FFB (MaxBögl)

Точки измерения 1-7 соответствуют участку пути со скреплением System DFF 301. Среднее значение ширины рельсовой колеи до начала испытаний составило 1524,00 мм, а на момент измерения 1523,14 мм.

Соответствующие измерения на участке со скреплением SFC показали, что средняя ширина рельсовой колеи до начала испытаний составила 1523,00 мм, а на момент измерения 1521,29 мм.

Конструкция пути LVT (РЖДстрой). На опытном участке установлены блоки со скреплениями компаний Vossloh, Schwihag, Pandrol. Точки измерения 1-5 соответствуют участку пути со скреплением W30 HH, 6-10 – соответствуют скреплению SBS W SL-1, 11-12 – Пандрол-350, с 16 по 19 – точки измерения на «старой» конструкции, пропустившей более 1 млрд. т брутто (Рисунок 3.83).



Рисунок 3.83 Ширина рельсовой колеи до начала испытаний и после пропуска 300 млн т брутто на участке пути LVT (РЖДстрой)

Необходимо отметить, что протяженность участка безбалластного пути LVT составляет 105 м. К ранее испытываемому участку пути, по которому было пропущено порядка 700 млн. т брутто, пристроено 75 метров пути в рамках проведения сравнительных испытаний. Данные о состоянии ширины рельсовой колеи приведены в Таблице 3.17.

Таблица 3.17 - Средняя ширина рельсовой колеи для различных типов скреплений

	Средняя ширина рельсовой колеи, мм						
	W30 HH	SBS W SL-1	Пандрол-350	W30 (старая)			
Декабрь 2014	1523,25	1523,40	1522,67	1523,00			
Декабрь 2015	1520,35	1520,11	1520,69	1521,34			

Результаты испытаний безбалластных конструкций Tines, Alstom, MaxBögl, LVT представлены в Приложении Е. Представлены данные по осадкам и СКО значений осадки на участках безбалластных конструкций, данные по износам и подуклонке на участках безбалластных конструкций. Как видно из таблиц Приложения Е, на всех конструкциях ширина колеи стабильна (изменение составило от 0,7 до 2,3 мм, при значениях СКО от 0,99 до 1,71 мм), что обусловлено типом используемых промежуточных рельсовых скреплений. Вертикальный износ рельсов на всех конструкциях составил от 0,02 до 0,031 мм, при значениях СКО 0,005 до 0,009 мм. Боковой износ на всех конструкциях

составлял от 0,089 до 0,152 мм, при значениях СКО 0,007 до 0,023 мм. Показатели вертикального и бокового износа и подуклонки были стабильны в период с декабря 2015 года по март 2016 года.

3.4 Применение оптоволоконных систем для диагностики безбалластного пути

При разработке методики и технической реализации системы мониторинга земляного полотна для безбалластного пути основными предпосылками были:

- в режиме реального времени определять момент выхода железнодорожного пути из безопасного состояния;

- обеспечивать автоматизированный сбор, хранение и передачу результатов режимных наблюдений и иметь выход на управление движением поездов;

- определение температуры и вертикальных перемещений (осадок) слоев земляного полотна под безбалластным путем непрерывно по длине пути.

С участием автора разработаны Технические условия [267] и Программа испытаний оптоволоконной системы диагностики безбалластного пути [268], получен патент на изобретение [269].

Под руководством автора разработана методика и проведены лабораторные (калибровочные) испытания оптоволоконной системы диагностики безбалластного пути [270], которые позволили сертифицировать данную систему. Сертификационные испытания проводились в лабораторных условиях путем принудительного перемещения закрепленного участка оптоволоконного кабеля на заданную величину. Испытания показали возможность отслеживать перемещения кабеля с точностью ± 1 мм и позиционировать эти локальные перемещения с точностью ± 2 м по длине кабеля. При этом длина кабеля может составлять десятки километров.

Нормативная документация представлена в Приложении Ж. Результаты полигонных испытаний системы представлены в Приложении З.

Под руководством автора разработана методика и в период 2014-2017 г.г. проведены полигонные испытания оптоволоконной системы диагностики безбалластного пути на Экспериментальном кольце ОАО "ВНИИЖТ". Акты об укладке оптоволоконной системы и результаты испытаний представлены в Приложении Ж.

3.4.1 Принцип работы анализатора, основанного на вынужденном рассеянии Мандельштама-Бриллюэна

При исследовании осадок слоев земляного полотна под безбалластным путем компанией ЗАО "Лазер Солюшенс" с участием автора была предложена оптоволоконная система диагностики.

Принцип работы оптоволоконной системы диагностики основан на вынужденном рассеянии Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ), которое является физическим свойством материала оптического волокна и может использоваться для измерения механических деформаций и температуры вдоль оптического волокна [271].

Вынужденное рассеяние происходит в кремниевой среде при взаимодействии проходящего излучения и акустических волн, которые возникают вследствие тепловых колебаний решетки. При этом рассеянные волны двигаются в обратном направлении с доплеровским сдвигом по частоте.

Бриллюэновский сдвиг частоты равен отношению скорости акустической волны к длине волны излучения, умноженному на удвоенный показатель преломления кремния. Спектр вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна показан на Рисунке 3.84.



Рисунок 3.84 Спектр вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна

Бриллюэновский сдвиг частоты чувствителен к механическим деформациям и температуре.

При измерении бриллюэновского сдвига частоты с известными калибровочными коэффициентами оптического волокна можно рассчитать температуру и механические деформации.

Местоположение механических деформаций и изменений температуры на длине оптоволоконного кабеля определяется методом, схожим с радиолокацией.

В оптическое волокно вводится оптический импульс, и пришедший обратно рассеянный свет детектируется как функция времени. Таким образом, можно пересчитать время распространения импульса в оптоволоконном кабеле в преодоленное им расстояние и найти место расположения возникшей деформации.

Протяженный волоконно-оптический сенсор является эквивалентом огромного количества точечных датчиков (например, программное обеспечение анализатора DITEST STA-R позволяет разбить контролируемый участок длиной 50 км на 100 000 датчиков).

Сенсор представляет собой специальный волоконно-оптический кабель, который в зависимости от конструкции (способа фиксации и защиты оптического волокна) может быть чувствителен к температуре или деформации. При этом сенсор является полностью пассивным устройством, не требующим электропитания. Перед укладкой в путь система была откалибрована в лабораторных условиях путем фиксированной деформации в произвольном месте оптоволоконного кабеля и последующем определении места и величины деформации.

Волоконно-оптический сенсор вспомогательной подсистемы устанавливается вдоль всего контролируемого участка сигнализации параллельно сенсорам деформации, выполняет функции связи для подключения сенсоров деформации и позволяет компенсировать температурные эффекты, что существенно повышает точность измерения деформации.

Последовательность сбора и обработки данных представлена на Рисунке 3.85.



Рисунок 3.85 Процесс сбора и обработки данных DiTeSt

3.4.2 Практическая реализация оптоволоконной диагностики

Предлагаемая волоконно-оптическая система сигнализации состояния объектов инфраструктуры (ВОСС СОИ) состоит из линейной и программноаппаратной частей.

На опытном участке Экспериментального кольца ОАО "ВНИИЖТ" установлена ВОСС СОИ с ограниченным функционалом (для периодических измерений), шкаф RTU и сервер на участке испытаний не установлены, а подключаются при проведении периодических измерений [226; 259; 260; 261].

На Экспериментальном кольце опрос датчиков осуществляется путем периодического подключения измерительной аппаратуры через специальные разъемы с периодичностью 1 раз в три месяца. В это же время проводится точная геодезическая съемка. Подвижки земляного полотна в вертикальной плоскости, вызванные просадкой грунта, регистрируются продольными сенсорами за счет горизонтальной составляющей. Вертикальные подвижки необходимо контролировать в трех уровнях: бетонный слой, защитный слой, земляное полотно. С этой целью уложено два слоя волоконно-оптического кабеля, как показано на Рисунках 3.86 и 3.87. На Рисунке 3.86 смещение в горизонтальной плоскости показано условно (в плане оба слоя расположены под рельсами), температурный кабель располагается рядом с оптоволоконным (на схеме условно не показан). Первый слой уложен под слоем химически укрепленного грунта [227], второй слой под ЩПГС.

Оптоволокно укладывается двумя слоями под всеми безбалластными конструкциями. В плане два слоя оптоволокна укладываются под рельсами. Кросс-муфта для подключения регистрирующей аппаратуры устанавливается на расстоянии 2–5 м от оси пути.



Рисунок 3.86 Схема укладки оптоволоконных сенсоров ВОСС СОИ



Рисунок 3.87 Схема расположения сенсоров ВОСС СОИ в земляном полотне

На Рисунке 3.88 представлена фотография процесса укладки первого слоя оптоволокна в траншею. На фотографии видны оптокабель для контроля перемещений с "якорями" и более толстый оптокабель для контроля температуры.



Рисунок 3.88 Укладка первого слоя оптокабеля в траншею

На Рисунках 3.89 и 3.90 изображены оптокабель перемещений с "якорем" и температурный оптокабель соответственно первого и второго слоя. Первый слой расположен под слоем химически укрепленного грунта, второй слой под ЩПГС как показано на Рисунке 3.87.


Рисунок 3.89 Оптокабель перемещений с "якорем" и температурный оптокабель первого слоя



Рисунок 3.90 Оптокабель перемещений с "якорем" и температурный оптокабель второго слоя

Оптические разъемы сенсоров должны быть размещены в защитной оболочке (кросс-муфте), которая расположена в специальном колодце. Его расположение обеспечивает беспрепятственный круглогодичный подъезд к нему

мобильной лаборатории для снятия показаний оптоволоконной системы. Программно-аппаратная часть на опытном участке не устанавливается, а подключается к сенсорам на время проведения периодических измерений.

Конфигурация сенсоров в земляном полотне является ключевым фактором, позволяющим проводить измерения и интерпретацию параметров с заданной точностью. В целом процесс монтажа, наладки, испытаний и ввод в эксплуатацию систем мониторинга аналогичен подобным работам для волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Это обусловлено тем, что система мониторинга имеет в своей основе ВОЛС (т.е. использует их компоненты -волоконно-оптический кабель, оптические муфты, камеры оптические трубопроводные, оптические кроссы, оптические шнуры и т.д., а также специализированное монтажное и измерительное оборудование), и через соответствующие интерфейсы сопрягается с ними.

В процессах монтажа, наладки, испытаний и вводе в эксплуатацию систем мониторинга существует и своя специфика, связанная с использованием протяженного волоконно-оптического сенсора:

- засыпка траншеи осуществляться песком или просеянным грунтом;

- сенсоры деформации земляного полотна крепятся к анкерным якорям, устанавливаемым в соответствии с выбранной топологией сенсоров;

- сенсоры деформации монтируются с контролируемым растягивающим усилием;

- производится привязка сенсоров к пикетажу.

Система сигнализации состояния объектов инфраструктуры включает в себя:

- сенсоры деформации ФОСД и SMC-V3;

- якоря для закрепления сенсоров деформации грунта;

- сенсоры температуры ДКП;

- оптическая муфта и оптическая кросс-муфта;

- защитная пластиковая труба для прокладки сенсоров;

- программно-аппаратный комплекс DITEST (используется при

периодических измерениях).

Подключение оптокабелей через колодец к регистрирующей системе, расположенной в автомобиле, показано на Рисунке 3.91. Анализатор DITEST STA-R изображен на Рисунке 3.92.



Рисунок 3.91 Подключение оптокабелей через колодец к регистрирующей системе в автомобиле



Рисунок 3.92 Анализатор DITEST STA-R

По опытным участкам пропущен тоннаж 600 млн. т брутто с осевой нагрузкой 235 кН со скоростью 70 км/ч. Рассмотрим вертикальные осадки безбалластных конструкций в трех уровнях: по уровню головки рельса, под ЩПГС и под укрепленных слоем грунта.

Осадки по головке рельса на опытном участке контролируются при помощи геодезических приборов. Они имеют ярко выраженный характер. Участки на бетонных несущих плитах ведут себя достаточно стабильно и имеют равномерную вертикальную осадку до 13 мм. Разница по левой и правой рельсовой нити не превышает 2 мм. Участки переменной жесткости и путь на балласте имеют более интенсивные осадки до 40 мм и требуют периодической выправки путем подбивки машиной ВПР. Подбивка осуществляется примерно 1 раз в три месяца.

ЩПГС Осадки на уровне контакта И слоя укрепленного грунта контролируются помощи верхнего оптоволоконной при слоя системы диагностики. Осадки достаточно равномерны и не имеют выраженного характера относительно расположения бетонных несущих плит или участков переменной жесткости. По величине они колеблются от 0 до 2 мм.

Осадки под слоем укрепленного грунта контролируются при помощи нижнего слоя оптоволоконной системы диагностики. На этом уровне картина деформаций наиболее интересная. Значения колеблются от 0 до 11 мм, причем на двух опытных конструкциях эти значения около 2 мм, на других конструкциях от 7 до 11 мм. Максимальные значения осадок не коррелируются с границами бетонных несущих плит и не привязаны к расположению участков переменной жесткости. Графики перемещений слоев, зафиксированные оптоволоконной системой представлены на Рисунках 3.93 и 3.94.

На одном из участков пиковые значения осадки от измерения к измерению меняли свое положение на десятки метров. При этом величина просадки могла не только увеличиваться, но и уменьшаться, например, на четвертом участке от предпоследнего до последнего измерения осадка уменьшилась на 3 мм. Между

левой и правой нитью разница составляет до 6 мм. Наибольшие перемещения отмечаются в период оттаивания грунтов весной.



Рисунок 3.93 Осадка верхнего слоя оптоволокна (под ЩПГС)

Анализ возможных причин такого перемещения нижнего естественного слоя показывает, что все опытные участки расположены в зоне высокого уровня грунтовых вод. Это подтверждается результатами предпроектных геологических изысканий. Кроме того, весной наблюдается разность уровней талых вод по левой и правой сторонам насыпи, что приводит к обводнению основания. Следует отметить, что участки с наибольшими перемещениями нижнего слоя расположены ниже и уровень грунтовых вод в этом месте существенно выше.

Перемещения верхнего слоя, расположенного над укрепленным грунтом существенно меньше. Это объясняется тем, что слой химически укрепленного грунта работает как балка или "панцирь", удерживающий верхние слои от перемещения вниз. При этом перемещения никак не коррелируются с расположением переходных участков и никак не зависят от расположения участков с максимальными осадками сверху по уровню головки рельсов. Это говорит о равномерном распределении нагрузки слоем тощего бетона (гидравлически связанный слой) и слоем ЩПГС (морозозащитный слой).



Рисунок 3.94 Осадка нижнего слоя оптоволокна (под химически укрепленным грунтом)

Лабораторные и полигонные испытания показали, что оптоволоконная система выполняет основное предназначение стационарных систем мониторинга земляного полотна, которое заключается в определении момента времени его выхода из безопасного состояния, путем проведения режимных наблюдений, при которых осуществляется определение (измерение) параметров объектов и опасных природных процессов и явлений [272]. При превышении допустимых значений этих параметров системами мониторинга формируется и передается соответствующий сигнал, по получении которого должны быть приняты меры, обеспечиваюшие безопасность движения поездов, а также проведены повышению эксплуатационной надежности участка пути. мероприятия по величин Значения основных параметров объектов земляного полотна И параметров опасных природных процессов и явлений, характеризующих выход объектов из безопасного состояния, содержатся в Технических требованиях к стационарной системе диагностики и мониторинга состояния земляного полотна и конструкций верхнего строения пути [266; 272].

Выводы по разделу 3.4

1. В ходе испытаний выявлены перемещения (осадки) естественного грунта, расположенного под химически укрепленным слоем грунта. Расположение этих деформаций не зависят от размещения границ бетонной несущей плиты и участков переменной жесткости. При этом, чем больше увлажнение, тем больше величина просадки нижнего слоя.

2. Слой ЩПГС имеет наименьшие осадки, которые не зависят от осадок нижних и верхних слоев. От перемещений нижележащего увлажненного естественного грунта его предохраняет химически укрепленный слой грунта, а от перемещений УГР - расположенный сверху слой тощего бетона.

3. Осадка УГР закономерна. Максимальные значения расположены в пределах участков переменной жесткости и связаны с расстройством щебеночной балластной призмы.

4. Оптоволоконная система диагностики земляного полотна позволяет отследить появление и измерить значение перемещений глубоко залегающих слоев, которые иными методами выявить и зафиксировать не представляется возможным.

3.5 Сравнительная оценка результатов испытаний безбалластных конструкций Tines, Alstom, MaxBögl, LVT с учетом "веса" каждого критерия

Наиболее проблемные места для всех опытных конструкций (Tines, ALSTOM, MaxBögl, LVT) — это переходные участки между безбалластным путем и путем на балласте. Просадки в этих местах достигли 40 мм и своевременно выправлялись путем подбивки шпал машиной ВПР.

Для всех опытных конструкций характерно выделение цементных составляющих в виде водной суспензии («выплеск») на стыке первого и второго бетонных слоев, а так же из трещин бетонного слоя и на стыках плит. На безопасность движения данное явление пока не влияет, но наверняка скажется на долговечности конструкций.

Трещины бетонного слоя на всех конструкциях носят усадочный характер, ширина трещин, в большинстве случаев, не превышает 0,5 мм, что является допустимым.

На всех конструкциях ширина колеи стабильна (изменение составило от 0,7 до 2,3 мм, при значениях СКО от 0,99 до 1,71 мм), что обусловлено типом используемых промежуточных рельсовых скреплений.

Вертикальный износ рельсов на всех конструкциях составил от 0,02 до 0,031 мм, при значениях СКО 0,005 до 0,009 мм. Боковой износ на всех конструкциях составлял от 0,089 до 0,152 мм, при значениях СКО 0,007 до 0,023 мм. Показатели вертикального и бокового износа и подуклонки были стабильны в период с декабря 2015 г. по март 2016 г.

После пропуска по опытному участку 400 млн. т брутто общее состояние опытных конструкций безбалластного пути отвечает требованиям безопасности и соответствует Инструкции по текущему содержанию пути.

Работоспособность БВСП оценивается достаточно большим набором критериев: ширина колеи, уровень, рихтовка, перекос, просадка, подуклонка, количество и размер трещин бетонного слоя, интенсивность осадки бетонной плиты и переходных участков, максимальные величины этих осадок, наличие и размер "выплесков" из под бетонной плиты, состояние рельсовых скреплений, напряжения и прогибы слоев БВСП под поездной нагрузкой, число замененных элементов, трудозатраты на текущее содержание и др. Очевидно, что одна из БВСП будет иметь лучшие показатели по одному набору критериев, другая по иному набору критериев, и сравнение всех конструкций по абсолютным значениям представляется довольно затруднительным.

Известен метод определения лучшего изделия из ряда аналогичных изделий по набору противоречивых критериев путем ранжирования этих критериев и присвоения им весовых коэффициентов [273; 74; 275]. Представляется целесообразным использовать этот метод для определения наилучшей конструкции безбалластного пути по результатам испытаний на ЭК. Этот метод можно применить для сравнения нескольких типов безбалластных конструкций пути. При этом попутно решается задача ранжирования критериев оценки конструкций по степени важности методом экспертных оценок.

Метод состоит из нескольких этапов:

1. Назначаются критерии оценки, характеризующие технические, так и иные стороны сравниваемых конструкций;

2. Определяются численные значения критериев по п. 1 для каждой из сравниваемых конструкций, результаты заносятся в Таблицу;

3. Распределяются «места» рассматриваемых конструкций по каждому из критериев (в частном случае значения «мест» могут совпадать);

4. Для понимания значимости рассматриваемых критериев между собой назначаются их весовые коэффициенты («веса») по конкретной рассматриваемой задаче (например, методом экспертных оценок);

5. Для каждого объекта вычисляется сумма его «мест» по критериям с учетом конкретных величин «весов» этих критериев;

6. Полученные в п. 5 числовые значения сумм сравниваются, и из них выбирается наиболее подходящее по следующему принципу: наиболее качественной конструкции должно соответствовать максимальное (или по договоренности — минимальное) значение полученной суммы.

Условимся, что чем больше будет эта сумма «мест» (с учетом «весов» критериев) для конкретного устройства, тем оно качественнее по совокупности критериев.

В Таблице 3.18 приведены числовые значения принятых критериев для шести испытанных на Экспериментальном кольце БВСП.

Найдем «личные места» БВСП по каждому из критериев, исходя из «степени номинальности» (в данном примере — в зависимости от «близости» и «дальности» принимаемых критериями значений от нормативной величины, указанной во второй графе Таблицы 3.18). Результаты занесем в Таблицу 3.19.

В данном случае сравниваются четыре типа БВСП, имеющие по каждому критерию определенные значения и занимающие, таким образом, определенные «личные места» (в зависимости от значения критерия).

«Веса» критериев для рассматриваемой задачи назначены методом экспертных оценок [276] и приняты от 1 до 10 в зависимости от степени значимости критерия среди других, причем, чем более значим конкретный критерий, тем больше его «вес». Значения «весов» критериев занесены в Таблицу 3.21.

В Таблице 3.20 меньшие значения «мест» (по числам) соответствуют более качественным устройствам (наиболее перспективным по каждому из критериев является устройство, занимающее 1-е место, наименее перспективным — занимающее 3-е место). Значения же «весов» критериев, занесенных в Таблице 3.21, напротив, увеличиваются по мере возрастания степени их важности. Итоговые результаты расчетов представлены в Таблице 3.22. Большее значение суммы «мест» БВСП по критериям с учетом «весов» критериев определяется как «лучшее» (наиболее перспективное) для использования на практике.

Геометрия рельсовой колеи — это ширина колеи, уровень, рихтовка, перекос, просадка, подуклонка. Оценивать БВСП по каждому из этих параметров громоздко и неинформативно. Техническими указаниями по использованию вагонов-путеобследовательских станций ЦНИИ-4 [277] предусмотрен комплексный показатель СССП, объединяющий параметры геометрии рельсовой колеи. СССП – комплексный статистический показатель, характеризующий общую меру неровности геометрии рельсовой колеи на километровых (пикетных) отрезках пути, выраженный в виде условной скорости, соответствующей (сокращенно CCCII). состоянию пути Рассчитывается ПО значениям среднеквадратических отклонений отдельных параметров ГРК, чем больше величина СССП, тем меньше количество отступлений и величины неровностей пути. Для сравнительного анализы взята величина обратная СССП, по тому, что все остальные критерии исходят из принципа "чем меньше, тем лучше" а СССП из принципа "чем больше, тем лучше".

Таблица 3.18 - Значения выбранных критериев

	Наименование критерия	Значение	Фактическое значение критерия			
		критерия	LVT	MaxBögl	Alstom	Tines
		для типовой				
		конструкции				
		пути				
1	Геометрия колеи, (1/СССП)	0,0066	0,0051	0,0040	0,0043	0,0045
2	Интенсивность осадки (мм на	10	3,3	4,7	4,9	3,1
	100 млн.т брутто)					
3	Интенсивность осадки	15	35	25	22	23
	переходных участков (мм на 100					
	млн.т брутто)					
4	Максимальная осадка бетонной	30	10,2	14,1	14,9	10,1
	плиты за период испытаний, мм					
5	Длина участков с "выплесками"	-	0,5	1,5	1,2	2,8
	из-под плиты, м					
6	Трещины до 0,5 мм, шт	-	63	20	53	128
7	Трещины более 0,5 мм, шт	-	17	0	3	24
8	Прогиб верхнего бетонного слоя	-	1,7	2,5	2,2	2,4
	под нагрузкой, мм					
9	Число замененных элементов	-	60	2	16	1
	конструкции, шт					
10	Трудозатраты на текущее	70	37,8	20,3	31,2	49,2
	содержание за период					
	испытаний, чел-ч. на 100 млн.т					
	брутто					

Таблица 3.19 - Распределение личных мест для безбалластных конструкций пути по критериям

	Наименование критерия	Личное место критерия			
		LVT	MaxBögl	Alstom	Tines
1	E	4	1	2	2
I	I еометрия колеи, оалл (или	4	1	2	3
2	Интенсивность осадки плиты	2	3	4	1
	(мм на 100 млн.т брутто)				
3	Интенсивность осадки	4	3	1	2
	переходных участков (мм на 100				
	млн.т брутто)				
4	Максимальная осадка бетонной	2	3	4	1
	плиты за период испытаний, мм				
5	Длина участков с "выплесками"	1	3	2	4
	из-под плиты, м				
6	Трещины до 0,5 мм, шт	3	2	1	4
7	Трещины более 0,5 мм, шт	3	2	1	4
8	Прогиб верхнего бетонного слоя	1	4	2	3
	под нагрузкой, мм				
9	Числе замененных элементов	4	2	3	1
	конструкции, шт				
10	Трудозатраты на текущее	3	1	2	4
	содержание за период				
	испытаний, чел-ч. на 100 млн.т				
	брутто				

Таблица - 3.20 Уточненные значения "личных мест", занимаемых конструкциями безбалластного пути по выбранным критериям

	Наименование критерия		Личное мест	го критерия	
		LVT	MaxBögl	Alstom	Tines
1	Г <i>Г</i>				
1	I еометрия колеи, оалл (или				
	СССП)	4,00	1,00	1,69	2,50
2	Интенсивность осадки плиты				
	(мм на 100 млн.т брутто)	1,33	3,67	4,00	1,00
3	Интенсивность осадки				
	переходных участков (мм на 100				
	млн.т брутто)	4,00	1,69	1,00	1,23
4	Максимальная осадка бетонной				
	плиты за период испытаний, мм	1,06	3,50	4,00	1,00
5	Длина участков с "выплесками"				
	из-под плиты, м	1,00	2,30	1,91	4,00
6	Трещины до 0,5 мм, шт				
		1,97	1,14	1,00	4,00
7	Трещины более 0,5 мм, шт				
		3,21	2,41	1,00	4,00
8	Прогиб верхнего бетонного слоя				
	под нагрузкой, мм	1,00	4,00	2,88	3,63
9	Числе замененных элементов				
	конструкции, шт	4,00	1,05	1,76	1,00
10	Трудозатраты на текущее				
	содержание за период	3,09	1,00	2,31	4,00
	испытаний, чел-ч. на 100 млн.т				
	брутто				

"Веса" критериев Наименование критерия арифметическое Эксперт 10 Эксперт 11 Эксперт 12 Эксперт 13 Эксперт 2 Эксперт 5 Эксперт 6 Эксперт 8 Эксперт 9 Эксперт 3 Эксперт 4 Эксперт 7 Эксперт 1 Среднее Геометрия колеи, балл (или 7,77 СССП) Интенсивность осадки плиты 8,23 (мм на 100 млн.т брутто) Интенсивность осадки переходных участков (мм на 8,00 100 млн.т брутто) Максимальная осадка 6,85 бетонной плиты за период испытаний, мм Длина участков с "выплесками" из-под плиты, 5,62 М Трещины до 0,5 мм, шт 3,77 Трещины более 0,5 мм, шт 6,23 Прогиб верхнего бетонного 4,62 слоя под нагрузкой, мм Числе замененных элементов 6,15 конструкции, шт Трудозатраты на текущее содержание за период 7,69 испытаний, чел-ч. на 100 млн.т брутто

Таблица 3.21 - Назначение "весов" выбранных критериев

	Наименование критерия	Личное место критерия с учетом его "веса"				
		LVT	MaxBögl	Alstom	Tines	
1	Геометрия колеи, балл (или	36,00	9,00	14,17	20,9	
	СССП)					
2	Интенсивность осадки плиты	9,33	25,67	28,00	7,00	
	(мм на 100 млн.т брутто)					
3	Интенсивность осадки	12,00	5,08	3,00	3,69	
	переходных участков (мм на					
	100 млн.т брутто)					
4	Максимальная осадка бетонной	7,44	24,50	28,00	7,00	
	плиты за период испытаний, мм					
5	Длина участков с "выплесками"	10,00	23,04	19,13	40,00	
	из-под плиты, м					
6	Трещины до 0,5 мм, шт	3,94	2,28	2,00	8,00	
7	Трещины более 0,5 мм, шт	9,62	7,24	3,00	12,00	
8	Прогиб верхнего бетонного	6,00	24,00	17,25	21,75	
	слоя под нагрузкой, мм					
9	Числе замененных элементов	24,00	6,31	10,58	6,00	
	конструкции, шт					
10	Трудозатраты на текущее	16,00	9,33	11,00	4,00	
	содержание за период					
	испытаний, чел-ч. на 100 млн.т					
	брутто					
	Результат	153,31	139,33	149,42	156,44	
	Итоговое место	3	1	2	4	

Таблица 3.22 - Личные места с учетом "весов" критериев

По результатам пропуска 600 млн. т брутто можно считать, что все опытные безбалластные конструкции выдержали испытания и соответствуют требованиям безопасности движения.

Сравнительная оценка четырех безбалластных конструкций с учетом весовых коэффициентов их многочисленных характеристик, полученная с учетом экспертной оценки членов секции «Путевое хозяйство» Научно-технического совета ОАО «РЖД» от 27 мая 2016 г. № 16 (Протокол утвержден Старшим вицепрезидентом ОАО "РЖД" В.А. Гапановичем 23 июня 2016 г.) показывает, что по совокупности характеристик условные места распределились следующим образом: 1 место – MaxBögl; 2 место – ALSTOM; 3 место – LVT; 4 место – Tines. Это распределение мест относится только к опытным участкам на Экспериментальном кольце, длина которых для полноценного анализа явно недостаточна. Следует отметить, что такая оценка является достаточно условной и в значительной степени зависит от того или иного набора экспертов, определяющих весовых коэффициенты. Кроме того, в данной оценке не учитывалась стоимость сооружения сравниваемых конструкций [137]. Окончательный выбор среди множества конструкций безбалластного пути должен осуществляться на основе продолжительности и стоимости жизненного цикла с учетом соответствующих коэффициентов дисконтирования, изложенных в главе 6.

Выводы по главе 3:

1. Анализ интенсивности осадок пути на щебеночном основании и интенсивности осадок безбалластного пути показывает, что осадка безбалластного пути происходит в 4,8 раза медленнее, за исключением переходных участков;

2. Фактор повышенной уплотненности земляного полотна на ЭК вследствие интенсивной стабилизации при высокой грузонапряженности можно не учитывать, так как основание БВСП сооружается с предварительной заменой грунта на глубину до 2 м;

3. Значения прогибов и напряжений в элементах БВСП, прежде всего в рельсе и бетонной несущей плите, которые экспериментально получены на ЭК при интенсивном движении с нагрузкой 235 кН на ось для всех типов БВСП

существенно ниже критических значений, что позволяет утверждать, что одной из сфер применения может быть и грузовое движение;

4. Проверена адекватность математической модели БВСП как многослойной балки, расхождения расчетных значений с экспериментальными составляют не более 18 %;

5. Экспериментально доказано, что предложенная автором оптоволоконная система диагностики земляного полотна позволяет отследить появление и измерить значение перемещений глубоко залегающих слоев, которые иными методами выявить и зафиксировать не представляется возможным;

6. С использованием метода экспертных оценок и определения весовых коэффициентов автором предложена методика выбора наилучшей конструкции безбалластного пути из ряда аналогичных конструкций, что дает возможность исключить из объема испытаний факторы с наименьшим "весом", а БВСП с наименьшим рейтингом можно исключить из числа конструкций, продолжающих испытаниям на действующей линии. Таким образом, можно рационально уменьшить объем и стоимость проведения испытаний БВСП;

7. В ходе испытаний выявлены существенные затраты на текущее содержание БВСП, несмотря на небольшую протяженность опытных участков. Это заставляет поставить под сомнение их основное преимущество - минимальные затраты на эксплуатацию БВСП. Данный факт требует уточнения стоимости жизненного цикла БВСП и корректировки сферы его применения.

4. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К БЕЗБАЛЛАСТНОМУ ПУТИ

Проведенный анализ отечественной и зарубежной нормативной документации показал, что в настоящее время нет единого документа, регламентирующего технические требования и методы испытаний безбалластных конструкций пути. В этих условиях технические требования к элементам безбалластного пути (скрепления, переходные участки, несущие слои, земляное полотно) формулируются автором на основе анализа мирового опыта, результатов расчетов и натурных испытаний.

4.1 Геометрические размеры бетонной плиты

Для удовлетворения требований по эксплуатационной пригодности конструкция должна иметь такие начальные характеристики, чтобы при различных воздействиях не происходило образование или чрезмерное раскрытие трещин, а также не возникали чрезмерные перемещения, колебания и другие повреждения, затрудняющие нормальную эксплуатацию.

Автором выполнены расчеты [278; 237], представленные в главе 2 диссертации, которые позволяют определить геометрические размеры несущих бетонных плит безбалластного пути при которых не происходит превышения допустимых напряжений в конструкции.

Расчеты бетонных и железобетонных конструкций проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 27751-2014 [279] по предельным состояниям, включающим:

- предельные состояния первой группы, приводящие к полной непригодности эксплуатации конструкций.

- предельные состояния второй группы, затрудняющие нормальную эксплуатацию конструкций или уменьшающие долговечность зданий и сооружений по сравнению с предусматриваемым сроком службы.

Для моделирования взят классический расчет пути на прочность, модернизированный для БВСП [278]. С помощью предложенного расчета

возможно найти оптимальные параметры ВСП. Данные параметры напрямую зависят от нагрузки, прикладываемой к конструкции.

Одним из методов компенсации избыточных напряжений является изменение толщины бетонной несущей плиты и ГСНС. Результаты расчета усилий в слое при изменении размеров бетонной несущей плиты от 180 мм до 350 мм представлены на Рисунке 4 [237].

Для увеличения прочности конструкции также возможно увеличивать ширину несущей плиты и слоя ГСНС. Результаты расчета максимальных растягивающих напряжений возникающих в БВСП при изменении ширины несущей плиты от 3200 до 3800 мм представлены в главе 2.

Для оценки влияния в Таблице 4.1 выведена удельная величина уменьшения значения напряжений на миллиметр приращения геометрического параметра для увеличения ширины плиты, ГСНС, и высоты плиты и ГСНС при заданной нагрузке.

Таблица 4.1 – Сводная таблица уменьшения напряжений в конструкции при изменении геометрических характеристики несущих слоев

Среднее уменьшение напряжений	maxσ1 [H/мм ²] при E2 =5000	maxσ1 [H/мм ²] при E2 =10000	тахσ2 [Н/мм ²] при E2 =5000	тахσ2 [Н/мм ²] при E2 =10000
Для увеличения толщины плиты	0,00232	0,00280	0,00146	0,00194
Для увеличения толщины ГСНС	0,00161	0,00073	0,00011	0,00061
Для увеличения ширины плиты	0,00020	0,00004	0,00000	0,00000
Для увеличения ширины ГСНС	0,00000	0,00000	0,00017	0,00026

Из таблицы 4.1 видно, что увеличение толщины несущих слоев безбалластного пути оказывает куда больший эффект на увеличения прочности конструкции, чем увеличение ширины несущих слоев.

Результаты расчета удовлетворительно корреспондируются с натурными измерениями напряжений в несущей бетонной плите различных БВСП, выполненных под руководством автора [216].

4.2 Переходные участки

4.2.1 Конструкции переходных участков

Переходные участки безбалластного пути во многом схожи с переходными участками на подходах к мостам и тоннелям [40; 140; 280; 281; 282]. Работа переходных участков на подходах к мостам и тоннелям исследовалась рядом отечественных ученых [283; 39; 40; 284; 23; 285; 286; 24; 25] и зарубежными специалистами [287; 88; 228; 100; 230; 229; 30].

Разработку конструкций переходного участка осуществляют с учетом обеспечения плавного изменения по длине упругих осадок пути под колесами и остаточных деформаций, возникающих в процессе длительной эксплуатации. При этом в качестве критерия изменения жесткости пути принимают [289]:

- силовой уклон по головке рельса |i_y|<0,5 ‰;
- приращение силового уклона по головке рельса $|\Delta i_v| < 0.2$ ‰;
- разность давлений на смежные опоры рельса $|\Delta Q| < 12$ кН.
- длина переходного участка не менее 25 м.

Автор диссертации обобщил конструктивные особенности и опыт эксплуатации переходных участков для подходов к ИССО и для безбалластного пути [215] в Таблице 4.2.

№	Схема	Схема Описание						
1	2	3						
	Переходные участки на подходах к мостам							
1	- Pena	К пути примыкает						
		многоступенчатый переход из						
	Annonononononononononononononon	железобетонных плит по типу						
	Шилы с Шилы т Шилы т учадочной обычной	БМП, первая плита имеет						
	- Hone and a subject and a sub	ширину 3,2 м, что						
		лимитируется типовыми						
		размерами балластной призмы						
		и основной площадки						
		земляного полотна. Далее путь						
		на балласте с такими же						
		плитами, но с уменьшенной						
		ширинои, к последнеи						
		примыкают стандартные ж/о						
		шпалы эпюра которых						
		30· 281· 2821						
2	House-must ensure the ensure of the mean sector of presences	Полбалластные безлонные						
2	and the flat flat flat flat flat flat	железобетонные короба						
		заполненные шебнем.						
		имеющие постепенное						
	Dymes	увеличение глубины						
	Pass	заложения и объема каждого						
		из последующих коробов по						
		мере приближения к заднему						
	Phone prevails program type an importance provider A.A. E.E.	устою моста [281; 282; 215]						
	83 mm103 1000							
	19 Mar 19							
3		Послойная укладка геосеток,						
		разделяющих слои насыпи,						
		отсыпанные щебнем. Пять						
		слоев геосеток, уложенных в						
		щебеночный балласт на						
		разной глубине залегания с						
		определенной						
		периодичностью с						
		максимальным количеством						
		слосв у заднего устоя моста [283-215]						
		[203, 213]						

Таблица 4.2 - Конструкции переходных участков

Продолжение Таблицы 4.2



Продолжение Таблицы 4.2

1	2	3
7		Аlstom Имеет выступающую в продольном сечении нижнюю часть несущей бетонной плиты с ГСНС. Плита 25000 мм с подпорными стенами 10390 мм, примыкающими к основной конструкции и приклеенным резиновым матом, проклеенные подошвы челночных шпал 42 шт. для контррельсов
8		МахВögl Выступающая в продольном сечении нижняя несущая бетонная плита с ГСНС, на которую уложена балластная призма. Балласт на этом участке может быть склеен полимерным составом. На участке, прилегающем к безбалластному пути, щебеночная призма проклеена полностью, затем следует участок, на котором проклеена нижняя постель шпалы и шпальные ящики
9		Tines Выступающая в продольном сечении несущая бетонная плита с ГСНС, на которую уложена балластная призма.
10	Система BSP-FF-B1 с SkI SL1, бетон	Специализированные рельсовые скрепления для переходных участков, позволяющие в широком диапазоне изменять упругие свойства за счет конструктивных особенностей, толщины и жесткости прокладок [280]

4.2.2 Устойчивость бесстыкового пути на переходных участках

По мнению автора [291; 292], бесстыковой путь на безбалластном бетонном основании представляется достаточно устойчивым, так как у рельсошпальной решетки нет возможности вертикального и горизонтального перемещения. Рельсы крепятся к подрельсовому основанию, которое не имеет возможности смещаться в поперечном или продольном направлении.

Вопросам устойчивости бесстыкового пути, способам ее повышения и диагностике напряженного состояния рельсовых плетей автором уделено внимание в ряде работ [293; 294; 295; 296; 297; 298; 299; 300].

Участок подхода обычного пути на балласте к безбалластной конструкции представляет потенциальную опасность по нескольким причинам.

Во-первых, участок пути на БВСП представляет собой некий упор или барьер для продольного перемещения плетей, так как нет продольных перемещений шпал в балласте, и плети более надежно закреплены в узлах рельсовых скреплений. Таким образом, перед БВСП создается повышенный напряжений, которые уровень продольных не имеют возможности перераспределиться вдоль плети. Эта ситуация наиболее опасна, когда дополнительные сжимающие напряжения создает тормозящий поезд на подходе к БВСП.

Во-вторых, нет поперечных перемещений плетей. При обычной рельсошпальной решетке путь имеет возможность смещаться наружу "саморазрядку" криволинейного участка пути, производя таким образом температурных напряжений, а плети на БВСП такой возможности не имеют.

В-третьих, переходный участок обычно имеет повышенное расстройство балластного слоя из-за различий в жесткости бетонного и щебеночного основания. Всегда имеется просадка на первых 3 – 5 шпалах и, как следствие, провисание шпал.

Эти факторы существенно снижают сопротивление рельсошпальной решетки сдвигу поперек оси пути.

В этом случае кроме типовых приемов контроля напряженного состояния пути [301; 302; 303; 50], предложенных автором и приведенных в Приложении И, необходимо принять дополнительные конструктивные меры для повышения устойчивости бесстыкового пути.

Для обеспечения безопасности движения поездов на переходных участках необходимо определить, насколько может быть ослаблено состояние пути на переходном участке, чтобы не возникла опасность выброса бесстыкового пути. Кроме того, следует рассчитать то, как влияет на устойчивость пути длина дополнительных элементов внутри колеи в виде челнока из уголка или дополнительных рельсов. На Рисунке 4.1 представлена схема к расчету устойчивости бесстыкового пути на переходном участке с глухой заделкой рельсовых плетей на одном конце.

Длина переходных участков между БВСП и путем на балласте определяется из соображений плавного изменения жесткости и обеспечения устойчивости бесстыкового пути. Решение этих задач проведено автором в среде конечноэлементного моделирования Femap & NX Nastran [292] с помощью модели бесстыкового пути [50; 51]. В качестве исходных данных выбран участок пути длиной 200 м, одна половина которого расположена на безбалластной конструкции пути, другая – на щебеночном балласте.

На Рисунке 4.1 представлена схема к расчету устойчивости бесстыкового пути на переходном участке.

На Рисунке 4.2 представлена схема размещения дополнительных рельсов внутри колеи.

На Рисунке 4.3 представлена расчетная зависимость сопротивления поперечному сдвигу от длины двух дополнительных рельсов внутри колеи при наибольшей длине участка с провисшими шпалами. Видно, что при изменении длины дополнительных рельсов с 2 до 10 м поперечное перемещение (критическая температура) существенно снижается, а при увеличении длины дополнительных рельсов более 10 метров поперечное перемещение (критическая температура) не изменяется.



N - продольная температурная сила;

N' - дополнительная силы от торможения поезда;

f(r) - сопротивление продольному перемещению рельса;

f(h) - сопротивление поперечному перемещению рельсошпальной решетки;

 $f(\phi)$ - сопротивление повороту рельса относительно шпалы

Рисунок 4.1 Схема к расчету устойчивости бесстыкового пути на переходном участке



Рисунок 4.2 Схема размещения дополнительных рельсов внутри колеи



Рисунок 4.3 Зависимость поперечного перемещения рельсовых плетей от длины дополнительных рельсов внутри колеи

Таким образом, расчетом получено что, оптимальная длина дополнительных рельсов внутри колеи на переходном участке пути должна быть не менее 10 м при типовом очертании балластной призмы.

Специалистами ряда компаний-производителей БВСП для расчета длины переходного участка предлагается "правило полусекунды". Длина переходного участка должна равняться расстоянию, которое проходит поезд с заданной скоростью за полсекунды. Для скорости 80 км/ч длина переходного участка составит 11 м, а для 250 км/ч – 35 м. При этом для случая использования дополнительных рельсов внутри колеи 1/4 их длины располагается на БВСП, а 3/4 на балластном пути [215].

4.3 Рельсовые скрепления

Автором диссертации проанализирована отечественная [304; 305; 306] и зарубежная [307; 308] нормативная база в области рельсовых скреплений. Обобщен опыт укладки, эксплуатации и испытаний скреплений для балластного [309; 310; 311; 312; 313] и безбалластного пути [314; 193; 315].

Характеристики рельсовых скреплений безбалластных конструкций пути испытанных на Экспериментальном кольце приведены в Приложении А.

Анализ показал, что применяемые в ОАО «РЖД», скрепления по ГОСТ 32698-2014 [304] могут соответствовать требованиям европейского стандарта EN 13481-2:2012 [307] для железнодорожных линий со смешанным движением и повышенными осевыми нагрузками. Результаты анализа в виде сравнительной таблицы представлены в Приложении К.

Отечественными нормативными документами не предусмотрено отдельных требований к скреплениям для безбалластного пути.

Европейскими нормами DIN EN 13481-5:2012-08 "Крепежные системы для безбалластного пути с рельсом на поверхности или рельсом, встроенным в канал" [308] регламентируются следующие характеристики рельсовых скреплений для БВСП для соответствующих условий эксплуатации в соответствие с Таблицей 4.3.

Категория	Максимальная	Минимальный радиус		
	расчетная осевая	кривизны,		
	нагрузка,	Μ		
	кН			
А	130	40		
В	180	80		
С	260	150		
D	260	400		

Таблица 4.3 - Критерии для категорий скрепления

Для дискретных систем скрепления сопротивление сдвига в продольном направлении должно составлять не менее 7 кН. Для использования в путях категории D (> 250 км/ч) сопротивление сдвига в продольном направлении должно быть не менее 9 кН.

Статическая жесткость узла и динамическая жесткость узла в диапазоне низких частот должны измеряться в соответствии с EN 13146-9.

Испытательные нагрузки приведены в Таблице 4.4,

где *F*LFA1 - минимальное усилие, приложенное при измерении динамической жесткости в диапазоне низких частот, кН;

*F*LFAmax - опорное усилие при измерении динамической жесткости в диапазоне низких частот, кН;

*F*LFP1 - расчетная теоретическая сила зажима для измерения динамической жесткости прокладки в диапазоне низких частот, кН;

*F*LFPmax - опорное усилие, применяемое для измерения динамической жесткости прокладки в диапазоне низких частот, кН;

*F*max - осевая нагрузка, при которой возникает значительное скольжение при испытании сопротивления сдвига в продольном направлении (EN 13146-1:2012), кH;

*F*SA1 - минимальное усилие, приложенное при измерении статической жесткости узла, кН;

FSAmax - усилие, приложенное к узлу при измерении статической жесткости узла, кН;

FSP1 - расчетная теоретическая сила зажима для измерения статической жесткости прокладки, кН;

FSPmax - усилие, приложенное к прокладке при измерении статической жесткости прокладки, кН.

Категория	FSP1 и FLFP,	FSPmax и	FSA1 и	FSAmax и
скрепления	кН	FLFPmax,	FLFA1,	FLFAmax,
		кН	κН	κН
А	16	51	1	32
В	18	64	1	43
С	18	85	1	64
D	18	85	1	64

Таблица 4.4 - Нагружения для измерения жесткости

Электрическая изоляция системы скрепления должно быть не менее 5 кОм. Учитывается предположение рельса в узле скрепления при максимальных допусках на всех составных частях системы скрепления. Не включаются допуски, возникающие из-за расположения крепежных компонентов в плите или из-за расположения опорных плит. Изменение ширины колеи, рассчитанное таким образом, не должно превышать ±1 мм.

Эксплуатационное испытание должно проводиться с использованием не менее 500 шпал или 200 шпал (т.е. 300 м или 150 м) для категорий путей А и В.

Минимальный срок испытания должен составлять не менее 1 года.

Для систем скрепления категории А и В 10 млн. т брутто

Для систем скрепления категории C, D и E 20 млн. т брутто

В сравнительной Таблице 4.5 представлены характеристики рельсовых скреплений для БВСП на Экспериментальном кольце [314].

	W 30 HH	SBS W	Пандрол-	System 301	System	SFC
		SL 1-900-	350		DFF 301	
		R65				
Статическая	~350	~100	~145	~110	~110	~40
жесткость,						
кН/мм						
Крутящий	300-350	300-350	-	300-350	300-350	-
момент затяжки						
шурупа/болта						
упругой						
клеммы, Нм						
Усталостная	2,2	3,6	1,8	2,2	2,2	1,8
прочность						
клеммы (fatigue						
strength), мм						
Изменение	<20	<10	<7	<20	<20	<10
нормативного						
монтажного						
прижатия, %						
Усилие	≥20	≥25	≥25	≥18	≥18	≥22,5
прижатия в узле						
скрепления (кН)						

Таблица 4.5 - Характеристики узлов скрепления для БВСП

Результаты испытаний рельсовых скреплений для безбалластного пути на Экспериментальном кольце, изложенные в главе 2, позволяют утверждать, что требования европейских норм DIN EN 13481-5:2012-08 "Крепежные системы для

безбалластного пути с рельсом на поверхности или рельсом, встроенным в канал" [308] могут быть распространены для условий Российских железных дорог.

4.4 Несущие слои и земляное полотно

Глубина земляного полотна, требующая специальной подготовки составляет 1,5–2 м. При этом геологические изыскания целесообразно проводить каждые 50 м на глубину до 6 м. Несущие слои представляют собой следующую комбинацию: бетонный или асфальтобетонный несущий слой, гидравлически связанный слой, морозозащитный слой, слой укрепленного естественного грунта.

Основное требование БВСП к земляному полотну это постепенное увеличение модуля деформации от нижних слоев к верхним $E_1 > E_2 > E_3$.

Рассмотрим каждый из слоев отдельно.

4.4.1 Бетонный несущий слой

В соответствии с зарубежными документами [316; 135] к бетонному слою предъявляются следующие требования. По профилю поверхности бетонных несущих слоев требуется допуск ± 2 мм. Качество должно соответствовать классу бетона B35 с высокой морозостойкостью. Содержание цемента в бетоне составляет от 350 до 370 кг/м³. Доля арматуры для ограничения образования трещин должна быть 0,8–0,9 % поперечного сечения бетона. Это должно обеспечить ограничение величины раскрытия поверхностных трещин до 0,5 мм. Типовая толщина слоя составляет 200 мм. При использовании бесшпальной конструкции стремятся к достижению контролированного образования трещин приблизительно каждые 2 м, для чего надрезают поверхность. Бетонный несущий слой разрешается подвергать нагрузке только по окончании процесса твердения, обеспечивающего минимальную прочность при сжатии более 12 H/мм². Увеличение толщины бетонного слоя приводит к повышению изгибающих напряжений. Толщина слоя должна быть не менее 18 см.

4.4.2 Асфальтобетонный несущий слой

Асфальтобетонные несущие слои устраиваются слоями стандартной толщиной 300 мм. На поверхности требуется точность укладки ±2 мм. Эти требования существенно выше требований, предъявляемых при строительстве автомобильных дорог. Движение по асфальтобетонному несущему слою разрешается, когда собственная температура асфальтобетона ниже 50° С. Асфальтобетон чувствителен к ультрафиолетовому свету, поэтому поверхность необходимо покрыть гравием, щебнем или подобным материалом [316; 135].

4.4.3 Гидравлически связанный несущий слой

Под бетонным или асфальтобетонным слоем устанавливается так называемый гидравлически связанный несущий слой [316; 135]. Типовая толщина этого слоя составляет не менее 300 мм. Гидравлически связанным несущим слоем называют смесь из минеральных веществ (естественных песков, дробленых песков и гравия) ступенчатого гранулометрического состава (максимальная фракция 32 мм), которая укрепляется гидравлическим вяжущим. В качестве связующего вещества применяют портландцементы. Содержание вяжущего составляет приблизительно 110 кг/м³.

Анализ Ril 836 [317] и ТВ 10621-2009/Ј 971-2009 [318] показывает, что при устройстве безбалластного верхнего строения пути с гидравлически связанным слоем (ГСНС) минимальная его толщина составляет 40 см.

Ширина гидравлически связанного слоя должна быть не менее 3,8 м.

Гидравлически связанный несущий слой служит для постепенного выравнивания увеличивающейся снизу вверх жесткости и, тем самым, повышает несущую способность системы в целом. Гидравлически связанный несущий слой рассчитывается так, чтобы на поверхности самого верхнего несвязного несущего слоя (морозозащитного слоя) достигался модуль деформации второй ступени нагружения $E_{v2} \ge 120 \text{ H/mm}^2$.

4.4.4 Морозозащитный слой

Морозозащитный слой также служит для выравнивания разностей по деформативным характеристикам отдельных слоев в направлении к основанию и защиты от морозного пучения. Он может состоять из гравелистого песка, стойкого к выветриванию и циклам замораживания-оттаивания. В силу наличия капилляропрерывающего эффекта задачей морозозащитного слоя является предотвращение поднятия воды из основания. Кроме того, он осуществляет дренирование конструкции.

Анализ Ril 836 [317] и ТВ 10621-2009/Ј 971-2009 [321] показывает, что толщина морозозащитного слоя варьируется от 1,8 м до 2,3 м. Его величина также устанавливается из условия промерзания грунтов, но не менее значений приведенных в документах [317; 318]. В зарубежной документации [316; 35] приводится, что в этой связи требуются значения коэффициента фильтрации от $1\cdot10^{-5}$ м/с до $1\cdot10^{-4}$ м/с. Для новых линий требуется модуль деформации второй ступени нагружения $E_{v2} \ge 120$ H/мм², а на реконструируемых – $E_{v2} \ge 100$ H/мм².

4.4.5 Грунтовое основание

На поверхности основания новых линий требуется модуль деформации второй ступени нагружения $E_{v2} \ge 60$ H/мм², а у реконструируемых – $E_{v2} \ge 45$ H/мм² [316; 135]. Такие показатели несущей способности достигаются путем проведения мероприятий по уплотнению основания, стабилизации грунта при помощи извести, цемента или иных химических добавок.

На Экспериментальном кольце несущие слои были реализованы следующим образом. Грунтовое основание – это слой утрамбованного песка или слой химически укрепленного естественного грунта. Морозозащитный слой - это щебеночно-песчано-гравийная смесь. Гидравлически связанный слой - это слой тощего бетона.

Для безбалластных конструкций пути Rheda и LVT, в основании которых из условия недопущения морозного пучения устроены подушки из дренирующего грунта с продольными сопряжениями, в различных сочетаниях были уложены слои геомембран, георешеток и нетканого материала.

Для достижения указанных параметров в процессе строительства возникала необходимость в увеличении работ по виброуплотнению слоев в 2–2,5 раза по сравнению с планом производства работ [226].

Существенный вклад в изучение подплитного основания для безбалластного пути внес А.А. Сидоренко (ПГУПС) [160]. Он дал анализ зарубежной нормативной документации в виде Таблицы 4.6 и обосновал параметры защитных слоев, представленные в Таблице 4.7.

Таблица 4.6 - Нормы уплотнения грунтов земляного полотна для ВСМ для безбалластной конструкции верхнего строения пути

Наименование	Значение показателей				
стандарта	Коэффициент	Коэффициент	E_{V2}	E_{V2}/E_{V1}	E _{Vd}
	уплотнения	уплотнения по			
		Проктору	МПа	МПа	МПа
	Верхний защитн	ный слой			
UIC 719R (МСЖД) [319]	-	1.00-1,03	>120	<2,2	-
Ril 836.0501 (Германия) [320]	-	1,00	120	-	50
ТВ 10621- 2009/Ј 971- 2009 (Китай)	> 0.97		>120	<2,3	_
[321]					
	Нижний защитн	ный слой			
UIC 719R (МСЖД)	-	>1,00	>80	<2,2	-
Ril 836.0501 (Германия)	-	1,00	60	-	35
ТВ 10621- 2009/Ј 971- 2009 (Китай)	> 0,95		>80	<2,5	>40
	Тело насы	ПИ			
UIC 719R (МСЖД)	-	>0,95	>45 *	<2,2	-
			<u>>60</u>		
Ril 836.0501 (Германия)		0,97-1,00 (**)	-	-	-
ТВ 10621- 2009/Ј 971- 2009 (Китай)	>0,92		>45	<2,6	-

* числитель - пылеватые грунты, глина, знаменатель - пески, гравий;

**значение колеблется в зависимости от применяемых грунтов (для

дренирующих грунтов принято 1,00)

Таблица 4.7 - Требования к подплитному основанию при монолитной безбалластной конструкции верхнего строения пути

Наименование	Материалы слоя	Толи	Толщина слоёв			Модуль упругости
		подп	литно	ГО		грунтов, лежащих
		осно	вания	, M		ниже 2-ого
		1		2		защитного слоя
		1	2	3	4	(Еупр.осн.), МПа
Первый защитный	ЩПГС	0,3	0,4	0,5	0,6	
слой						
<i>Е<u>упр.</u>≥</i> 280 МПа						
Второй วอบบสาบบนั	Крупнообломочный	2,8	2,3	1,9	1,5	40
спой	грунт,					
$F_{\rm VM_{P}} > 120 \rm MHa$	Песок гравелистый,	2,5	2,1	1,6	1,3	60
$Eynp. \leq 120$ Willia	Песок крупный,					
	Песок средней	2.2	1.0	1.0	0.6	00
	крупности.	2,3	1,8	1,3	0,6	80

На Рисунке 4.4 представлена толщина слоев безбалластного пути различных конструкций [163].





Условные обозначения:

FSS - морозозащитный слой

НGТ - гидравлически связанный слой (ГСНС)

ATS - асфальтобетонный слой

BTS - бетонный слой

PSS - защитный слой между грунтом и щебнем

Schotter - щебень

Рисунок 4.4 Толщина слоев безбалластного пути

4.5 Электросопротивление

Переходное сопротивление "рельс-земля" участка безбалластного пути на Экспериментальном пути составляет 11 Ом [·] км, для сравнения переходное сопротивление на обычном пути составляет 9 Ом [·] км. Протокол замеров переходного сопротивления представлен в Приложении Л.

4.6 Срок службы

Срок службы безбалластного пути не нормируется. Большинство производителей заявляют срок службы 60 лет. Первые безбалластные конструкции Rheda и Shinkansen эксплуатируются с 1972 г. то есть 44 года.

На Экспериментальном кольце конструкция LVT, уложенная в 2011 г. пропустила 1,3 млрд. т брутто. При грузонапряженности 25 млн. т брутто ориентировочный срок службы может составить 52 года, что является весьма условным значением.

Подтвердить или опровергнуть такой показатель как срок службы представляется крайне затруднительным. Простой пересчет пропущенного тоннажа на Экспериментальном кольце в тоннаж для реальных условий эксплуатации некорректен, так как кроме воздействия подвижного состава на путь существенное влияние оказывает смена времен года и ряд других факторов.

Выводы по главе 4:

1. Анализ зарубежной нормативной документации по безбалластному пути показал, что единых и однозначных требований к его элементам не существует. Отечественные требования к безбалластным конструкциям пути в настоящее время отсутствуют.

2. Расчетным путем получены геометрические размеры бетонной несущей плиты, при которых напряжения в ней не превосходят допустимых значений для строительных бетонных конструкций.
3. Автором диссертации разработана методика расчета длины дополнительных рельсов внутри колеи для обеспечения устойчивости бесстыкового пути против выброса в пределах переходных участков.

4. Экспериментально подтверждено, что европейские требования к рельсовым скреплениям для безбалластного пути могут применяться для условий Российских железных дорог.

5. Конструкция и технические требования для подплитных слоев безбалластного пути индивидуальны для каждой конструкции. Экспериментально подтверждено, что конструктивное исполнение, геометрические размеры, и физико-механические свойства гидравлически связанного и морозозащитного слоев испытанных безбалластных конструкций отвечают отечественным условиям эксплуатации.

6. Исходя из повреждаемости элементов БВСП и интенсивности осадки (3 глава) можно сформулировать следующие рекомендации по конструктивному исполнению:

- целесообразно наличие полимерного демпфирующего слоя на стыке бетонной плиты и ГСНС для исключения попадания воды в зазор при изгибе плиты;

переходные участки необходимо оборудовать дополнительными рельсами
 в середине колеи для плавного изменения вертикальной жесткости и увеличения
 устойчивости против температурного выброса в поперечной плоскости, а так же
 целесообразно применение на переходном участке шпал с обрезиненными
 подошвами;

- потенциально опасные участки основания земляного полотна под БВСП необходимо оборудовать волоконно-оптической системой мониторинга для измерения перемещений слоев грунта;

- нецелесообразно применение омоноличивания балласта на переходных участках.

7. Результаты испытаний на Экспериментальном кольце в условиях интенсивного грузового движения не в полной мере дают представление о

долговечности безбалластной конструкции пути в реальных условиях эксплуатации. Обоснована необходимость разработки метода, позволяющего определить срок службы совершенно новой конструкции пути в условиях, которые еще не созданы.

5. МЕТОДОЛОГИЯ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ СООТВЕТСТВИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ ТРЕБОВАНИЯМ

5.1 Поэлементная структура подтверждения соответствия заданным техническим требованиям

Как было описано в 1 главе, безбалластная конструкция пути в общем случае состоит из рельсов, рельсовых скреплений, бетонной несущей плиты, гидравлически связанного слоя, морозозащитного слоя и грунтового основания. Требования к каждому элементу конструкции (кроме рельсов) для Российских сформулированы 4 условий эксплуатации автором В главе. Методы подтверждения соответствия заданным требованиям имеются только по рельсам и рельсовым скреплениям в форме обязательной сертификации на соответствие ГОСТам. По стандартизованным методикам проводятся соответствующие лабораторные и полигонные испытания. В Таблице 5.1 представлена структура и последовательность испытаний. По остальным элементам безбалластного пути методы подтверждения соответствия отсутствуют. ГОСТ 33477-2015 [322] и ГОСТ Р 27.403-2009 [323] не в полной мере отвечают на вопросы о продолжительности и объеме испытаний безбалластного пути.

Наиболее сложным представляется процесс полигонных испытаний безбалластной конструкции пути в целом, так как ее изготовление требует существенных затрет времени и средств.

Процедура испытаний:

Сертификационные испытания на соответствие требованиям Технических регламентов – в результате этих испытаний не устанавливается скорость. Проверяются только минимальные требования безопасности. Как правило, это лабораторные испытания продолжительностью до 2 месяцев (кроме рельсов и стыков). Только по рельсам и рельсовым стыкам предусмотрены обязательные сертификационные испытания на Экспериментальном кольце.

Таблица 5.1 - Процедура испытаний элементов верхнего строения пути для

высокоскоростного движения

Наименование	Испытания без уста	Испытания для			
элемента верхнего	ДВИЖ	определения			
строения пути		допустимой скорости			
			движения		
	Сертификационные	Полигонные на	Эксплуатационные		
	на соответствие	Экспериментальном	на линии с		
	требованиям	кольце	пошаговым		
	Технических	(FOCT)	повышением		
	регламентов (ГОСТ)		скорости		
Рельс	+	+	-		
Шпала	+	-	-		
Стрелочный брус	+	•	-		
Узел скрепления и	+	-	-		
его элементы					
Стык изолирующий	+	+	-		
Щебень	+	-	-		
Безбалластное	-	+	-		
основание					
Стрелочный	+	-	-		
перевод и его					
элементы					
Путь в целом	-	-	+		

Испытания на Экспериментальном кольце в большинстве случаев необходимы для определения ресурса того или иного элемента пути.

Обязательные сертификационные испытания на Экспериментальном кольце предусмотрены по рельсам и рельсовым стыкам, безбалластный путь испытывается по требованию заказчика или на добровольной основе по инициативе разработчика (изготовителя).

Полигонные испытания проводятся при скорости до 80 км/ч. По ним не определяется максимально возможная скорость. По ним определяется ресурс.

Эксплуатационные испытания на действующей линии проводятся для определения условий взаимодействия подвижного состава и пути в реальных условиях эксплуатации при пошаговом повышении скоростей.

В дальнейшем происходит подконтрольная эксплуатация опытного участка.

Натурные испытания безбалластного пути крайне затруднены из-за высокой стоимости его строительства и организации реальных режимов движения.

Предлагаемая автором методология позволяет прогнозировать состояние безбалластной конструкции пути в части пропущенного тоннажа (срока службы) и трудозатрат на текущее содержание. Это удается сделать благодаря применению комбинированного метода [324; 325], сочетающего натурные испытания и математическое моделирование.

Методология испытаний с применением комбинированного метода [326] позволяет оценивать соответствие БВСП заданным техническим требованиям в условиях отсутствия реальных условий эксплуатации. Противоречие состоит в том, что для строительства БВСП необходимы его испытания в реальных условиях (при высокой скорости (до 400 км/ч) и небольшой осевой нагрузке (150-180 κН). а для строительства, соответственно, нужны испытания. Экспериментальное кольцо дает возможность провести испытания при высокой осевой нагрузке (до 250 кН) но невысокой скорости (80 км/ч), что не в полной мере отвечает реальным сферам применения БВСП.

Для разрешения этого противоречия автором предложено применить методологию прогнозирования ресурса БВСП в реальных сферах эксплуатации основываясь на результатах испытаний на Экспериментальном кольце с применением математического моделирования.

Еще ОДНИМ аспектом методологии является оптимизация объемов сравнительных испытаний на закрытом полигоне путем исключения малозначимых критериев (факторов) БВСП из объемов работ. Значимость фактора или его "вес" определяется методом экспертных оценок. Этот аспект рассмотрен в разделе 3.4 настоящей диссертации. По результатам испытаний на закрытом полигоне по рейтингу БВСП с учетом всех оставшихся факторов и их веса принимается решение о продолжении испытаний на действующей линии.

Результаты испытаний, получаемые на Экспериментальном кольце АО "ВНИИЖТ", не в полной мере соответствуют результатам, полученным на действующей линии при том же пропущенном тоннаже. Это связано с рядом факторов:

- колеса подвижного состава и рельсы прикатаны друг к другу;

- осмотр колес и дефектоскопия рельсов на ЭК осуществляются более пристально, чем на линии;

- в опытном составе нет вагонов с дефектами;

- кольцевой путь эксплуатируется с лубрикацией рельсов;

- земляное полотно стабилизировано огромным пропущенным тоннажем (300 млн. т брутто в год);

- на единицу пропущенного тоннажа приходится меньшее число переходов зима/лето.

По этим причинам необходим механизм определения срока службы конструкции по результатам испытаний на Экспериментальном кольце с учетом первого и второго предельного состояния. Иными словами, требуется найти способ прогнозирования поведения той или иной конструкции пути в реальных условиях эксплуатации на линии по результатам испытаний на Экспериментальном кольце с учетом напряженного состояния и интенсивности осадки пути.

5.2 Прогнозирование срока службы в конкретных условиях эксплуатации по первому предельному состоянию

Во второй главе в разделе 2.3 описан алгоритм расчета прогибов и напряжений слоев БВСП, который можно использовать для прогнозирования срока службы конструкции [257].

безбалластной Долговечность конструкции ПУТИ определяется интенсивностью повреждаемости второго который обеспечивает слоя, стабильность геометрии рельсовой колеи. Она зависит от среднего квадрата напряжений растяжения в подрельсовой зоне нижней грани этого слоя при прохождении осей подвижного состава. Представляется целесообразным за меру повреждаемости второго слоя безбалластной конструкции пути в одном цикле нагружения (при проходе одной оси экипажа) принять величину

$$\mu = \langle \sigma_2^2 \rangle^{\mathrm{K}},\tag{5.1}$$

где $\langle \sigma_2^2 \rangle$ – средний квадрат напряжений растяжения в подрельсовой зоне нижней грани второго слоя рассматриваемой безбалластной конструкции пути в момент прохода через заданное сечение пути оси экипажа.

Показатель степени K в первом приближении можно принять равным $K = 2 \div 3$.

При проходе поездов через заданное сечение рассматриваемого участка пути под осями экипажа в этом сечении создаются растягивающие напряжения в нижней грани второго слоя конструкции пути со следующими статистическими характеристиками:

$$\langle \sigma_2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \langle \sigma_{2i} \rangle,$$
 (5.2)

$$\sigma_{\sigma_2}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \sigma_{\sigma_{2i}}^2 , \qquad (5.3)$$

где *i* – номер экипажа, проходящего через заданное сечение пути;

 $\langle \sigma_{2i} \rangle$ – среднее значение напряжений растяжения в нижней грани второго слоя рассматриваемой безбалластной конструкции пути, возникающих при проходе через заданное сечение рассматриваемого участка пути *i*-ой оси всей совокупности экипажей;

 $\sigma_{\sigma_{2i}}$ – среднеквадратическое отклонение напряжений растяжения в нижней грани второго слоя конструкции пути от его среднего значения (σ_{2i});

N - общее количество осей экипажей, проходящих через заданное сечение рассматриваемого участка пути в течение суток.

Средний квадрат напряжений растяжения в подрельсовой зоне нижней грани второго слоя рассматриваемой безбалластной конструкции составляет величину

$$\langle \sigma_2^2 \rangle = \langle \sigma_2 \rangle^2 + \sigma_{\sigma_2}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\langle \sigma_{2i} \rangle^2 + \sigma_{\sigma_{2i}}^2 \right] \alpha_i, \qquad (5.4)$$

где *α_i* – доля экипажей группы *i* в общем многообразии экипажей, обращающихся на участке.

Подставляя выражение (5.4) в (5.1) получим формулу, определяющую меру повреждения безбалластной конструкции пути при проходе одной оси во всем многообразии экипажей, обращающихся на участке

$$\mu = \left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \left[\langle \sigma_{2i} \rangle^2 + \sigma_{\sigma_{2i}}^2 \right] \alpha_i\right)^{\mathrm{K}}.$$
(5.5)

Изложенный метод оценки меры повреждаемости безбалластной конструкции пути можно использовать для «переноса» результатов наблюдений за сроком службы безбалластной конструкции пути на опытном участке на любой другой участок БВСП с учетом соотношения пропущенных осей при расчетной и экспериментальной повреждаемости бетонной несущей плиты (второго слоя).

Действительно, если через *n* обозначить число осей, которое можно пропустить по участку до исчерпания ресурса долговечности второго слоя безбалластной конструкции пути *G*, можно записать

$$n_1\mu_1 = n_0\mu_0 = G = const, (5.6)$$

где n_1 – число осей, которое можно пропустить по участку 1 до исчерпания ресурса долговечности безбалластной конструкции пути на этом участке;

- µ₁ мера повреждаемости второго слоя безбалластной конструкции пути, лежащей на участке 1, при проходе всего многообразия экипажей, обращающихся на этом участке;
- n_0 число осей, пропущенных по опытному участку до исчерпания ресурса G;
- µ₀ мера повреждаемости второго слоя безбалластной конструкции пути в одном цикле нагружения при проходе по опытному участку всего многообразия экипажей, обращающихся по нему.

Учитывая, что

$$n_1 = \frac{T_1}{\langle P_1 \rangle}; \qquad n_0 = \frac{T_0}{\langle P_0 \rangle}, \qquad (5.7)$$

где T_1 – тоннаж брутто, который можно пропустить по участку 1 до исчерпания ресурса долговечности безбалластной конструкции пути, лежащей на

этом участке; T_0 – тоннаж брутто, пропущенный на опытном участке до исчерпания ресурса долговечности G; $\langle P_1 \rangle$ – средняя осевая нагрузка на участке 1; $\langle P_0 \rangle$ – средняя осевая нагрузка на опытном участке, получим выражение, определяющее размеры тоннажа брутто, который можно пропустить по участку 1.

$$T_1 = T_0 \frac{\mu_0 \langle P_1 \rangle}{\mu_1 \langle P_0 \rangle} \cdot K_t .$$
(5.8)

В выражении (5.8) введен коэффициент K_t , учитывающий снижение долговечности безбалластной конструкции пути за счет увеличения расстройств пути в период оттаивания весной и замерзания осенью. Коэффициент K_t может быть определен из соотношения

$$K_t = 0.13 \frac{\gamma_1}{\gamma_0},$$
 (5.9)

где γ_1 — число переходов оттаивания/замерзания на 100 млн т брутто на участке 1;

 γ_0 — число переходов оттаивания/замерзания на 100 млн т брутто на опытном участке.

Величину $\frac{\gamma_1}{\gamma_0}$ можно принять как отношение грузонапряженностей на участках 1 и 0 соответственно.

Коэффициент К $_t$ получен на основании анализа интенсивности осадки пути и трудозатрат на его текущее содержание на Экспериментальном кольце.

Формула (5.8) позволяет вычислить тоннаж брутто, который можно пропустить по определенному участку с заданными характеристиками, если известен тоннаж брутто, пропущенный на опытном участке до исчерпания ресурса долговечности второго слоя безбалластной конструкции пути, лежащей на этом участке.

Как следует из формулы (5.8), определяющим в решении задачи является отношение параметров μ_0 , μ_1 и $\langle P_0 \rangle$, $\langle P_1 \rangle$ в сжатом виде характеризующих условия эксплуатации опытного и заданного участков. При вычислении величин μ_0 и μ_1 по формуле (5.5) следует воспользоваться выражениями (2.3.8), (2.3.9) и (2.3.10) при *i* = 2.

Компоненты матрицы взаимных спектральных плотностей вертикальных сил $S_Q(\omega)$, входящей множителем в выражение (2.3.10), определены по программе «Воздействие экипажа на путь при пространственных колебаниях подвижного состава» [327], которая использует прямые методы теории случайных процессов для оценки средних значений и взаимных спектральных плотностей сил взаимодействия пути и подвижного состава.

Методы определения параметров распределенного демпфирования *f* и распределенной массы *m* для любой конструкции пути, в том числе безбалластной, изложены в [44].

Таким образом, можно прогнозировать поведение той или иной конструкции пути в реальных условиях эксплуатации на линии по результатам испытаний на Экспериментальном кольце.

5.3 Прогнозирование срока службы в конкретных условиях эксплуатации по второму предельному состоянию

Испытания на Экспериментальном кольце показали, что потеря работоспособности БВСП наступает в ряде случаев не по первому, а по второму предельному состоянию. Осадка пути превышает 15 мм. Неравномерность осадок вызывает уклоны неровностей, превышающие допустимые значения 0,25 °/₀₀ [266]. По этой причине кроме напряженного состояния необходимо учесть осадку пути и ее интенсивность.

В третьей главе получены аппроксимирующие функции зависимости осадки от пропущенного тоннажа. Эти функции можно использовать для прогнозирования значения пропущенного тоннажа до наступления потери работоспособности безбалластного пути.

Применительно к испытаниям рельсов вопросами прогнозирования тоннажа занимались Коган А.Я., Абдурашитов А.Ю. [42; 43; 75; 328] и др.. Способ, предложенный ими, предлагается использовать не только применительно к рельсам, но и к пути в целом. Вместо повреждаемости рельсов дефектами автором предлагается взять повреждаемость пути. За повреждаемость пути взять осадку (просадку) пути III степени, требующую ограничения скорости.

При одной и той же мере повреждаемости пути G = const имеем соотношение:

$$n_1 D_1 = n_0 D_0 = G = const, (5.10)$$

где *G* - ресурс пути до появления просадки III степени;

- *n*₁ число осей, прошедших по участку 1 появления просадки III степени;
- *D*₁ показатель повреждаемости пути на участке 1 при проходе одной оси поезда;
- *n*₀ число осей, пропущенных по опытному участку до появления просадки III степени;

Учитывая, что

$$n_1 = T_1 / \langle P_1 \rangle; \qquad n_0 = T_0 / \langle P_0 \rangle, \qquad (5.11)$$

- где *T*₁ тоннаж брутто, пропущенный по участку 1 до появления просадки III степени;
 - То тоннаж брутто, пропущенный по опытному участку до появления просадки III степени,

 (P_1) - средняя осевая нагрузка на участке 1;

 $\langle P_0 \rangle$ - средняя осевая нагрузка на опытном участке,

получим выражение, определяющее размеры тоннажа брутто, который можно пропустить по участку 1 с заданными эксплуатационными характеристиками при известном тоннаже брутто, пропущенном на опытном участке.

Структура алгоритма методологии, учитывающей и первое и второе предельное состояние безбалластного пути, представлена на Рисунке 5.3.

1этап - Аналитическая часть



Рисунок 5.3 Алгоритм прогнозирования состояния конструкции пути

Таким образом, можно определить ресурс (срок службы) и трудозатраты на текущее содержание безбалластного пути на ВСМ по известным значениям ресурса и трудозатрат на ЭК.

$$T_1 = T_0 \cdot \frac{D_0}{D_1} \cdot \left(\frac{\langle P_1 \rangle}{\langle P_0 \rangle}\right)^k \cdot K_t$$
(5.12)

$$Q_1 = Q_0 \cdot 0.13 \frac{\gamma_1}{\gamma_0} \cdot \frac{D_1}{D_0} \cdot \left(\frac{\langle P_1 \rangle}{\langle P_0 \rangle}\right)^k, \qquad (5.13)$$

где *D*₁ - показатель повреждаемости (просадка пути) на действующей линии, получается расчетом из математической модели;

 D_0 - показатель повреждаемости (просадка пути) на опытном участке ЭК;

 T_1 - тоннаж брутто, пропущенный по участку действующей линии до исчерпания ресурса;

 T_0 - тоннаж брутто, пропущенный по опытному участку до исчерпания ресурса (до достижения критических значений прогиба, напряжений, осадки);

*P*₁ - средняя осевая нагрузка на участке действующей линии;

 P_0 - средняя осевая нагрузка на опытном участке;

k - эмпирический коэффициент, k=6;

*γ*₁ - число переходов оттаивания/замерзания (весна, осень) на 100 млн. т брутто на действующей линии;

ую - число переходов оттаивания/замерзания (весна, осень) на 100 млн. т брутто на опытном участке;

 $K_{\rm t}$ - коэффициент влияния климата, характеризующий увеличение интенсивности расстройства пути в период оттаивания весной и замерзания осенью, $K_t = 0.13 \frac{\gamma_1}{v_2}$;

*Q*₁ - стоимость текущего содержания на действующей линии;

 Q_0 - стоимость текущего содержания на опытном участке.

С учетом грузонапряженности на ЭК - 300 млн. т брутто в год, а на ВСМ, предположительно 30 млн. т брутто в год можно получить прогнозный тоннаж в реальных условиях эксплуатации. Например, для конструкции Tines, исходя из значений осадки пути в соответствии с алгоритмом на Рисунке 5.3 получаем прогнозный тоннаж на ВСМ по результатам пропуска на ЭК 600 млн. т брутто:

$$T_1 = 600 \ (2,5/0,9) \ (18/23,5) \ 0,13 \ (6/0,67)$$

При грузонапряженности 30 млн. т брутто в год срок службы составит 49 лет.

Выводы по главе 5:

1. Разработана поэлементная схема подтверждения соответствия заданным техническим требованиям для безбалластной конструкции пути. Определена необходимость проведения полигонных испытаний на Экспериментальном кольце перед проведением испытаний в конкретных условиях эксплуатации.

2. Разработан метод, позволяющий обоснованно прогнозировать срок службы инновационной конструкции пути по результатам ускоренных испытаний на закрытом полигоне в зависимости от достижения первого или второго критического состояния пути.

Найден способ прогнозирования поведения той или иной конструкции пути в реальных условиях эксплуатации на линии по результатам испытаний на Экспериментальном кольце.

3. Обоснованно рассчитанный срок службы безбалластного пути дает возможность объективно сравнивать его со сроком окупаемости, определяя, таким образом, целесообразность его сооружения уже на стадии испытаний.

6. РАЦИОНАЛЬНЫЕ СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ БЕЗБАЛЛАСТНОГО ПУТИ

В главе предпринята попытка оценить безбалластный путь с точки зрения стоимости жизненного цикла. В предыдущей главе найден обоснованный метод определения срока службы БВСП, новая задача стоит в определении срока окупаемости затрат на капитальное строительство. Очевидно, что в различных условиях эксплуатации срок окупаемости будет различным, что подтверждено рядом исследований [30; 31; 234]. Ставится задача определить, в каких сферах эксплуатации срок окупаемости будет минимальным.

6.1 Стоимость жизненного цикла

Стоимость жизненного цикла [329; 330; 331; 332; 333; 334] определяется как все затраты, связанные с жизненным циклом системы, которые включают в себя:

- стоимость научно-исследовательских работ и собственно разработки;

- стоимость производства и строительства;

- стоимость эксплуатации и техобслуживания;

- стоимость вывода из эксплуатации системы и утилизации.

Полная стоимость может быть рассмотрена с разнообразных точек зрения, то есть, с точки зрения поставщика системы или пользователя системы или ее владельца, или в более широком плане, с точки зрения общества. Основное предположение для подхода СЖЦ состоит в том, что в общем случае можно заранее повлиять на будущие затраты продукта, либо при планировании его использования, либо посредством улучшения продукта или непосредственно актива. Анализ СЖЦ должен представляться не только как подход для того, чтобы определить стоимость системы, но и как помощь при принятии решения по проекту, техническому обслуживанию и т.д. Поэтому использование анализа стоимости жизненного цикла должно быть ограничено затратами, которые мы можем контролировать.

Составляющие стоимости жизненного цикла (СЖЦ) подробно рассмотрены в ряде работ [335; 336; 337; 338; 339; 340].

6.2 Риски

Вопросы управления рисками рассматривались в различных аспектах [341]. Так, в работах по проектному анализу И.И. Мазура, В.Д. Шапиро [342], В.Н. Буркова [343], С.Д. Бушуева [344] рассмотрены содержание процессов и методы управления рисками в рамках методологии управления проектами. Работы авторов Н.В. Хохлова [345], В.Ю. Катасонова, Д.С. Морозова [346; 347] посвящены анализу проблем классификации, оценки и управления рисками с позиций финансового и инвестиционного менеджмента. Методы управления рисками предприятий, которые выступают в качестве исполнителей проектов, рассмотрены в работах Г. В. Черновой [348], В. Широкова [349], Р.А. Перелета [350], Г.Б. Клейнера [351].

В качестве основных можно выделить следующие методы оценки риска.

1. Статистический метод. Проектный риск характеризуется событием, связанным с риском и вероятностью наступления риска. Для количественного анализа рисков необходимо брать во внимание все возможные последствия принимаемых решений и их вероятности. Поэтому риски, как правило, характеризуются двумя параметрами – величиной возможного ущерба и вероятностью реализации риска. Вероятностные методы широко применяются в управлении проектами для решения задач, связанных с оценкой и выбором альтернатив, планированием проекта и управлением сложно организованным комплексом работ в условиях риска и неопределённости [346; 347; 348].

2. Сценарный подход к оценке рисков. Данный подход используется для событий, которые не имеют репрезентативной статистики и на основе теоретического анализа проектных процессов имеет своей целью определить возможный ход развития событий и оценить их последствия. Он основан на построении причинно-следственной цепочки событий, для каждой из которых определяется соответствующая вероятность. Сценарный подход может быть реализован с помощью сетевых методов: построения деревьев событий, отказов и решений [346; 347].

3. Имитационное моделирование. Позволяет построить для проекта математическую модель с неопределёнными значениями параметров И производить учёт рисков с помощью многократного расчёта по такой модели. К преимуществам имитационного моделирования относится возможность получения интервальных (a не точечных) характеристик показателей эффективности проекта [346; 349].

4. Метод экспертных оценок. Основывается на использовании опыта экспертов в процессе анализа проекта и учитывает влияние разнообразных качественных факторов. Экспертные методы применяются на начальных этапах проектирования при отсутствии информации по тем или иным показателям аналогичных объектов, либо при отсутствии у проектируемого объекта аналогов. Методический аппарат проведения экспертизы должен обеспечивать выполнение следующих основных этапов экспертного оценивания независимо от объекта экспертизы: подбор экспертов; организация экспертных опросов; проверка согласованности оценок экспертов; обработка, оформление и представление экспертного оценивания для принятия по ним решений [346; 347; 348].

5. Анализ чувствительности. Он заключается в последовательном изменении одной варьируемой переменной (например, на 10%) и расчете новых значений результирующих переменных или критериев (например, чистый дисконтируемый доход). Далее производится оценка процентного изменения критерия по отношению к базисному варианту и определяется показатель чувствительности, как отношение изменения показателя к изменению значения варьируемой переменной на один процент. Аналогично можно провести анализ чувствительности и по другим переменным [346; 347; 348].

Понятие риска включает два элемента[329; 352]:

- вероятность возникновения события или сочетания событий, ведущих к опасности или частота возникновения таких событий;

- последствия опасности.

269

Анализ действующих российских стандартов по менеджменту риска приводится в работах [353; 354; 355; 356]. Однако, применительно к безбалластному пути необходимо учесть дополнительные риски.

При выборе конструкции пути для высокоскоростного движения в России следует принять во внимание специфические риски. Для безбалластного пути это, прежде всего, качество материалов и точное соблюдение технологии строительства. Малейшие отклонения от состава бетонных смесей или времени и температуры их твердения приводят к сокращению продолжительности жизненного цикла и увеличению затрат на текущее содержание.

К рискам следует отнести сооружение безбалластного пути на слабых несущих основаниях. Мировой опыт эксплуатации такого пути - это в основном эстакады, мосты и тоннели в достаточно мягком климате.

Еще одним фактором риска является температурный режим эксплуатации безбалластного пути. Все демпфирующие свойства пути обеспечиваются полимерными слоями и прокладками. Свойства полимеров существенно меняются при изменении температуры, что необходимо учесть при проектировании. Безбалластный путь более требователен к качеству поверхности катания, поэтому шлифовать рельсы и колеса потребуется чаще.

6.3 Срок окупаемости

Автором проанализирован зарубежный опыт применения безбалластного пути [136]. Перенос этого опыта на Российские условия будет некорректен, но для анализа общих тенденций будет, несомненно, полезен.

По мнению многих исследователей, применение безбалластного пути выгодно только в том случае, если стоимость его строительства будет превышать стоимость сооружения обычного пути в тех же условиях на величину не более 30 % [357]. Опыт железных дорог Германии показывает, что стоимость строительства безбалластного пути Rheda выше стоимости строительства обычного пути на 20–40 % [358]. Это превышение компенсируется сокращением затрат на эксплуатацию безбалластного пути по сравнению с балластным в течение примерно 20 лет.

Чистая приведенная стоимость NPV [110] (разность между дисконтированными, т.е. приведенными к настоящему моменту, ожидаемыми поступлениями от проекта и дисконтированными затратами на осуществление проекта, включая величину первоначальных инвестиций) двух конструкций представлена на Рисунке 6.1.



Рисунок 6.1 NPV балластного и безбалластного пути

Стоимость сооружения одного метра безбалластного пути в Европейских странах колеблется от 500 до 1100 евро/метр [110]. Выбор безбалластной конструкции всегда является сложной технико-экономической задачей из-за длительного срока окупаемости. Безбалластная конструкция имеет безусловное преимущество в тоннелях и на эстакадах, так как не требует специальной подготовки несущего слоя.

Стоимость строительства безбалластной системы Shinkansen на 24 % больше, чем балластной [359]. Трудозатраты на обслуживание, как ожидается, будут на 30 % ниже, чем требуется для балластных конструкций. При этом

разница в затратах на строительство будет скомпенсирована экономией на текущем содержании через 12 лет.

Затраты на строительство в 2006 году Rheda и Züblin безбалластных систем были 950 евро/м и 800 евро/м соответственно в сравнении с традиционным балластным путем, который стоил 510 евро/м [101]. Расходы на строительство безбалластных систем во Франции почти в два раза выше, чем балластных. Эксплуатационные расходы на содержание безбалластных систем в Германии и Японии оказались соответственно на 30 и 20 % ниже, чем балластных.

Дисконтированная стоимость жизненного цикла [97] для балластного и безбалластного пути представлена на Рисунке 6.2. При рассмотрении диаграммы видно, как еще раз подтверждается тот факт, что за рубежом превышение стоимости строительства компенсируется сокращением эксплуатационных затрат.

Необходимо отметить, что безбалластный путь применяется не только на высокоскоростных железнодорожных линиях, но и на путях со смешанным движением. Причем, чем больше доля грузового движения, тем быстрее достигается эффект от сокращения затрат на текущее содержание.



Рисунок 6.2 Дисконтированная стоимость жизненного цикла

В ФРГ более 20 лет назад компании, специализирующиеся на путевом строительстве, делали попытки убедить железные дороги широко использовать при строительстве новых линий безбалластный путь.

Ситуация изменилась только тогда, когда в рамках реформы была достигнута договоренность о том, что строительство и реконструкция линий будут финансироваться из федерального бюджета, а их текущее содержание проводиться холдингом железных дорог Германии (DB AG). В этой ситуации руководство DB AG пришло к логичному выводу о необходимости строить путь, требующий минимальных средств на текущее содержание.

В России ситуация несколько иная. Во-первых, ставка дисконтирования существенно выше. Во-вторых, протяженность участков со слабым основанием, в том числе карстоопасных, существенно больше.

6.4 Сферы применения безбалластного пути

Изначально безбалластная конструкция пути позиционировалась как конструкция пути для выделенного высокоскоростного движения со сроком службы до 60 лет. За данный период высокие затраты на строительство должны компенсироваться низкими затратами на текущее содержание. Однако в процессе испытаний на Экспериментальном кольце АО "ВНИИЖТ" [193] выявлены существенные затраты на эксплуатацию БВСП, значительно превышающие планируемые показатели, ставит под сомнение ee экономическую ЧТО эффективность без грамотного обоснования наиболее рациональных сфер применения [360]. Вместе с тем, расчетным путем в главе 2 и экспериментально в главе 3 доказано, что значения прогибов и напряжений в элементах БВСП существенно меньше предельно допустимых значений, что дает возможность применять ее при грузовом сообщении.

Для определения сфер применения БВСП следует рассмотреть еще один аспект. При выделенном высокоскоростном движении воздействие на путь относительно небольшое, так как обращаются поезда незначительной фиксированной массы с заданной скоростью, что дает возможность установить оптимальные параметры пути (план, профиль, возвышение и т.д.). Можно заключить, что минимальную интенсивность расстройства пути при воздействии поездной обеспечить незначительном нагрузки может И традиционная конструкция пути на балласте. При этом пассажирское движение почти всегда малорентабельно из соображений социальной ориентированности и конкуренции с другими видами транспорта.

Вместе с тем наиболее рентабельным является грузовое движение. Но при данном типе движения путь наиболее интенсивно расстраивается и требует ремонтных работ, уменьшающих пропускную способность. Следует отметить, что для грузового движения был бы весьма актуален путь с минимальными затратами на эксплуатацию, несмотря на существенную стоимость его строительства. Эту роль при определенных условиях мог бы выполнить безбалластный путь.

По мнению автора, представляется целесообразным применить безбалластный путь на участках совмещенного движения. Для этой цели лучше обращение всего подходят планируется контейнерных участки, где (контрейлерных) поездов совместно со скоростным и высокоскоростным движением.

Проанализированные факторы, влияющие на стоимость жизненного цикла (СЖЦ) безбалластного пути (БВСП) по сравнению с путем на балласте приведены в Таблице 6.1.

Превышенные затраты на строительство безбалластного пути компенсируется уменьшенными затратами на его текущее содержание примерно через 20 лет. При этом ориентировочный срок службы балластного пути составляет 40 лет, безбалластного – 60 лет.

Таблица 6.1 - Факторы, влияющие на стоимость жизненного цикла безбалластной конструкции пути

Факторы, уменьшающие	Факторы, увеличивающие		
СЖЦ для БВСП	СЖЦ для БВСП		
- меньшая строительная высота	- стоимость строительства		
конструкции	- стоимость единовременно вложенных		
- меньшая прогнозная стоимость текущего	средств		
содержания	- высокие риски на земляном полотне		
- выше прогнозный ресурс (срок службы)	(необходимость эстакад)		
- свободные площади земли при	 бо́льшие сроки строительства 		
применении эстакад	- доп. затраты на защиту от шума и		
	вибрации		
	- высокая стоимость утилизации		
	- низкая стоимость повторного		
	использования (старогодные материалы)		

Рассмотрим риски при сооружении и эксплуатации безбалластного пути в условиях Российских железных дорог:

- устойчивость бесстыкового пути против выброса на подходах к безбалластным конструкциям;

- сход подвижного состава;
- ликвидация последствий схода подвижного состава;
- осадка пути на слабых основаниях, участках с карстовыми явлениями;
- соблюдение технологии строительства и качества материалов.

Примем за основу расчет денежного эквивалента рисков исходя из вероятности появления негативного события стоимости И ликвидации последствий события. Ориентировочно ЭТОГО вероятности значения возникновения негативных событий и стоимость ликвидации их последствий представлена в Таблицах 6.2 и 6.3. Период времени, через который негативное событие может наступить взят по результатам испытаний на Экспериментальном кольце с грузонапряженностью 300 млн. т брутто в год.

Таблица 6.2 - Вероятность появления рисков и стоимость их устранения для БВСП на земляном полотне

Наименование риска	Время возникновения, годы	Стоимость устранения, руб.	Вероятность появления, %	
Технологические ошибки при укладке	каждые 5 лет	500000	20	
Осадка бетонной плиты до 20 мм				
(устраняется в узле скрепления)	каждые 3 года	60000	30	
Осадка бетонной плиты более 20 мм				
(осадка земляного полотна)	каждые 20 лет	7800000	5	
Осадка переходного участка	каждые 3 года	80000	95	

Таблица 6.3 - Вероятность появления рисков и стоимость их устранения для БВСП на эстакаде

Наименование риска	Время возникновения, годы	Стоимость устранения, руб.	Вероятность появления, %
Осадка бетонной плиты до 20 мм			
(устраняется в узле скрепления)	каждые 3 года	60000	30
Осадка переходного участка	каждые 3 года	80000	95

Расчет стоимости жизненного цикла БВСП в части стоимости текущего содержания следует дополнить значениями, которые получаются умножением вероятности появления негативного события на стоимость ликвидации этого события в определенный год эксплуатации БВСП.

Существенные риски состоят в том, что безбалластный путь более требователен к соблюдению технологии строительства в части состава бетонных смесей и подготовки основания. Кроме того, при проектировании необходимо учесть деформации "слабых" оснований и изменение демпфирующих свойств полимерных материалов при колебании температуры.

Деформативность земляного полотна — это один из основных рисков при эксплуатации БВСП. Он может быть связан с недостаточным качеством материалов и качеством производства работ, а так же с природными и техногенными факторами. Существенно снизить этот риск может применение пути на эстакадах. Превышение стоимости пути на эстакаде по сравнению с путем на земляном полотне может быть скомпенсирована возможностью использования земельных площадей под эстакадой, и, как следствие, сохранением существующей или налаживанием дополнительной социальной инфраструктуры.

Еще один аспект, влияющий на стоимость жизненного цикла, это стоимость денежных средств, которые необходимо вложить единовременно в строительство безбалластного пути по сравнению со стоимостью денежных средств, которые будут потрачены на ремонт балластного пути, но в более отдаленные сроки, когда уже можно будет вкладывать средства, полученные от эксплуатации построенного железнодорожного пути.

Процентное соотношение стоимости верхнего строения пути на земляном полотне и на эстакаде показано на Рисунках 6.1 и 6.2.



Рисунок 6.1 Соотношение стоимости элементов пути на земляном полотне



Рисунок 6.2 Соотношение стоимости элементов пути на эстакаде

Соотношение стоимости капитального строительства И стоимости содержания различных конструкций пути с учетом рисков приведено на Рисунке 6.3. Риски эксплуатации пути на балласте составляют 5-10 % от стоимости текущего содержания, для безбалластного пути на земляном полотне 20-25 %, а безбалластного пути на эстакаде 3-7 %. Из анализа вероятности для рисков и стоимости ликвидации последствий вытекает, что возникновения наибольшая вероятность увеличения затрат на эксплуатацию пути приходится на конструкцию БВСП на земляном полотне.



2 - безбалластный путь на земляном полотне;

3 - безбалластный путь на эстакаде

Рисунок 6.3 Соотношение стоимости строительства и текущего содержания

В настоящее время не существует единого метода выбора инфраструктурных инновационных объектов, из множества альтернативных вариантов. В основном все применяемые на практике алгоритмы оценки эффективности того или иного объекта ориентированы на интересы инвесторов, а не конечных пользователей объектов [92; 361; 362; 363; 364]. Данные алгоритмы преимущественно денежными потоками оперируют И не учитывают технологические, технические, социальные и другие эффекты от использования объекта в составе проекта в целом [341].

Нерациональность применения обычной оценки стоимости жизненного цикла для объектов транспортной инфраструктуры рассмотрена в ряде работ Д.А. Мачерета [365]. Аналогичный подход применим для безбалластного пути. Предположим, что безбалластный путь приносит в течение 60 лет равномерный эффект. Соответственно, без применения дисконтирования (*J*=0) в каждом десятилетии данного расчетного периода будет получено около 17 % общего эффекта, как показано на Рисунке 6.4.



Рисунок 6.4 Доход без дисконтирования

Совсем иную картину мы увидим, применив дисконтирование. Даже при небольшой норме дисконта 0,05 доля последних десятилетий в совокупном эффекте, приведенном к «нулевому» году, сократится в разы, а свыше 80 % этого эффекта будет приходиться на первые три десятилетия. То есть первые тридцать лет использования транспортной инфраструктуры будут являться определяющими для оценки совокупного дисконтированного эффекта.

При увеличении нормы дисконта до 0,10 определяющими становятся уже первые двадцать лет. А при норме дисконта 0,20, используемой при оценке

проектов с достаточно высокой степенью риска, свыше 80 % совокупного эффекта будет получено в первом десятилетии, а доля последнего – практически нулевая. Экономические эффекты, получаемые на длительных сроках эксплуатации просто обнуляются при дисконтировании, как показано на Рисунке 6.5.



Рисунок 6.5 Чистый дисконтированный доход

Таким образом, чем больше эффекты, формируемые в долгосрочной перспективе, тем сильнее снижается оценка совокупного приведенного эффекта в результате дисконтирования [365].

Проведенный анализ графиков ЧДД показывает, что применение сравнения стоимости жизненного цикла для выбора конструкции пути на сроках службы 60 лет и более нецелесообразно. По этой причине необходимо рассматривать другие методы выбора той или иной конструкции пути для различных условий эксплуатации.

Безбалластный путь по праву можно считать не просто инновацией, а "прорывной" инновацией, которая принципиально меняет подходы к строительству и обслуживанию пути, нормам его содержания, требованиям к подвижному составу и организации движения.

В отличие от инноваций, «прорывные» инновации [366] приводят к смене устоявшихся технологий и возникновению новых циклов развития, обеспечивают потенциальную экономическую эффективность за счет улучшения значимых показателей деятельности производственно-экономической системы, в рамках которой они реализуются. На железнодорожном транспорте к таким показателям могут относиться скорости движения и веса поездов, удельный расход электроэнергии на тягу поездов, долговечность технических средств, трудоемкость их обслуживания.

В то же время инвестиционные затраты на реализацию "прорывных" инновационных проектов могут быть столь велики, что генерируемые ими эффекты от улучшения показателей производственно-экономической деятельности не обеспечивают приемлемый уровень стандартных показателей экономической эффективности.

Потенциальная эффективность "прорывных" инвестиционных проектов может трансформироваться в реальную благодаря "поддерживающим" инновациям (улучшающим, микроинновациям), которые позволяют снизить затраты на реализацию подобных инновационных проектов и решений, другими словами - удешевить их реализацию [365]. Это может быть эффект массового производства, появление новых технологий и новых материалов.

Поскольку масштабы такого удешевления зависят от еще не реализованных и даже не изобретенных улучшений, их оценка связна с неопределенностью. Поэтому перспективность «прорывных» инновационных проектов целесообразно оценивать исходя из их влияния на натуральные показатели деятельности производственно-экономической системы и генерируемого на этой основе экономического эффекта. При этом может быть рассчитан максимально допустимый уровень затрат на реализацию инновационных решений, при котором потенциальная эффективность трансформируется в реальную, что обеспечивает приемлемый уровень стандартных показателей экономической эффективности.

281

Эффективность "прорывных" инновационных проектов должна определяться не на основе сравнения технических характеристик нового объекта, претендующего статус инновационного, С базовым, а на исходя ИЗ прогнозируемого долгосрочного влияния инновационного проекта на значимые показатели деятельности железнодорожного транспорта. При ЭТОМ под инновационным проектом понимается реализация безбалластного пути для совмещенного движения, который открывает новые возможности для роста эффективности железнодорожного транспорта в целом.

Предлагаемый подход в полной мере соответствует понятию инновация, в отличие расчета индекса инновационности объекта. OT основанного на сопоставлении технических характеристик, так как превосходные по сравнению с базовым объектом технические характеристики отнюдь на гарантируют адекватного влияния на соответствующие показатели деятельности экономической системы в целом.

Предлагаемый проектный подход к оценке инноваций, в отличие от объектного, обеспечивает оценку не технических преимуществ безбалластного пути самих по себе, а его влияния на ключевые показатели эффективности железнодорожного транспорта. Тем самым реализуется системный экономический подход к оценке инновационности.

Как отмечает Д.А. Мачерет [365], важным условием эффективности создания транспортной инфраструктуры является возрастание (а не «затухание») на протяжении длительного периода времени эффектов от ее использования даже с учетом дисконтирования. Это условие может быть обеспечено при таком сочетании динамики не дисконтированных эффектов и нормы дисконта, когда умножение эффекта на коэффициент дисконтирования не приводит к снижению получившегося значения относительно значения предыдущего периода. Иными словами, когда понижающее влияние дисконтирования не перекрывает влияния роста не дисконтированных эффектов. Однако, механические манипуляции с нормами дисконта не могут быть решением проблемы, ведь применяемые нормы дисконта должны быть адекватны складывающимся в обществе нормам временного предпочтения [367; 368].

Обычно при расчете стоимости жизненного цикла эффект, достигаемый в каждом году t от функционирования транспортной инфраструктуры (очищенный от соответствующих затрат), необходимо умножить на коэффициент дисконтирования α_t , вычисляемый по формуле:

$$\alpha_t = \frac{1}{(1+J)^t},\tag{6.1}$$

где *J* – норма дисконта.

Для оценки стоимости жизненного цикла "прорывных" инноваций, таких как безбалластный путь, целесообразно уменьшать коэффициент дисконтирования от года к году. Иными словами, необходимо дисконтировать сам коэффициент дисконтирования таким образом:

$$\alpha'_{t} = \frac{1}{\alpha_{t} = \frac{1}{(1+J)^{t}}},\tag{6.2}$$

Чистый дисконтированный доход с изменяющимся коэффициентом дисконтирования представлен на Рисунке 6.6.



Рисунок 6.6 Чистый дисконтированный доход с изменяющимся коэффициентом дисконтирования

Из анализа графиков на Рисунках 6.4-6.6 видно, что путь на балласте имеет наименьшие сроки и стоимость строительства, но при этом самые низкие темпы окупаемости из-за высоких затрат на текущее содержание. Безбалластный путь на земляном полотне существенно дороже и сроки строительства значительно выше, но и окупаемость происходит быстрее, так как текущее содержание обходится дешевле, чем у предыдущей конструкции. Самая большая стоимость и сроки строительства имеет безбалластная конструкция пути на эстакаде, но и сроки окупаемости для нее самые высокие из-за меньших рисков и возможности использования территории под эстакадой (социально-экономическая эффективность).

Следует отметить основные составляющие, которые влияют на расчет срока окупаемости: интенсивность движения на заданном участке (грузонапряженность), заданный срок службы конструкции пути (ресурс) и частота проведения ремонтов. При этом частота проведения ремонта для

284

конструкции пути на балласте связана непосредственно со схемой ремонтов согласно типу выбранной конструкции, а частота ремонтов для БВСП не имеет четкой связи с расчетными периодами и дополнительно рассчитывается при непосредственном учете рисковой составляющей. Доходная составляющая возникает от перевозочных видов деятельности, при этом предоставление услуг инфраструктуры составляет 75 %. Верхнее и нижнее строение пути, в рамках предоставления услуг инфраструктуры занимают до 80–90 %.

Автором выполнен расчет для участка пути 30 км, для различных видов движения:

- выделенное пассажирское;

- грузовое;

- совмещенное (пассажирское и ускоренные контейнерные поезда).

При это рассмотрено несколько комбинаций конструкций нижнего и верхнего строений пути:

- путь на балласте и земляном полотне;

- безбалластный путь на земляном полотне;

- безбалластный путь на эстакаде.

Для возможности использования результатов исследования при выборе конструкции ВСП на участках ВСМ Москва-Казань, ориентировочное количество грузового и пассажирского сообщения учитывалось согласно Инвестиционного меморандум Проекта создания высокоскоростной железнодорожной магистрали «Москва – Казань» 2014 [369].

Полученный график ЧДД существенно отличается от аналогичных зарубежных расчетов, что объясняется существенной разницей в ставке дисконтирования.

На основе изучения зарубежных материалов [109], сложилась следующая концепция относительно строительства и эксплуатации БВСП: высокие первоначальные инвестиции на строительство, окупаются низкой стоимостью текущего содержания. Такая концепция справедлива только при низкой ставке

дисконтирования (0,5) и низких эксплуатационных рисках, что для условий Российских железных дорог не представляется возможным.

Сферы применения безбалластного пути целесообразно выбирать исходя из минимизации сроков окупаемости в пределах срока службы с учетом возможных рисков при эксплуатации и результатов испытаний на Экспериментальном кольце. В дополнение к этому, рассматривать окупаемость выбранных решений в рамках срока службы конструкции (ресурса). В Таблице 6.4 представлен прогноз срока окупаемости для различных сфер применения с учетом "прорывных инноваций" [366].

В Таблице 6.5 представлены условия применения БВСП по скорости и грузонапряженности линии. Чем выше грузонапряженность линии, тем меньше возможности предоставить "окно" для обслуживания пути и тем более востребован БВСП с минимальными затратами на текущее содержание. Наиболее рациональной сферой применения безбалластного пути является конструкция на эстакаде в условиях совмещенного высокоскоростного и специализированного контейнерного обращения поездов. На Рисунке 6.7 приведены границы возможности и целесообразности использования БВСП

Алгоритм выбора безбалластного пути представлен на Рисунке 6.7.

Вид движения	Условный дисконтированных доход в конце срока службы, млрд. руб.					
	традиционный путь на балласте	БВСП на земляном полотне	БВСП на эстакаде и в тоннеле			
Выделенное пассажирское	1 ,2,2	2,4	Стоимость сооружения 2,6			
Совмещенное	4,6	4,8	5,0			
Грузовое	вно 5,8	6,0	6,2			
	↓ ~					

Таблица 6.4 - Условный дисконтированных доход в конце срока службы



Рисунок 6.7 Границы возможности и целесообразности использования БВСП

Таблица 6.5 - Условия применения БВСП по скорости и грузонапряженности линии (выделенные ячейки таблицы - БВСП)

	Грузо-	Категории пути - допускаемые скорости движения поездов							
ТИ	напря	(числитель - пассажирские, знаменатель - грузовые)							
пу	женность								
па	МЛН.ТКМ	BC	С	1	2	3	4	5	6
уп	брутто/ км в	201-	141-	121-	101-	81-	61-	41-	40 и
Гр	год	400	200	140	120	100	80	60	менее
		до 160	до 140	до 100	до 90	до 80	до 60	до 60	
Α	Более 80	1	1	1	1	1	2	2	3
Б	51-80	1	1	1	1	2	2	3	3
В	26-50	1	1	1	2	2	3	3	4
Γ	11-25	1	1	1	2	3	3	4	4
Д	6-10	1	1	2	3	4	4	4	4
E	5 и менее	-	-	-	-	4	4	5	5



Рисунок 6.7 Алгоритм выбора безбалластного пути

288
Кроме описанной задачи определения срока окупаемости БВСП при заданной интенсивности движения с помощью разработанной модели можно решать и дополнительные задачи:

- определение интенсивности движения при заданном сроке окупаемости;

- определение максимальной стоимости сооружения и эксплуатации БВСП при заданном сроке окупаемости и интенсивности движения.

Стоимость жизненного цикла для конструкций с длительным сроком службы (60 лет) является достаточно условной величиной. Однозначно можно утверждать, что за такой срок увеличатся объемы укладки и темпы строительства, будут получены более совершенные и более дешевые материалы, будут найдены новые технологии сооружения и текущего содержания, изменятся социальные условия. Тем не менее, предложенная модель определения рациональных сфер применения безбалластного пути позволит получить представление о тенденциях технико-экономического развития конструкций пути. При помощи этой модели можно проводить сравнительное технико-экономическое обоснование перед проектированием той или иной конструкции пути.

Выводы по главе 6:

1. Традиционный балластный путь имеет низкие затраты на строительство и более универсален для различных условий эксплуатации, кроме того он имеет лучшие параметры по гашению шума и вибрации. Однако, такой путь имеет существенные затраты на текущее содержание.

Строительство безбалластного пути дороже на 30–40 %, чем балластного. Безбалластный путь имеет преимущество при эксплуатации на мостах, эстакадах и в тоннелях, а также предпочтителен из-за низких затрат на текущее содержание, которые на 20–30 % ниже, чем у балластного. Особо следует отметить преимущество безбалластных конструкций по устойчивости бесстыкового пути к температурному выбросу.

Превышение затрат на строительство безбалластного пути компенсируется снижением затрат на его текущее содержание примерно через 20 лет. При этом ориентировочный срок службы балластного пути составляет 40 лет, безбалластного – 60 лет.

2. Существенные риски состоят в том, что безбалластный путь более требователен к соблюдению технологии строительства в части состава бетонных смесей и подготовки основания. Кроме того, при проектировании необходимо учесть деформации "слабых" оснований и изменение демпфирующих свойств полимерных материалов при колебании температуры. Указанные риски могут увеличить срок окупаемости дополнительных затрат на строительство безбалластного пути с 20 до 30–35 лет.

3. Использование типовых методов оценки стоимости жизненного цикла с учетом дисконтирования применительно к безбалластному пути нецелесообразно по ряду причин:

- слишком длительный срок службы;

- эффекты от применения БВСП возникают в последней трети срока службы и при дисконтировании полностью поглощаются;

- не учитываются эффекты от проекта в целом;

- не учитываются изменения среды окружения (появление новых технологий и новых материалов).

4. Для оценки дисконтированного дохода от применения безбалластного пути на сроках службы около 60 лет необходимо дисконтировать саму ставку дисконтирования.

5. Условием эффективности использования безбалластного пути является возрастание, а не «затухание» на протяжении длительного периода времени эффектов от ее использования даже с учетом дисконтирования. Это условие может быть обеспечено при таком сочетании динамики не дисконтированных эффектов и нормы дисконта, когда умножение эффекта на коэффициент дисконтирования не приводит к снижению получившегося значения относительно

значения предыдущего периода. Иными словами, когда понижающее влияние дисконтирования не перекрывает влияния роста не дисконтированных эффектов.

6. С точки зрения сфер применения, наиболее рациональным представляется использование безбалластного пути на эстакадах при совмещенном (высокоскоростное и ускоренное грузовое) движении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложено одно из решений проблемы освоения растущего объема перевозок грузов и пассажиров при отсутствии резервов мощности инфраструктуры на ряде участков и целых направлений путем применения новых конструкций пути, обеспечивающих повышение эффективности перевозок за счет минимизации времени и средств на все виды путевых работ.

Для решения проблемы поставлена цель - определение условий применения безбалластной конструкции для повышения эффективности перевозочного процесса за счет сокращения затрат на текущее содержание пути.

Цель исследования достигнута благодаря успешному решению ряда задач:

1. Выполнен сравнительный анализ характеристик балластного и безбалластного пути в части минимизации его технического обслуживания.

В диссертационном исследовании проанализировано развитие безбалластного пути от первых блочных конструкций, которые испытывались еще в 70-е годы прошлого века до самых современных решений для высокоскоростного движения. Представлено многообразие производителей, видов и типов конструкций, дана их классификация.

2. Для определения технической возможности применения БВСП в России, во-первых выполнен статический и динамический расчет условий достижения первого предельного состояния, во-вторых, аппроксимирована эмпирическая зависимость осадки БВСП от пропущенного тоннажа для нахождения условий достижения второго предельного состояния.

3. Статическим расчетом получены геометрические размеры несущих слоев, при которых напряжения и прогибы не превышают допустимых значений. Из расчетов напряжений в слоях БВСП в зависимости от их геометрических размеров следует, что увеличение толщины несущих слоев безбалластного пути оказывает больший эффект на увеличения прочности конструкции, чем увеличение ширины несущих слоев. При увеличении толщины плиты с 180 мм до 350 мм растягивающие напряжения уменьшаются с 1,2 до 0,6 Н/мм2. При увеличении ширины плиты с 3800 до 4400 мм растягивающие напряжения уменьшаются с 1,1 до 1,0 Н/мм².

Динамическим расчетом найдены решения системы дифференциальных колебания безбалластного пути как многослойной уравнений балки на модифицированном упругом основании Винклера методом частотных характеристик, с входом по силам, действующим в контакте колесо-рельс с учетом неровностей, и выходом по перемещениям и напряжениям отдельных слоев балки.

Адекватность расчетов подтверждена удовлетворительной сходимостью значений напряжений и прогибов с экспериментальными данными для различных конструкций безбалластного пути на ЭК. Для 80км/ч и 235 кН/ось расчетное значение прогиба среднего слоя (бетонной несущей плиты) составляет 2,9 мм, экспериментальное 2,5 мм. Для тех же условий значение расчетного напряжения составляет 6,3 кг/см2 экспериментальное 7,5 кг/см2.

Расчетные значения напряжений и прогибов в слоях безбалластного пути для условий ЭК и высокоскоростной линии Москва-Казань не превышают предельно допустимых значений для бетонных строительных конструкций. Это позволяет утверждать, что безбалластный путь можно эксплуатировать как для грузового, так и для высокоскоростного движения.

4. На ЭК и на Октябрьской железной дороге с 2010 по 2017 г.г. проведены уникальные испытания шести типов БВСП различных производителей(Rheda, LVT, MaxBögl, Alstom, Tines) по определению более 30 параметров (геометрия рельсовой колеи, осадки пути, трещинообразование, напряжения в элементах, вибрации, шум, электросопротивление и др.).

По первому предельному состоянию значения прогибов и напряжений, экспериментально полученных на ЭК при интенсивном движении с нагрузкой 235 кН на ось для всех типов БВСП примерно в два раза ниже критических значений, что позволило заключить, что одной из сфер применения является грузовое движение.

По второму предельному состоянию анализ интенсивности осадок пути на щебеночном основании и интенсивности осадок БВСП показало, что осадка безбалластного пути происходит в 4,8 раза медленнее, чем балластного, за исключением переходных участков. Однако при этом осадка происходит неравномерно. На участке 75 м после пропуска 600 млн. т брутто. величина осадки колеблется от 2 до 11 мм.

Максимальное значение уклона неровности, вызванной неравномерной осадкой составляет 2,1 °/₀₀ при допустимом значении 0,25 °/₀₀.

Причина таких уклонов неровности состоит в неравномерности модуля деформации химически укрепленного грунта и слоя ЩПГС по длине опытного участка. На длине 500 м значения модуля деформации химически укрепленного грунта колеблются от 40,8 до 291,7 МПа. Для слоя ЩПГС значения модуля деформации колеблются от 153,8 до 226,9 МПа.

Экспериментально доказано, что выход из строя БВСП на ЭК происходит по второму предельному состоянию. Максимальная осадка происходит в местах увлажнения нижних слоев конструкции. По этой причине для БВСП необходима дополнительная система мониторинга состояния земляного полотна.

5. Экспериментально доказано, что предложенная автором, оптоволоконная система диагностики земляного полотна позволяет отследить появление и измерить значение перемещений глубоко залегающих слоев, которые иными методами выявить и зафиксировать не представляется возможным.

6. С использованием метода экспертных оценок и определения весовых коэффициентов автором предложена методика выбора лучшей конструкции безбалластного пути из ряда аналогичных конструкций. Это дало возможность исключить из объема испытаний факторы с наименьшей значимостью ("весом"), а БВСП с наименьшим рейтингом исключать из числа конструкций,

продолжающих испытания на действующей линии. Таким образом уменьшается объем и стоимость проведения испытаний БВСП.

Обоснован набор измеряемых параметров и продолжительность испытаний БВСП для подтверждения требований безопасности и надежности.

Исходя из интенсивности появления неисправностей БВСП определена минимальная продолжительность полигонных испытаний - она должна составлять не менее 600 млн. т брутто и охватывать как минимум 2 весенних периода.

7. С точки зрения надежности в ходе испытаний выявлены существенные затраты на текущее содержание БВСП, что заставляет поставить под сомнение основное преимущество - минимальные затраты на эксплуатацию БВСП. Трудозатраты на содержание бетонной части БВСП в среднем на 42 % меньше, чем для пути на балласте, а на содержание переходных участков - в 10,5 раз больше.

Этот факт требует уточнения стоимости жизненного цикла БВСП. Кроме того, на Экспериментальном кольце выявлена такая неисправности, как "выплеск" из-под несущей бетонной плиты. Устранение этой неисправности на действующей линии по стоимости сопоставимо с новым строительством участка пути такой же протяженности. Выявленные факты необходимо учитывать при определении сфер применения БВСП в условиях Российских железных дорог.

8. Для параметров БВСП определены их допустимые численные значения, то есть сформулированы обоснованные технические требования к безбалластному пути в целом и к его элементам.

Расчетным путем получены геометрические размеры бетонной несущей плиты, при которых напряжения в ней не превосходят допустимых значений для строительных бетонных конструкций.

Разработана методика расчета длины дополнительных рельсов внутри колеи для обеспечения устойчивости бесстыкового пути против выброса в пределах переходных участков. Эта длина должна составлять не менее 10 м. Экспериментально подтверждено, что европейские требования к рельсовым скреплениям для безбалластного пути могут применяться для условий Российских железных дорог.

Конструкция И технические требования для подплитных слоев безбалластного пути индивидуальны для каждой конструкции. Экспериментально подтверждено, что конструктивное исполнение, геометрические размеры и физико-механические свойства гидравлически связанного и морозозащитного слоев безбалластных испытанных конструкций отвечают отечественным условиям эксплуатации.

Дополнительной рекомендацией, вытекающей из результатов испытаний на ЭК является наличие полимерного демпфирующего слоя на стыке бетонной плиты и ГСНС для исключения попадания воды в зазор при изгибе плиты.

Результаты испытаний на ЭК в условиях интенсивного грузового движения не в полной мере дают представление о долговечности безбалластной конструкции пути в реальных условиях эксплуатации. Обоснована необходимость разработки метода, позволяющего определить срок службы совершенно новой конструкции пути в условиях, которые еще не созданы.

9. Разработана методология подтверждения соответствия техническим требованиям в заданных условиях эксплуатации.

Предложена поэлементная схема подтверждения соответствия заданным техническим требованиям для БВСП. Определена необходимость проведения полигонных испытаний на ЭК перед проведением испытаний в реальных условиях эксплуатации.

Разработан метод, позволяющий обоснованно прогнозировать срок службы инновационной конструкции пути по результатам ускоренных испытаний на закрытом полигоне. Для определения срока службы безбалластного пути в годах и пропущенном тоннаже принята гипотеза о том, что отношение пропущенного тоннажа по одной и той же конструкции пути на закрытом полигоне и на действующей линии пропорционально отношению осевых нагрузок и обратно

пропорционально отношению повреждаемости конструкции на полигоне и на линии. В качестве повреждаемости выбирается первое или второе предельное состояние (напряжения или осадки) в зависимости от того, что наступит раньше. Этот критерий определяется путем испытаний для условий Экспериментального кольца и расчетным путем для перспективных условий высокоскоростного движения. Таким образом найден способ прогнозирования срока службы (ресурса) конкретной конструкции пути в реальных условиях эксплуатации на линии по результатам испытаний на ЭК. С учетом пропущенного тоннажа на ЭК до наступления необратимых повреждений бетонной несущей плиты этот ресурс составил для Rheda - 58 лет, для Tines- 49 лет.

10. С учетом обоснованного срока службы определена экономическая целесообразность применения БВСП в условиях Российских железных дорог. В качестве критерия выбран срок окупаемости. Применение БВСП целесообразно в том диапазоне, где срок окупаемости не превышает срок службы.

В качестве условий применения выбраны три варианта движения (высокоскоростное, совмещенное, грузовое) и три варианта конструкции пути (на балласте, БВСП на эстакаде, БВСП на земляном полотне).

По критерию окупаемости в конце срока службы наибольшее предпочтение имеет БВСП на эстакаде и в тоннеле при грузовом движении. Условный дисконтированных доход в конце срока службы составит 6,2 млрд. руб.

Кроме описанных задач определения срока окупаемости БВСП и условного дисконтированного дохода при заданной интенсивности движения с помощью разработанной модели можно решать и дополнительные задачи:

 определение требуемой интенсивности движения при заданном сроке окупаемости (

– определение максимальной стоимости сооружения и эксплуатации БВСП
 при заданном сроке окупаемости и интенсивности движения.

Стоимость жизненного цикла для конструкций с длительным сроком службы (60 лет) является достаточно условной величиной. Тем не менее,

предложенная модель определения рациональных сфер применения безбалластного пути позволит получить представление о тенденциях техникоэкономического развития конструкций пути.

11. Определены условия рационального применения БВСП с учетом его технических возможностей и экономической целесообразности. Этими условиями является совмещенное движение грузовых и пассажирских поездов со скоростями от 140 км/ч при грузонапряженности от 50 млн. т брутто в год.

Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме диссертационной работы

Исследование взаимодействия подвижного состава и пути на безбалластном основании следует продолжить на высокоскоростном полигоне, которым должна стать первая очередь BCM-2 Железнодорожный-Владимир.

Для повышения точностных характеристик волоконно-оптической системы диагностики целесообразно исследовать схемы расположения оптических сенсоров в виде сетки.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ВСМ высокоскоростная железнодорожная магистраль
- БВСП безбалластное верхнее строение пути
- ГСНС гидравлически связанный несущий слой
- СЖЦ стоимость жизненного цикла
- СКО среднеквадратическое отклонение
- СТО стандарт ОАО «РЖД»
- ЩПГС щебеночно-песчано-гравийная смесь
- ВСП верхнее строение пути
- ЭК экспериментальное кольцо ОАО "ВНИИЖТ" ст. Щербинка
- ЧДД чистый дисконтированный доход
- ВРМБ вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна
- ВОСС СОИ волоконно-оптическая система сигнализации состояния объектов инфраструктуры
 - ВОЛС волоконно-оптическая линия связи
 - ИССО искусственные сооружения (мосты, тоннели и т.д.)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлева, Т.Г. Верхнее строение пути с блочным железобетонным основанием [Текст] / Т.Г. Яковлева, В.Я. Шульга, С.В. Амелин [и др.] // Основы устройства и расчетов железнодорожного пути: под ред. С.В. Амелина и Т.Г. Яковлевой. – М. : Транспорт, 1990. – С. 74–81.

2. Применение железобетона в верхнем строении железнодорожного пути [Текст] // сб. научн. тр.: под ред. И.В. Амеличева. – М. : Транспорт, 1984. – 120 с.

Ананьев, Н.И. Виброзащита конструкции пути с лежневым основанием
 [Текст] / Н.И. Ананьев, В.Ф. Барабошин, А.В. Переслегин // Вестник ВНИИЖТ
 №2. – 1992. – С. 27–28.

Ананьев, Н.И. Вибрации пути с малогабаритными рамами [Текст] / Н.И.
 Ананьев, Барабошин В.Ф. // Вестник ВНИИЖТ №6. – 1972. – С. 53–56.

5. Ананьев, Н.И. Влияние вибрационной нагрузки на интенсивность накопления остаточных осадок в пути [Текст] / Н.И. Ананьев, В.Ф. Барабошин // Применение железобетона в верхнем строении железнодорожного пути: сб. научн. тр. : под ред. И.В. Амеличева. – М. : Транспорт, 1984. – С. 108–117.

Барабошин, В.Ф. Вредные вибрации пути и борьба с ними [Текст] / В.Ф.
 Барабошин, Н.И. Ананьев. – М.: Транспорт, 1972. – 48 с.

7. Барабошин, В.Ф. Повышение стабильности пути в зоне рельсового стыка [Текст] / В.Ф. Барабошин, Н.И. Ананьев. – М. : Транспорт, 1978. – 45 с.

 Ананьев, Н.И. Частотный метод оценки виброзащитных свойств промежуточных рельсовых скреплений [Текст] / Н.И. Ананьев, В.Ф. Барабошин // Вестник ВНИИЖТ. – М.: Трансжелдориздат, 1971. – №5. – С. 4–7.

 Совершенствование конструкции железнодорожного пути метрополитенов [Текст] // Под ред. В.Ф. Барабошина. ; сб. трудов Вып. № 630. – М.: Транспорт, 1981. – 123 с.

10. Коган, А.Я. Колебания пятислойной балки на упругом основании под действием подвижной динамической нагрузки [Текст] / А.Я. Коган, В.Ф.

Барабошин, В.М. Гаврилов // Механика деформируемого тела и расчет транспортных сооружений. Межвузовский сборник научных трудов. Новосибирский ордена трудового красного знамени институт инженеров железнодорожного транспорта. – Новосибирск, 1986. – С. 33–43.

 Лысюк, В.С. Влияние упругих прокладок на напряженно– деформированное состояние элементов пути [Текст] / В.С. Лысюк, В.Ф.
 Барабошин, Б.А. Евдокимов // Вестник ВНИИЖТ. – М., 1968. – № 6. – С. 44–47.

12. Барабошин, В.Ф. Основные параметры новой конструкции пути метрополитенов с повышенными виброзащитными свойствами [Текст] // Сб. трудов ВНИИЖТ. – М.: Транспорт, 1981. – № 630. – С. 26–53.

13. Варызгин, Е.С. Исследование неравномерности остаточных осадок щебеночного слоя [Текст] // Вестник ВНИИЖТ. – 1968. – №5. – С. 43–46.

14. Расчет и конструирование балластной призмы железнодорожного пути [Текст] // Сборник трудов ВНИИЖТ. Вып. № 387 под общей редакцией канд. техн. наук Е. С. Варызгина. – М. : Транспорт, 1970. – 190 с.

15. Варызгин, Е.С. Расчет сопротивления поперечному сдвигу по торцам шпал [Текст] // Вестник ВНИИЖТ. – М.: Трансжелдориздат, 1970. – № 8. – С. 35–37.

16. Варызгин, Е.С. Работа балластной призмы под поездной нагрузкой [Текст] // Содержание балластной призмы : под ред. Е.С. Варызгина. – М.:Транспорт, 1978. – С. 14–30.

17. Вериго, М.Ф. Основные положения методики расчета сил, действующих на железобетонные шпалы [Текст] // Тр. ЦНИИ МПС. – М. : Трансжелдориздат, 1963. – № 257. – С. 5–39.

18. Вериго, М.Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава и вопросы расчетов пути [Текст] / М.Ф. Вериго, А.Х. Ветченко, О.П. Ершков [и др.] // Труды Всесоюзного научно–исследовательского института железнодорожного транспорта. №97. – М.: Трансжелдориздат, 1955. – № 97. – 386 с.

19. Вериго, М.Ф. Основы методики статистической оценки прочности пути с учетом грузонапряженности [Текст] / М.Ф. Вериго, В.С. Лысюк // Труды ЦНИИ МПС. – М.: Транспорт, 1972. – № 466. – С. 51–67.

20. Волошко, Ю.Д. Особенности расчет пути на сплошном крупноблочном железобетонном основании [Текст] // Труды днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта. – 1960. – № 30. – С. 44–79.

21. Замуховский А.В. Совершенствование технологии укладки и текущего содержания безбалластного пути метрополитена [Текст] // дис. ... канд. тех. наук / Замуховский Александр Владимирович. – М.: МИИТ, 2006. – 144 с.

22. Ашпиз, Е.С. Обоснование нормативов деформативности подрельсового и подшпального оснований [Текст] / Е.С. Ашпиз, А.В. Замуховский // Мир транспорта . –2012. – №5. – С. 112–119.

23. Замуховский, А.В. Совершенствование технологии укладки и текущего содержания безбалластного пути метрополитена [Текст] : дис. ... канд. тех. наук / Замуховский Александр Владимирович. – М.: МГУПС, 2006. – 144 с.

24. Замуховский, А.В. Участки переменной жесткости на подходах к искусственным сооружениям [Текст] / А.В. Замуховский, А.В. Гречаник // Соискатель. Приложение к журналу Мир транспорта. – 2005. – № 2. – С. 100–105.

25. Замуховский, А.В. Экспериментальное обследование участков переменной жесткости [Текст] / А.В. Замуховский, К.В. Марченко // Мир транспорта. – 2013. – № 3. – С. 74–82.

26. Коваленко, Н.И. Критерий выбора конструкций пути для ВСМ [Текст] / Н.И. Коваленко, А.В. Замуховский, А.Н. Коваленко // Мир транспорта. – 2013. – № 4. – С. 88–94.

27. Замуховский, А.В. Оценка влияния неравножесткости бесстыкового пути в зоне сопряжения земляного полотна и искусственного сооружения на состояние ГРК [Текст] / А.В. Замуховский, А.В. Гречаник, К.В. Меренченко // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации земляного полотна железных дорог – С. 216–217.

28. Замуховский, А.В. Перспективы полигона безбалластного пути [Текст] // Мир транспорта. – 2013. – № 3. – С. 168–172.

29. Замуховский, А.В. О технико-экономической целесообразности применения железнодорожных эстакад вместо высоких насыпей [Текст] / А.В. Замуховский, В.А. Копыленко, В.М. Фридкин // Transport construction. – 2012. – № 10. – С. 15–18.

30. Замуховский, А.В. Перспективы полигона безбалластного пути [Текст] // Мир транспорта. – 2013. – № 3. – С. 168–172.

31. Коваленко, Н.Н. Критерий выбора конструкций пути для ВСМ [Текст] / Н.Н. Коваленко, А.В. Замуховский, А.Н. Коваленко // Мир транспорта. – 2013. – № 4. – С. 88–94.

32. Каменский, В.Б. Направления совершенствования системы ведения путевого хозяйства. – М.: ОАО НИИТКД, 2009. – 392 с.

33. Клименко, В.Я. Стабильность пути с малогабаритными рамами [Текст] // Путь и путевое хозяйство. – 1980. – № 7. – С. 28–31.

34. Клименко, В.Я. Результаты испытаний малогабаритных рам // железобетонного подрельсового основания Новое В исследовании железнодорожного пути. Труды ВНИИЖТ Вып. 362. – М.: Транспорт, 1968. – С. 12–16.

35. Клименко, В.Я. Вопросы расчета пути на блочном железобетонном подрельсовом основании // Новое в исследовании железнодорожного пути. Труды ВНИИЖТ Вып. 362. – М.: Транспорт, 1968. – С. 17–30.

36. Клименко, В.Я. Осадки пути с рамами. – 30 с.

37. Клименко, В.Я. Расчет элементов пути на блочном основании как составной трехслойной балки лежащей на упругом слое // Исследования элементов железнодорожного пути. Труды ЦНИИ МПС Вып. 407. – М.: Транспорт, 1970. – С. 3–13.

38. Клименко, В.Я. Расчет элементов пути на блочном основании как как система с n степенями свободы // Исследования элементов железнодорожного пути. Труды ЦНИИ МПС Вып. 407. – М.: Транспорт, 1970. – С. 15–22.

39. Клинов, С.И. Переходный путь [Текст] // Путь и путевое хозяйство. –
 1987. – № 7. – С. 27–27.

40. Клинов, С. И. Железнодорожный путь на искусственных сооружениях [Текст] / С.И. Клинов. – М.: Транспорт, 1990. – 144 с.

41. Клинов, С.И. Железнодорожный путь в тоннелях. Устройство и содержание [Текст] // Железнодорожный транспорт. Путь и путевое хозяйство. – М., 1986. – № 1. – 32 с.

42. Коган, А.Я. Об оценке повреждаемости рельсов контактноусталостными дефектами [Текст] / А.Я. Коган, А.Ю. Абдурашитов // Вестник ВНИИЖТ. – 2009. – № 12. – С. 14–15.

43. Коган, А.Я. Прогнозирование отказов рельсов по дефектам контактно– усталостного происхождения [Текст] / А.Я. Коган, А.Ю. Абдурашитов // Вестник ВНИИЖТ. – 2014. – № 4. – С. 3–7.

44. Коган, А. Я. Колебания пути при высоких скоростях движения экипажей и ударном взаимодействии колеса и рельса [Текст] / А.Я. Коган, Д.А. Никитин, И.В. Полещук // Труды ВНИИЖТ. – М.: Интекст, 2007. – 166 с.

45. Коган, А.Я. Расчет воздействия на путь колесной пары с ползуном [Текст] / А.Я. Коган, А.А. Верхотин // Сборник научных трудов. Исследования возможностей повышения скоростей движения поездов. – М.: Транспорт, 1984. – С. 30–37.

46. Коган, А.Я. Особенности расчета на прочность рельсов с трещинами [Текст] / А.Я. Коган, А.Ю. Абдурашитов // Сборник научных трудов. Повышение надежности верхнего строения пути : под ред. Л.Г. Крысанова. – М. : Интекст, 2000. – С. 21–32.

47. Коган, А.Я. Поперечные горизонтальные силы, действующие на железнодорожный путь в прямых участках [Текст] // Труды ВНИИЖТ : под ред. А.Я. Когана. – М. : Транспорт, 1979. – № 619. – 87 с.

48. Коган, А.Я. Вертикальные динамические силы действующие на путь [Текст] // Труды ЦНИИ МПС. – М.: Транспорт, 1969. – № 402. – 206 с.

49. Коган, А.Я. Безопасность эксплуатации бесстыкового пути по условию его выброса [Текст] / А.Я. Коган, А.В. Савин // Деп. ЦНИИ ТЭИ МПС. – 2002. – № 6374–жд.02. – 4 с.

50. Коган, А.Я. Оценка безопасности эксплуатации бесстыкового пути по условию выброса с учетом его фактического состояния [Текст] / А. Я. Коган, А. В. Савин // Вестник ВНИИЖТ. – 2003. – № 2. – С. 6–13.

51. Коган, А.Я. Разработка системы контроля безопасной эксплуатации бесстыкового пути по условию его устойчивости [Текст] / А.Я. Коган, А.В. Савин, Полищук, И.В. // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. Материалы третьей научно–практической конференции РГОТУПС 4–6 марта. – 2010. – С. 11–16.

52. Колос, А.Ф. Проблемы эксплуатации безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000 на железнодорожной магистрали [Текст] / А.Ф. Колос, Т.М. Петрова, А.А. Сидоренко // Техника железных дорог. – 2013. – № 2. – С. 42–47.

53. Колос, А.Ф. Особенности напряженного состояния грунтов подплитного основания при безбалластной конструкции верхнего строения пути [Текст] / А.Ф. Колос, А.А. Сидоренко, С.В. Соловьев //

54. Коншин, Г.Г. Больше внимания земляному полотну на подходах к мостам [Текст] / Г.Г. Коншин, М.Б. Волковицкий, Е.В. Яковлева // Путь и путевое хозяйство. – 1993. – № 11. – С. 16–17.

55. Коншин, Г.Г. Напряжения и упругие деформации в земляном полотне под воздействием поездов [Текст] / Г.Г. Коншин, В.П. Титов, В.И. Хромов [и др.] // Труды ЦНИИ МПС, вып. 460. – М.: Стройиздат, 1972. – 125 с.

56. Коншин, Г.Г. Работа земляного полотна под поездами [Текст] : учеб. пособие. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. – 208 с.

57. Организация и механизация путевых работ [Текст] / под ред. Г.М. Шахунянца : Труды МИИТа. – М.: Транспорт, 1969. – № 298. – 105 с.

58. Кравченко, Н.Д. Путь с лежневым основанием [Текст] // Путь и путевое хозяйство. – 1991. – № 9. – С. 18–19.

59. Кравченко, Н.Д. Конструкция пути для метрополитенов [Текст] // Некоторые проблемы механизации работ и надежности устройств на метрополитенах. Труды ВНИИЖТ Вып. № 611. – М.: Транспорт, 1979. – С. 65–70.

60. Кравченко, Н.Д. Содержание и ремонт виброзащитного пути [Текст] // Путь и путевое хозяйство. – 1992. – № 4. – С. 23–25.

61. Кравченко, Н.Д. Путь с железобетонными лежнями, замоноличенными в путевой бетон [Текст] / Н.Д. Кравченко, Ю.Е. Крук, К.А. Кученков [и др.] // Метро. – 1993. – № 1. – С. 17–21.

62. Кравченко, Н.Д. Новые конструкции железнодорожного пути для метрополитенов [Текст]. – М.: Транспорт, 1994. – 143 с.

63. Кравченко, Н.Д. Новые конструкции железнодорожного пути для метрополитенов [Текст] : дис. ... док. тех. наук / Кравченко Николай Дмитриевич. – М.: ВНИИЖТ, 1998. – 403 с.

64. Круглов, В.М. Выбор типа верхнего строения пути для метрополитенов [Текст] / В.М. Круглов, Н.Д. Кравченко, Ю.Н. Аксенов [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2010. – № 5. – С. 26–29.

65. Кочур, А.Г. Оценка возможности обнаружения горизонтального подповерхностного слоя грунта с иным удельным сопротивлением методом вертикального электрического зондирования [Текст] / А.Г. Кочур, З.С. Лапченкова, В.А. Явна // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 1. – С. 108–113.

66. Кочур, А.Г., Лапченкова, З.С., Попов, В.А., Окост, М.В. Исследование влияния контрастности удельного сопротивления слоев грунта и глубины границы между слоями на кривые вертикального электрического зондирования // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 4. – С. 101–106.

67. Крачковский, В.П. Влияние начальной осадки шпалы на статические и динамические прогибы рельсов и напряжения в них [Текст] // Труды МИИТа. Вып. VIII. – М., 1928. – С. 257–374.

68. Влияние жесткости и неровностей пути на деформации, вибрации и силы взаимодействия его элементов [Текст] // Труды ЦНИИ МПС вып. №370; под редакцией В. С. Лысюка. – М.: Транспорт, 1969. – 168 с.

69. Лысюк, В.С. Управление надежностью бесстыкового пути [Текст] / В.С. Лысюк, В.Т. Семенов, В.М. Ермаков [и др.] // под ред. В.С. Лысюка. – М.: Транспорт, 1999. – 373 с.

70. Лысюк, В.С. Интенсивность использования и прочность пути [Текст] // Технико–экономический журнал. Железнодорожный транспорт. – 1973. – № 2. – С. 63–68.

71. Лысюк, В.С Принципы определения необходимой прочности пути с учетом интенсивности его использования [Текст] // Труды ЦНИИ МПС, Вып. № 501. – М.: Транспорт, 1973. – С. 179–203.

72. Марготьев, А.Н. Расчет предельного давления шпалы на балласт из условий прочности основной площадки земляного полотна [Текст] // Сб. Расчет и конструирование балластной призмы железнодорожного пути. Труды ЦНИИ. – 1970. – № 387. – С. 113–120.

73. Коновалов, П.И. Экспериментальное исследование условий стабилизации элементов пути [Текст] / П.И. Коновалов, Л.М. Ливиненко, В.И. Бессонов, А.Н. Марготьев и др. // Вестник ВНИИЖТ. – 1973. – № 1. – С. 32–37. 74. Марготьев, А.Н. Технико-статистический анализ материалов экспериментальных исследований работы пути [Текст]. – М. : Транспорт, 1977. – 46 с.

75. Мелентьев, Л.П. Особенности работы рельсов в тяжелых условиях эксплуатации [Текст] // Труды ВНИИЖТ. – 1970. – № 428. – 232 с.

76. Мелентьев, Л.П. Об оптимальном соотношении механических свойств элементов верхнего строения пути [Текст] // Труды ЦНИИ МПС, Вып. №501; под ред. В.Г. Альбрехтаю – М.: Транспорт, 1973. – С. 32–42.

77. Мелентьев, Л.П. Работа железнодорожного пути при обращении грузовых поездов со скоростями 90–100 км/ч [Текст] / Л.П. Мелентьев, В.Н. Стельмашов // Труды ВНИИЖТ, Вып. № 614; под ред. Л.П. Мелентьева, В.Н. Стельмашова. – М.: Транспорт, 1979. – 81 с.

78. Певзнер, В.О. Оценка деформативности пути в местах расстройств и возможных изменений в сроках выправки при повышении осевой нагрузки грузовых вагонов [Текст] / В.О. Певзнер, С.С. Надежин, А.В. Анисин [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. – 2013. – № 4. – С. 44–47.

79. Певзнер, В.О. Влияние защитных слоев на планово–предупредительную выправку [Текст] / В.О. Певзнер [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2008. – № 10. – С. 14–16.

80. Певзнер, В.О. Влияние жесткости подбалластного основания на упругие осадки и нагруженность пути [Текст] / В.О. Певзнер [и др.] // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: труды 3-й Научно-технической конференции с международным участием ОАО «РЖД». – МИИТ, 2006. – С. 120–122.

81. Певзнер, В.О. Путь и повышенные осевые нагрузки вагонов [Текст] /
В.О. Певзнер, О.Ю. Белоцветова, И.Б. Петропавловская [и др.] //
Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 4. – С. 55–58.

82. Певзнер, В.О. Состояние железнодорожного пути и установление скоростей движения [Текст] : дис. ... док. тех. наук / Познер Виктор Ошерович. – М.: ВНИИЖТ, 1991. – 331 с.

83. Кочергин, В.В. Влияние одноточечного и двухточечного контакта колес и рельсов на нагружение рельсовых скреплений [Текст] / В.В. Кочергин, И.Н. Максимов, В.О. Певзнер // Вестник ВНИИЖТ. – 2009. – № 3. – С. 3–8.

84. Певзнер, В.О. Перспективные методы оценки стабильности пути на основе результатов научных исследований воздействия на инфраструктуру тяжеловесных поездов, в том числе с вагонами, имеющими осевую нагрузку 25 т/ось и 27 т/ось [Текст] // Презентация.

85. Першин, С.П. Приближенная статистическая оценка влияния неравножесткости пути на характеристики его напряженно–деформированного состояния [Текст] // Вестник ВНИИЖТ. – 1971. – №5–6. – С.7–10.

86. Прокудин, И.В. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна из глинистых грунтов, воспринимающих вибродинамическую нагрузку [Текст] : дис. ... док. тех. Наук / Прокудин Иван Васильевич. – Л., 1983. – 458 с.

87. Шаповалов, В.Л. Расчет конструкции сопряжения участков пути с различной жесткостью [Текст] / В.Л. Шаповалов, Г.И. Лазоренко, В.А. Явна [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2013. – № 12. – С. 12–15.

88. Кругликов, А.А. Диагностика объектов транспортной инфраструктуры методом георадиолокации [Текст] / А.А. Кругликов, К.Ю. Кислица, В.Л. Шаповалов [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 4. – С. 148–154.

89. Кругликов, А.А. Компьютерное моделирование распространения акустических колебании в насыпях железных дорог [Текст] / А.А. Кругликов, Г.И Лазоренко, В.Л. Шаповалов [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 3. – С. 135–140.

90. Кругликов, А.А. Оценка динамического воздействия подвижного состава на высокие насыпи [Текст] / А.А. Кругликов, Г.И. Лазоренко, З.Б. Хакиев [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2013. – № 5. – С. 19–23.

91. Явна, В.А. Оценка динамического воздействия подвижного состава на объекты железнодорожной инфраструктуры [Текст] / В.А. Явна, А.А. Кругликов,
3.Б. Хакиев [и др.] // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2014. – № 2 (26). – С. 33–35.

92. Шахунянц, Г.М. К вопросу о сравнении вариантов конструкций // Вестник ВНИИЖТ. – М.: Трансжелдориздат, 1958. – № 6. – С. 37–40.

93. Щепотин, К.И. Влияние жесткости шпалы и неравно–упругости пути на величину контактного эффекта [Текст] // Вопросы устройства и работы железнодорожного пути: сб. науч. тр.. Новосибирский институт инженеров железнодорожного транспорта. – Новосибирск, 1966. – № 58. – С. 73–86.

94. Щепотин, К.И. О перераспределении давления на шпалы при наличии неравноупругости пути [Текст] // Вопросы устройства и содержания пути: сб. науч. тр. Вып. №74. Новосибирский институт инженеров железнодорожного транспорта. – Новосибирск, 1969. – С. 42–47.

95. Bastin, R. Development of German non–ballasted track forms [Text] // ICE. – UK.– 2005.

96. Em.o. Prof. Dr.–Ing. J. Eisenmann, Univ.–Prof. Dr.–Ing. habil. G. Leykauf Feste Fahrbahn fur Schienenbahnen. Sonderdruck aus Beton Kalenltr.– Berlin, 2000.

97. Esveld, C. Evaluating track structures: Life Cycle Cost Analysis as a Structured Approach [Text] / A. Zoeteman, C. Esveld // Delft University of Technology. World Congress on Railway Research. – Tokyo, 1999. – P. 1–9.

98. Esveld, C. Modern Railway Track, Second Edition [Text] // Delft University of Technology, 2001. – P. 12–26.

99. Esveld, C. Recent developments in slab track [Text] // Delft University of Technology, 2003. – P.10–13.

100. Esveld, C. Innovations in railway track. TU Delft [Eletronic resource]. URL: http://www.inrailroad.com (Дата обращения 12.10.2014).

101. Nigel, O. Innovative Track Systems Criteria for their Selection. Project funded by the European Community, Directorate General Energy and Transport Under the 'Competitive and Sustainable Growth' Programme [Text] / O. Nigel, Q. Franz. // ProMain. TÜV Intertraffic, Cologne. Oct. -2001.-43 p.

102. Freudenstein, S. / S. Freudenstein, M. Romstötter // International Railway Journal. – 2004. – № 5. – P. 44, 46.

103. Giannakos, K. Requirements of tomorrow's rail transport infrastructure [Text] // Vossloh AG 2nd traffic and transportation conference, OSE. Sep. – 2004. – P. 8–12.

104. Kaewunruen, S. Dynamic properties of railway track and its components : a state–of–the–art review [Text] / S. Kaewunruen, A. Remennikov // University of Wollongong. Research Online, NY, 2008. – 35 p.

105. Kocan, D. Reparaturverfahren für Feste Fahrbahn Systeme //Veroffentlichung El Kalender. – 2004. – P. 1–16.

106. Lichtberger B. Track compendium, First edition [Text] // Eurail Press, 2005. - P. 32-35.

107. Lukas Moravec. Auswirkungen von Achslast--und Geschwindigkeitserhöhungen auf den bestehenden Eisenbahnunterbau [Text] // Diplomarbeit, Germany 2011, -63 s.

108. Moravec, L. Auswirkungen von Achslast-und Geschwindigkeitserhöhungen auf den bestehenden Eisenbahnunterbau [Text] // Diplomarbeit. – Germany, 2011. – 63 s.

109. Michas, G. Slab Track Systems for High–Speed Railways [Text] // Division of Highway and Railway Engineering. Department of Transport Science School of Architecture and the Built Environment. Royal Institute of Technology. – Stockholm, 2012. – P. 25–27.

110. Schilder, R. Installation Quality of Slab Track – A Decisive Factor for Maintenance [Text] / R. Schilder, D. Diederich // RTR Special. – Austria: July 2007. – P. 76–78.

111. Sunil K. Kondapalli & David N. Billow. Life Cycle Benefit of Concrete Slab Track. SN2860, Portland Cement Association, Skokie, Illinois. – USA, 2008.

112. Hettler, A. Bleibende Setzungen des Schotteroberbaus [Text] // ETR– Eisenbahntechnische Rundschau Nll. Bd. 33. – 1984. – P. 847 – 852, 854.

113. Henn, W. Auswirkung von Oberbauform und Betriebsbelastung auf die VeranderungderGleishoherlage [Text] / Diss. Dokt. Ing. Fachbereich Bauing und Vermessungsw. Techn. Univ. Munchen. – 1978. – р. 119 // Экспресс–информация. Путь и строительство железных дорог, Реф. 224, 1979.

114. Hans–Joerg Terno. Deutsche Bahn AG Sate of the art review of mitigation measures on trac [Text]. -2011. - 30 p.

115. Wang, P. Analysis on the effect of cracks of CRTS II Slab Track on subgrade [Text] / P. Wang, R. Chan // Journal of Southwest Jaiotong University. – China, 2012,. – No 47 (6). – P. 929 – 934.

116. Wang, S. Causes of crack in ballastless track and control measure [Text] / S. Wang, R. Yang // Railwayconstraction . – China, 2007. – N_{2} 9. – P. 76 – 79.

117. Wei, J., Ban X. Analysis on the effect of cracks of CRTS II Ballastless track structure system induced by temperature [Text] / J. Wei, X. Ban // Journal of Wuhan University of Tecnology. – China, 2012. – $N_{234}(10)$. – P. 80 – 85.

118. Jang, S.. Development of prefabricate concrete slab track system and trial installation on revenue line [Text] / S. Jang, H. Lee // Korea railroad research institute. – South Korea: Uiwang, 2008. – 68 p.

119. Специальные технические условия для проектирования безбалластной конструкции железнодорожного пути на участке Саблино–Тосно Октябрьской железной дороги [Текст] / Согласованы Заместителем руководителя ГОССТРОЯ Мурашовым Б.М., 2013: Утверждены Вице–президентом ОАО "РЖД" Целько А.В. – 2013. – 27 с.

120. Подрельсовое основание безбалластного пути RHEDA 2000 [Текст] // Программа и методика подконтрольной эксплуатации продукции. Утверждена: Вице президент ОАО "РЖД" В.Б. Воробьев. – М., 2013. – 23 с.

121. Научно-технический отчет об испытаниях безбалластного пути RHEDA на Экспериментальном кольце и на перегоне Саблино-Тосно 46 км Октябрьской железной дороги. Тема 10.2.029.Р Испытания безбалластной конструкции железнодорожного пути [Текст] // Дело договора № 1018/11/696. – М., 2011 – 42 с.

122. Специальные технические условия для проектирования безбалластной конструкции железнодорожного пути с пониженной вибрации [Текст] // Согласованы Вице президент ОАО "РЖД" В.Б. Воробьев. – М., 2011. – 18 с.

123. Совмещенная (автомобильная и железная) дорога Адлер– Горноклиматический курорт Альпико–сервис со строительством сплошного второго железнодорожного пути на участке Сочи–Адлер–Веселое [Текст] // Специальные технические условия. – 2011. – 22 с.

124. Инструкция по эксплуатации безбалластной конструкции верхнего строения пути по технологии LVT (Low Vibration Track) [Текст] // Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 27.02.2015 №513р. – М., 2015. – 27 с.

125. Научно–технический отчет об испытаниях безбалластного пути LVT на Экспериментальном кольце и в тоннелях 6 и 7 Альпико–Сервис. Тема «Оценка эффективности и эксплуатационных параметров безбалластной конструкции верхнего строения пути по технологии LVT (Low Vibration Track). Рекомендации и сферы применения конструкции для пути, мостов и тоннелей» [Текст] // Дело договора № 3508/11 от 27.07.2011. – М., 2011. – 35

126. Научно–технический отчет об испытаниях безбалластных конструкций пути четырех типов (Tines, Alstom, MaxBogl, LVT). Тема 6.049.РТП "Испытания элементов инфраструктуры для высокоскоростного движения на Экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ" [Текст] // Дело договора №1057/14/990 от 04.12.2014. – М., 2014. – С. 56. –100.

127. Программа и методика сравнительных полигонных испытаний безбалластных конструкций пути (БКП) четырех типов (Tines, Alstom, MaxBogl, LVT) включая сбор данных о трудозатратах на текущее содержание [Текст] // Утверждена: Начальником центра организации скоростного и высокоскоростного движения ОАО «РЖД» Петрушенко Г.В. 19.12.2014 г. – М., 2014. – 32 с.

128. Опыт разработки и эксплуатации безбалластного пути [Текст] // Железные дороги мира. – 2005. – № 1. – С.68–71.

129. Высокоскоростные линии с путем на балласте [Текст] // Железные дороги мира. – 2014. – № 3. – С. 69–71.

130. Фришман, М. Экспериментальное определение жесткостей и неупругих сопротивлений пути [Текст] / М.А. Фришман, Л.Я. Воробейчик, Р.С. Липовский // Вестник ВНИИЖТ. – М., 1970. – № 8. – С. 31–34.

131. Евдокимов, Б.А. О неравномерности накопления остаточных деформаций пути [Текст] // Научно–технический и производственный журнал Транспортное строительство. – М., 1970. – № 10. – С. 4–5.

132. Шафрановский, А.К. Закономерности неравномерных осадок пути [Текст] // Вестник ВНИИЖТ. – М., 1958. – № 5– С. 34–37.

133. Попов, С.Н. О допускаемых напряжениях на балласт [Текст]// Труды
 ВНИИЖТ. – М.:Транспорт, 1955. – № 97. – С. 353–385.

134. Применение подшпальных подкладок для снижения вибрации [Текст] //Железные дороги мира. М., 2013. – № 2. – С. 75–77.

135. Лихтбергер, Б. Справочник «Железнодорожный путь» [Текст] // DVV Media Group GmbH I Eurailpres. – Гамбург, 2010. – 432 с.

136. Савин, А. В. Критерии выбора конструкции безбалластного пути. [Текст] // Путь и путевое хозяйство. – М., 2014. – № 2. – С. 2–8.

137. Савин, А.В. Выбор конструкции пути для высокоскоростного движения. [Текст] // Вестник ВНИИЖТ. – М., 2014. – № 1. – С. 55–59.

138. Путь на жестком основании [Текст] // Железные дороги мира. М., 2000.
 - № 12. - С. 55–58.

139. Широкие шпалы [Текст] // Железные дороги мира . – 2000. – № 7. – С. 66–68.

140. Сайт компании Rhomberg [Электронный ресурс]. URL: http://www.rhombergrail.com (Дата обращения 09.02.2016).

141. Сайт производителей лежневого основания для трамваев [Электронный ресурс]. URL: http://www.strunbet.pl Дата обращения (02.03.2016).

142. Лежневый путь на балласте и перспективы его применения [Текст] // Железные дороги мира. – М., 2001. – № 10. – С.61–65.

143. Применение жесткого основания при реконструкции пути [Текст] // Железные дороги мира. – М., 1999. – № 2. – С.64–68.

144. Укладка Ү-образных стальных шпал поточным методом [Текст] // Железные дороги мира. – М., 2003. – № 11. – С. 69–70.

145. Риссбергер, К. Балластный путь на рамных шпалах [Текст] // Железные дороги мира. – М., 2004. – № 3. – С. 61–69.

146. Путь на рамных шпалах [Текст] // Железные дороги мира. – М., 2002. – № 9. – С. 60–64.

147. Путь на плитном основании в Германии [Текст] // Железные дороги мира. – М., 2006. – № 4. – С. 64–67.

148. Афанасьев, В.Ф. Стрелочные переводы на блочном основании [Текст] / В.Ф. Афанасьев, А.И. Малицкая, Р.Ф. Самфирова. – М.: Транспорт, 1966. – 31 с.

149. Семенюк, И.С. Малогабаритные рамы проходят испытания [Текст] /
И.С. Семенюк [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – М., 1971. – № 5. – С. 5–7.

150. Historic data on track geometry in relation to maintenance [Text] // Rail Engineering International Edition. – 1988. – № 2. – S. 16–19.

151. Чернышев, М.А. Практические методы расчета пути [Текст] / М.А. Чернышев. – М.: Транспорт, 1967. – С. 80–117.

152. Shenton, M. Ballast deformation and track deferioration track technol [Text] / Proc. Conf. Noftinghen, 11–13, July, 1981. – London, 1985. – Р. 253–265, 267–279 // Экспресс–информация. Путь и строительство железных дорог. – 1986. – № 43.

153. Хействер, Б. О допускаемых напряжениях на землянное полотно [Текст] /Б.Д. Хействер // Труды ВНИИЖТ, Вып. №97. – М.: Трансжелдориздат, 1955. – С. 386–410.

154. Пешков, П. Об усилении рабочей зоны земляного полотна [Текст] /
 П.Г. Пешков [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – М., 2007. – № 9. – 13 с.

155. Белоцветова, О.Ю. Деформационные характеристики стендовой насыпи Экспериментального кольца ВНИИЖТ [Текст] / О.Ю. Белоцветова, В.В. Третьяков, А.В. Козлов // Развитие железнодорожного транспорта в условиях реформирования: сб. статей ученых и аспирантов ВНИИЖТ. – М.: Интекст, 2006. – С. 58–61.

156. Пешков, П. Об усилении рабочей зоны земляного полотна при изменении режима эксплуатации пути [Текст] / П.Г. Пешков [и др.] // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации земляного полотна и искусственных сооружений: труды 2–ой Научно– технической конференции с международным участием ОАО «РЖД», МИИТ. – 2005. – С. 177–179.

157. Соловьев, В.П. и др. Моделирование процесса накопления остаточных деформаций пути с использованием супер ЭВМ [Текст] / В.П. Соловьев [и др.] // Фундаментальные исследования для долгосрочного развития железнодорожного транспорта: сб. трудов членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – М.: Интекст, 2013. – С. 185–192.

158. Ермаков, В.М. Комплексная система реализации ресурсосбережения в современных условиях работы железнодорожного пути [Текст] : дис. ... док. тех. наук : ПГУПС / Ермаков Виктор Михайлович. – М., 2000. – 435 с.

159. Лой, Х. Прокладки из полиуретана защищают трассы с движением большегрузных поездов [Текст] / Х. Лой, А. Аугустин // Railway Gazette International, сентябрь. – 2014. – С.105–108.

160. Сидоренко, А.А. Научное обоснование требований к подплитному основанию монолитного безбалластного пути, обеспечивающих

трещиностойкость несущей плиты под поездной нагрузкой [Текст] : дис. ... канд. тех. наук, ПГУПС / Сидоренко Александр Андреевич. – СПб, 2014. – 143 с.

161. Третьяков, В.В. Влияние характеристик подбалластного основания на интенсивность накопления расстройств пути в вертикальной плоскости [Текст] : дис. ... канд. техн. наук., ОАО "ВНИИЖТ" / Третьяков Василий Владимирович. – Москва, 2008. – 163 с.

162. Bezin, Y. The dynamic response of slab track constructions and their benefit with respect to conventional ballasted track [Text] / Y. Bezin, D. Farrington, C.Penny // Taylor & Francis. Manchester, UK. November. – 2010.

163. Dr.–Ing. Edgar Darr Dipl.–Ing. (FH) Werner Fiebig. Konstruktion und Bauarten für Eisenbahn und Straßenbahn [Text] // VDEI–Schriftenreihe. Verband Deutscher Eisenbahn–Ingenieure e.V. (VDEI) Feste Fahrbahn. – 2010. – 272 p.

164. Виброизоляция тоннеля на новой линии Цюрих – Тальвиль [Текст] // Железные дороги мира. – 2008. – № 6. – С. 66–71.

165. Путь на жестком основании и меры по защите от шума [Текст] // Железные дороги мира. – 1999. – № 5. – С. 65–67.

166. Программа борьбы с шумом на железных дорогах Швейцарии [Текст] // Железные дороги мира. – 2013. – № 5. – С. 53–57.

167. Борьба с шумом: новые технические решения [Текст] // Железные дороги мира. – 2014. – № 5. – С. 69–75.

168. Системная оценка мероприятий по защите от шума [Текст] // Железные дороги мира. – 2013. – № 6. – С. 72–77.

169. Инновационные методы снижения уровня шума [Текст] // Железные дороги мира. – 2011. – № 10. – С. 66–71.

170. Снижение уровня шума за счет непрерывного опирания рельсов [Текст] // Железные дороги мира. – 2008. – № 5. – С. 76–77.

171. Малошумный путь [Текст] // Железные дороги мира. – 2002.– № 9. – С. 60–64.

172. Новые типы безбалластного пути [Текст] // Железные дороги мира. – 1999. – № 12. – с.

173. Путь на жестком основании системы Crailsheim [Текст] // Железные дороги мира. – 2000. – № 8. – С. 65–66.

174. Новое в конструкции балластного пути [Текст] // Железные дороги мира. – 2010. – № 9. – С. 49–61.

175. D. J. Round. Non – ballasted tracks [Text] // Track Technology Course, British Rail Research. UK, 1993. – 12 p.

176. Engenharia Civil. Long-term behaviour of railway transitions under dynamic loading. Application to soft soil sites [Text] // José Nuno Varandas da Silva Ferreira. Mestre em Engenharia de Estruturas « Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em », Fevereiro. – 2013. – 182 p.

177. Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения [Текст] // Конструкция и содержание железнодорожной инфраструктуры ; под ред. С.М. Захарова : (Стоимость жизненного цикла Стивен Х. Моррелл, Майкл Н. Армстронг). – М., 2012. – С. 97–128.

178. Mechanical Behaviour of Traditional and Antivibration Railway Tracks with Recycled Rubber Materials [Text] // Concetta Onorii. Università degli studi di napoli Federico II. Facoltà di Ingegneria. Tesi di dottorato. Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei materiali e delle strutture Coordinatore prof. Domenico acierno XX ciclo, – Italy. – 220 c.

179. Выберите технологию будущего сегодня [Текст] // RTR Россия. Железнодорожное техническое обозрение, Октябрь. – 2012. – 72 с.

180. Барберон М. Модернизация линии Жисор – Серке: возврат к конструкции пути на плитном основании [Текст] // La Vie du Rail. – Франция, 2013. – № 3440. – С. 4–7.

181. Новый путь: безбалластный, модульный, быстровозводимый железнодорожный путь с использованием наноструктурированных материалов [Текст] // Новый проект. – М., 2011. – 27 с.

182. Испытания пути в Готардском тоннеле [Текст] // Железные дороги мира. – 2015. – № 5. – С. 75–80.

183. Безбалластный путь. Конструкция безбалластного пути OBB-Рогг [Текст] // Железные дороги мира. – 2013. – № 4. – С. 70–74.

184. Технологические новшества при строительстве и обустройстве Лечбергского базового тоннеля [Текст] // Железные дороги мира. – 2008. – № 3. – С. 67–72.

185. Материалы научно-технической конференции строительного комплекса ОАО «РЖД» [Текст] // Деловой журнал РЖД-партнер. Специальный Вып., март. – 2012. – с. 16–36.

186. Патент 2425188 Российская Федерация, МПК Е01В1/00, Е01В2/00, Е01В3/00, Е01D1/00, Е01D2/00. Безбалластный путь [Текст] / заявитель и патентообладатель Стасюлевич Ф. И., Андреев А. В.; заявл. 10.12.08; опубл. 27.07.11. – 10 с.

187. Опыт разработки и эксплуатации безбалластного пути [Текст] // Железные дороги мира. – 2005. – № 1. – С. 68–71.

188. Савин, А.В. Безбалластный путь [Текст] / А.В. Савин. – М. : РАС, 2017. – 192 с.

189. Сайт компании Consolis [Электронный ресурс]. URL: http://www.consolis.com (Дата обращения 04.05.2016)

190. Путь на бетонном основании с упругими шпалами [Текст] // Железные дороги мира. – 2003. – № 9 – С. 55–59.

191. Липко, Ц. Безбалластные системы верхнего строения пути [Текст] // Путь и путевое хозяйство. – 2012. – № 1. – С. 25–26.

192. Савин, А.В. Экспериментальное кольцо: укладка новых конструкций пути [Текст] / А.В. Савин // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 2. – С. 12–15.

193. Савин, А.В. Испытания безбалластных конструкций пути [Текст] / А.В. Свин, А.В. Петров, К.И. Третьяков // Техника железных дорог. – 2016. – № 5. – С. 28–38.

194. Сайт компании Tines [Электронный ресурс]. URL: http://www.tinesrussia.ru (Дата обращения 04.05.2016).

195. Войцех, О. Виброизоляционные технологии в безбалластных конструкциях пути [Текст] // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации землянного полотна железных дорог. Конференция МИИТ, Заседание 1. – 2011. – С. 33–39.

196. Baxter, M. Railway Gazette International. – 2010. – № 98. – P. 36–41.

197. Сайт компании WeghGroup [Электронный ресурс]. URL: http://www.weghgroup.com (Дата обращения 04.05.2016)

198. Егорова, Т.Н. Безбалластная конструкция верхнего строения пути в тоннелях по технологии LVT [Текст] / Т.Н. Егорова // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации земляного полотна железных дорог. Конференция МГУПС (МИИТ). – Москва, 2011, – С. 251–256.

199. Савин, А. Опыт укладки и эксплуатации безбалластного пути LVT [Текст] / А.В. Савин // Путь и путевое хозяйство. – 2013. – № 5. – С. 31–34.

200. Испытания пути в Готардском тоннеле [Текст] // Железные дороги мира. – 2015. – № 5. – С. 75–80.

201. Безбалластный путь Bogl [Текст] // Железные дороги мира. – 2001. – № 11.

202. Жесткое основание пути типа Bogl – первый опыт укладки на участке большой протяженности [Текст] // Железные дороги мира . – 2006. – № 1. – С. 65–69.

203. Плитное основание пути системы Bogl на новой линии Нюрнберг – Ингольштадт [Текст] // Железные дороги мира. – 2006. – № 12. – С. 63–65.

204. Сборные плиты в пути на жестком основании [Текст] // Железные дороги мира. – 1999. – № 8. – С. 62–64.

205. Малозатратный безбалластный путь NBT Альстом [Текст] // Железные дороги мира. – 2014. – № 1. – С.64–66.

206. APPITRACR метод укладки пути на бетонных плитах [Текст] // Железные дороги мира. – 2015. – № 6. – С. 76–77.

207. Безбалластный путь по технологии NBT [Текст] // Железные дороги мира. – 2015. – № 12. – С. 58–62.

208. Инновационный безбалластный путь системы NBU [Текст] // Железные дороги мира. – 2007. – № 3. – С. 74–75.

209. Куами, С. Новый тип конструкции безбалластного пути "Система NFF" [Текст] // RTR Russia Edition. October. – 2012. – Р. 9–12.

210. Dieter, P. Ballastless track systems experiences gained in Austria and Germany [Text] / D. Pichler // FCP Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH Diesterweggasse 3, 1140. – Vienna Austri:. Jörg Fenske, Porr Bau GmbH. – 19 p.

211. Конструкция безбалластного пути OBB–Porr [Текст] // Железные дороги мира. – 2013. – № 4. – С. 70–74.

212. Ермаков, В.М. Опытный полигон на линии Санкт–Петербург – Москва [Текст] / В.М. Ермаков, Э.Д. Загитов // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 5. – С. 2–5.

213. Третьяков, В.В. Безбалластная конструкция RHEDA. Использование безбалластных конструкций на железных дорогах России [Текст] / В.В. Третьяков, О.Ю. Белоцветова, И.Б. Петропавловская [и др.] // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации земляного полотна железных дорог. Конференция МГУПС (МИИТ). – Москва, 2011. – С. 65–69.

214. Безбалластный путь на линии Кельн – Рейн/Майн [Текст] // Железные дороги мира. – 2002. – № 6. – С. 69–72.

215. Савин, А.В. Участки переменной жесткости для безбалластного пути [Текст] / А.В. Савин // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 8. – С. 2–6.

216. Савин, А.В. Исследования безбалластной конструкции верхнего строения пути [Текст] / А.В. Савин, А.М. Бржезовский, В.В. Третьяков [и др.]// Вестник ВНИИЖТ. – 2015. – № 6. – С. 23–32.

217. Внедрение новых кострукций безбалластного пути [Текст] // Железные дороги мира. – 2007. – № 2. – С. 70–73.

218. Савин, А.В. Выбор конструкции безбалластного пути [Текст] / А.В. Савин // Проблемы проектирования, строительства, диагностики и технического содержания объектов железнодорожного транспорта. Материалы Всероссийской научно–практической конференции (г. Чита, 24 октября – 15 ноября 2013 г.). – 2013. – С. 19–25.

219. Ando, K. Development of Slab Tracks for Hokuriku Shinkansen Line [Electronic resource] / K. Ando, M. Sunaga, H. Aoki, O. Haga // QR of RTRI, 2001. Vol. 42. No. 1, Mar. P. 35–41. URL: (дата обращения 20.12.2016 г). https://www.jstage.jst.go.jp/article/rtriqr/42/1/42_1_35/_pdf.

220. Савин, А.В. Безбалластные конструкции пути на Экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ» [Текст] / А.В. Савин // Проблемы инфраструктуры транспортного комплекса: материалы Международной научно–практической конференции «Проблемы инфраструктуры транспортного комплекса» (Санкт– Петербург, 30 сентября – 10ктября 2015 года) : под ред. А.В. Петряева. – СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. – С.48–51.

221. Савин, А.В. Условия проведения испытаний на Экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ» [Текст] / А.В. Савин // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений (по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» 7–9 октября 2014 г.): Сборник научных докладов. – Санкт–Петербург: ОАО «УИМ», 2015. – С. 305–307.

222. Гусаков, В.И. Современные методы и средства испытания элементов инфраструктуры и подвижного состава [Текст] / В.И. Гусаков, А.В. Савин // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 4. – С. 69–71.

223. Укладка стрелочного перевода проекта 2750 на сплошное подрельсовое основание (конструкция безбалластного строения пути с пониженной вибрацией) по технологии LVT [Текст] // Опытный технологический процесс. Утвержден

Первым заместителем генерального Директора ОАО «РЖДстрой» Н. Талашкиным. – 2012. – 56 с.

224. Сайт компании Alstom [Электронный ресурс]. URL: http://www.transport.alstorn.com (Дата обращения 03.01.2016)

225. Малозатратный безбалластный путь [Текст] // Железные дороги мира. – 2014. – № 1. – С. 64–66.

226. Савин, А.В. Безбалластный путь и его основание [Текст] / А.В. Савин, П.И. Дыдышко // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 12. – С. 39–41.

227. Дыдышко, П.И. Усиление пути добавками полифилизаторов [Текст] / П.И. Дыдышко, С.В. Ольхина, Ю.А. Веселов // Путь и путевое хозяйство. – 2013. – № 9. – С. 9–12.

228. Kang, Y. A Study of Track and Train Dynamic Behavior of Transition Zone Between Concrete Slab Track and Ballasted Track [Electronic resource] // Korea Railroad Research Institute, Uiwang, South Korea; Sampyo E&C, Seoul, South Korea. URL: http://www. KoreaRailroad.com (Дата обращения 09.12.2015).

229. Research Results Digest 79 [Electronic resource] // URL: http://www.road2000.com (Дата обращения 12.10.2014).

230. Luís Miguel Gouveia Coelho Structure/Embankment Transitions in Railway Infra–structures [Electronic resource] // Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico. URL: http://www.road2000.com (Дата обращения 12.10.2014).

231. Vale C., Ribeiro N., Calc, ada R. and Delgado R.1 Dynamics of a precast system for high-speed railway tracks [Electronic resource] // URL: <u>http://congress.cimne.com/eccomas/proceedings/compdyn2011/compdyn</u> 2011 full/405.pdf // (Дата обращения 05.05.2017).

232. Chen, R. Experimental study on dynamic load magnification factor for ballastless track-subgrade of high-speed railway [Electronic resource] / R. Chen, X. Zhao, Z. Wang, H. Jiang, X. Bian // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Volume 5, Issue 4, August 2013. – P. 306–311. URL:

<u>http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/</u> S1674775513000668 (Дата обращения 05.05.2017).

233. Blanco–Lorenzo, J. Dynamic comparison of different types of slab tracks and ballasted track using a flexible track model [Electronic resource] / J. Blanco– Lorenzo, J. Santamaria, E.G. Vadillo, O. Oyarzabal // Department of Mechanical Engineering, University of the Basque Country. Alameda Urquijo s.n., 48013 Bilbao, Spain. – URL: https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/5383/ Dynamic_comparison_of_different_types_of_slab_track_and_ballasted_track_using_a_ flexible_track_model_UPV_EHU.pdf;jsessionid=34214F29F3815B99C4A2C82A08F5 FA8C?sequence=1 (Дата обращения 05.05.2017).

234. Hamid, R. Slab Track for 39–Ton Axle Loads, Structural Design [Text] / Hamid R. Lotfi and Ralph G. Oesterle // Portland Cement Association. Reseach and Development Information. – 2005. – 104 p.

235. Li, D. Long–Term Performance of Slab Track Designed for Shared Passenger and Freight Operations and Tested under Heavy Freight Train [Text] / D. Li, S. Dick, T. Sussmann, L. Maal // 11 th WCRR (World Congress on Railway Research) Milan–Italy 29 th May – 2 nd Jun. – 2016. – 6 p.

236. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности [Текст] // № ЦПТ 52/14 Утверждена Заместителем Министра путей сообщения Российской Федерации В.Т. Семеновым 16 нюня . – 2000. – 39 с.

237. Савин, А.В. Расчет напряжений в конструкциях безбалластного пути. [Текст] / А.В. Савин, Д.А. Ищенко // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 8–я научно–практическая конференция с международным участием МГУПС–МИИТ; (ISBN 978–5–904640– 14–9). – 2015. – С. 147–155.

238. ГОСТ 27751–2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения [Текст]
239. Горбунов-Посадов, М.И. Расчет конструкций на упругом основании [Текст] / М.И. Горбунов-Посадов, Т. А. Маликова, В.И. Соломин .- М.: Стройиздат, 1984.- 679 с.

240. Власов, В.З. Балки, плиты и оболочки на упругом основании [Текст] / В.З. Власов, Н.Н. Леонтьев . – М.: "Государственное издательство Физикоматематической литературы". – 1960. – 491 с.

241. Клепиков, С.Н. Расчет конструкций на упругом основании [Текст] / С.Н. Клепиков. – Киев: Буревестник, 1967. – 183 с.

242. Терегулова, Э. Несущая способность плит, лежащих на деформируемом основании: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Казань. – 2009. – 156 с.

243. Егорова, Е.С. Модели грунтов, реализованные в программных комплексах SCAD Office и Plaxis 3D [Текст] / Е.С. Егорова, А.В. Иоскевич, В.В. Иоскевич [и др.] // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 3 (42). – 30 с.

244. Айнбиндер, А.Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость [Текст] / А.Б. Айнбиндер. – М.: "Недра", 1991. – 288 с.

245. Суворова, Т.В. Динамическое взаимодействие систем полуограниченных и ограниченных деформируемых тел, моделирующих железнодорожный путь и объекты инфраструктуры: дис. ... док. физ.-мат. наук. – Краснодар. – 2004. – 319 с.

246. Усошина, Е. Численно-аналитические методы моделирования динамических систем с пористыми неоднородными основаниями: дис. ... канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону. – 2016. – 134 с.

247. Суворова, Т.В. Особенности деформации земляного полотна железнодорожного пути при высокоскоростном движении [Текст] / Т.Е. Суворова, А.Б. Суворов, С.А. Усошин // Вестник РГУПС. – 2008.– № 1 (29). – С. 163–172.

248. Суворова, Т.В. Математическое моделирование деформации основания железнодорожного пути при встречном движении поездов [Текст] / Т.В.

Суворова, О.А. Беляк, С.А. Усошин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 4 (44). – С. 155–161.

249. Суворова, Т.В. Математическое моделирование задач виброзащиты в полуограниченной вязкоупругой среде [Текст] / Т.В. Суворова, А.Е. Ларин // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения.. – 2015. – № 2 (31). – С. 100–105.

250. Усошина, Е.А. Математические модели динамических систем, включающих слоистые обводненные пористоупругие основания [Текст] / Е. А. Усошина, Т. В. Суворова, А. Н. Соловьев // Вестник Донского государственного технического университета. – 2016. – № 3(86). – С. 10–16.

251. Суворова, Т. О математической модели системы «подвижной составжелезнодорожный путь – основание сложного строения» [Текст] / Т.В. Суворова, Ю.В. Столяров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2009. – № 4 (36). – С. 145–153.

252. Geo–dynamic Modelling of Track Bed and Earthworks [Text] // document number C469–HWU–PM–REP–000001–Final Draft. – Heriot–Watt University (HWU) Report – February. – 2015.

253. HS2 Technical Standards for Earthworks [Text] (Document no. HS2–HS2–GT–STD–000–000001).

254. Палатников, Е.А. Расчет железобетонных плит покрытий аэропортов [Текст] / Е.А. Палатников. – М: Оборонгиз, 1961. – 96 с.

255. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности №ЦПТ–52/14 [Текст] // утв. 16.06.2000. – 2000.

256. «Технические условия проектирования аэродромных покрытий» [Текст] // СН 120-60.

257. Коган, А.Я. Методика определения расчетного срока службы безбалластного пути [Текст] / А.Я. Коган, А.В. Савин // Вестник Научно– исследовательского института железнодорожного транспорта.– 2017. – №1. – С. 3–9.

258. Muramoto, K. Roadbed Degradation Mechanism under BallastlessTrack and Its Countermeasures [Electronic resource] / K. Muramoto, E. Sekine, T.Nakamura // QR of RTRI, 2006. Vol. 47, No. 4, Nov. P. 222–227. URL: (датаобращения20.12.2016г).

https://www.jstage.jst.go.jp/article/rtriqr/47/4/47_4_222/_pdf

259. Савин, АВ.. Земляное полотно для пути без балласта [Текст] / А.В. Савин // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. Труды XII международной научно-технической конфереции памяти Г.М. Шахунянца МИИТ 1–2 апреля. – 2015. – С. 111–114.

260. Савин, А.В. Волоконно-оптическая система контроля состояния земляного полотна [Текст] / А.В. Савин // Труды XVI научно-практической конференции "Безопасность движения поездов" МГУПС. – 2015. – С. 115–116.

261. Третьяков, К.И Изменение параметров рельсовой колеи переходных участков безбалластного пути [Текст] / К.И. Третьяков, А.В. Савин // XIII международная научно-техническая конференция «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути», посвященной памяти профессора Георгия Михайловича Шахунянца. К 120–летию МГУПС (МИИТ). – Москва, 2016. – С. 148–150.

262. Проведение динамико–прочностных испытаний на Экспериментальном кольце, ст. Щербинка. Сравнительный анализ кромочных напряжений в рельсах и ускорений неподрессоренных масс пассажирского вагона при движении по пути с типовой и безбалластной конструкцией со скоростями до 80 км/ч [Текст] // Научно–технический отчет ОАО «ВНИИЖТ» по НИР, шифр 10.8.027.Р, этап 3. – М., 2011. – 39 с.

263. Комплексные динамические и по воздействию на путь с безбалластной конструкцией испытания пассажирского подвижного состава на перегоне Саблино – Тосно Октябрьской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» с поэтапным повышением скорости движения до 230 км/ч [Текст] // Научно–

технический отчет ОАО «ВНИИЖТ» по НИР, шифр 10.8.027.Р, этап 5. – М., 2011. – 64 с.

264. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 29 декабря 2012 г. № 2791р. – Москва, 2012. – 235 с.

265. Отчет о научно-исследовательской работе Исследование напряженного состояния земляного полотна при верхнем строении конструкции LVT [Текст] // Регистрационный номер 6035. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВПО ПГУПС). – Санкт–Петербург. – 2012. – 77 с.

266. Специальные технические условия. Земляное полотно участка Москва – Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Казань – Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству [Текст] // Разработано ФГБОУ ВО ПГУПС. – 2016. – 45 с.

267. Волоконно-оптическая система сигнализации состояния объектов инфраструктуры. Технические условия [Текст] // ЛАБД.401223.005 ТУ/П. – Москва, 2015. – 43 с.

268. Волоконно-оптическая система сигнализации состояния объектов инфраструктуры в части мониторинга земляного полотна для безбалластных конструкций пути. Программа и методики испытаний [Текст] // ЛАБД.441114.001ПИ. – Москва, 2015. – 17 с.

269. Устройство дистанционного контроля состояния безбалластного железнодорожного пути [Текст] // Патент на изобретение №2613126. Заявл. 2015145218, 21.10.2015. Опубл. 15.03.2017 Бюл. №8. Авторы: А.В. Савин, М.А. Солодянкин, А.Л. Ермилов, Д.А. Чугунов. Опубл. 15.03.2017. – Бюл. – 2017. – №8. – 10 с.

270. Отчет об опытной эксплуатации волоконно-оптической системы мониторинга земляного полотна на участках безбалластных конструкций

верхнего строения железнодорожного пути Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ» ст. Щербинка [Текст]. – Москва, 2017. – 48 с.

271. Щегельский, С. Волоконно–оптическая система сигнализации контролирует состояние объектов инфраструктуры [Текст] / С.В. Щегельский // Путь и путевое хозяйство – 2015. – № 1. – С. 13–14.

272. Технические требования. Стационарная система диагностики и мониторинга состояния земляного полотна и конструкций верхнего строения пути (Для опытного применения на высокоскоростных железнодорожных магистралях) [Текст] / Утв. ОАО "РЖД" 28 декабря 2016 г. – 2016. – № 795. – 42 с.

273. Гогричиани, Г.В. Объективное определение по результатам сравнений (испытаний) перспективного объекта при неограниченном множестве рассматриваемых противоречивых критериев [Текст] / Г.В. Гогричиани // Вестник ВНИИЖТ. – 2006. – № 6. – С. 14–15.

274. Казаринова, Д.А. Разработка метода выбора наилучшей конструкции по совокупности предложенных критериев. Постановка задачи [Текст] / Д.А. Казаринова // Проблемы железнодорожного транспорта: труды ОАО «ВНИИЖТ». – М.: Интекст, 2011. – С. 118–122.

275. Гогричиани, Г.В. Выбор перспективного противоюзного устройства из рассматриваемых по совокупности противоречивых критериев [Текст] / Г.В. Гогричиани, Д.А. Казаринова // Вестник ВНИИЖТ. – 2014. – № 6. – С. 26–32.

276. Гуцыкова, С.В. Метод экспертных оценок. Теория и практика [Текст] / С. В. Гуцыкова. – М.: Институт психологии РАН, 2011. – 136 с.

277. Технические указания ПО определению и использованию характеристик устройства И состояния пути, получаемых вагонами путеобследовательскими станциями ЦНИИ-4 (ЦПТ - 55/15) [Текст] / Утв. Руководитель Департамента пути и сооружений МПС России С.Ю. Иванов 29 сентября . – 2003. – 96 с.

278. Савин, А.В. Методика расчета напряжений в конструкциях безбалластного пути [Текст] / А.В. Савин // Внедрение современных конструкций

и передовых технологий в путевое хозяйство. 8–я научно–практическая конференция с международным участием МГУПС–МИИТ; (ISBN 978–5–904640–14–9). – 2015. – С.52–59.

279. ГОСТ 27751–2014 "Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения" (введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 декабря 2014 г. N 1974–ст)

280. Сайт компании Schwihag [Электронный ресурс] / URL: http://www.schwihag.com (Дата обращения 05.07.2015).

281. Типовые конструктивно-технологические решения конструкции железнодорожного пути с участком переменной жесткости на подходах к безбалластному пути (для опытного применения на высокоскоростных железнодорожных магистралях) [Текст] / Утв. Первый вице-президент ОАО «РЖД» А.С. Мишарин 28 декабря 2016 г. № 803. – Москва. – 2016. – 25 с.

282. Технические условия для реконструкции пути на подходах к искусственным сооружениям [Текст] / Утв. Заместитель начальника департамента пути и сооружений ОАО "РЖД" А.В. Бушин 16.12.2003. – 2003. – 25 с.

283. Живин, Р.И. Путь на подходах к искусственным сооружениям и в тоннелях [Текст] / Р.И. Живин // Путь и путевое хозяйство. – 2010. – № 2. – С. 12– 19.

284. Никонов, А.М. Железнодорожный путь на искусственных сооружениях [Текст] /А.М. Никонов // учебное пособие. – М. : УМЦ ЖДТ (Учебно– методический центр по образованию на железнодорожном транспорте), 2007. – 293 с.

285. Гасанов, А.И. Путь на подходах к металлическим мостам [Текст] / А.И. Гасанов // Путь и путевое хозяйство. – 2012. – № 7. – С. 29–30.

286. Серебряков, Д.В. Прочность насыпей при вибродинамическом воздействии поездов в зоне сопряжения земляного полотна с мостами [Текст]:

дис. ... канд. тех. наук. / Серебряков Дмитрий Владимирович. – СПб: ПГРУПС, 2005. – 158 с.

287. Путь для переходных участков при высоких осевых нагрузках [Текст] // Железные дороги мира. – 2009. – № 2. – С. 74–77.

288. Исследование мостов и подходов к ним на участках с интенсивным движением [Текст] // Железные дороги мира. – 2009. – № 5. – С. 18–21.

289. Руководство по применению полимерных материалов (пенопластов, геотекстилей, георешеток, полимерных дренажных труб) для усиления земляного полотна при ремонтах пути. [Текст] /Утверждено МПС РФ от 19.12.2001. – Москва, 2001. – 23 с.

290. Савин, А.В. Переход от балластного пути к безбалластному [Текст] / А.В. Савин // Українські залізниці. – 2014.– № 9. – С. 56–59.

291. Савин, А.В. Бесстыковой путь на безбалластном основании [Текст] / А.В. Савин // Труды международной научно-практической конференции «Проблемы взаимодействия пути и подвижного состава», посвященная 100летию профессора Моисея Абрамовича Фришмана. – Днепропетровск, 2013 – 108с., С. 61–62.

292. Савин, А.В. Расчет устойчивости бесстыкового пути на подходах к искусственным сооружениям [Текст] / А.В. Савин, Д.В. Овчинников // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. Материалы 7-й научно-практической конференции с международным участием МГУПС (МИИТ). – 2014. – С. 108–116.

293. Виногоров, Н.П. Определение напряженного состояния плетей. [Текст] / Н.П. Виногоров, А.В. Савин // Путь и путевое хозяйство. – 2001. – № 4. – С.16– 20.

294. Савин, А.В. Определение продольно-напряженного состояния бесстыкового пути [Текст] / А.В. Савин // Вопросы работы железнодорожного транспорта в условиях реформирования: Сб. науч. тр./ под ред. канд. В.М. Богданова и Г.В. Гогричиани. – М.: Интекст, 2001. – С. 125–129.

295. Савин, А.В. Готовимся к повышению скоростей [Текст] / А.В. Савин, А.Н. Симаков // Путь и путевое хозяйство. – 2002. – №7. – С. 9–10.

296. Савин, А.В. Направления повышения эффективности бесстыкового пути. [Текст] / А.В. Савин // Развитие железнодорожного транспорта в условиях реформ: сб. науч. тр. ; под ред. В.И. Панферева и Г.В. Гогричиани. – М.: Интекст. 2003. – С. 213–218.

297. Савин, А.В. Повышение эффективности бесстыкового пути [Текст] / А.В. Савин, Е.С. Баклагин // Проблемы путевого хозяйства Восточной Сибири: сб. научн. тр. Вып 2 ; под ред. В.П. Поздеева, В.А. Покацкого. – Иркутск: ИрГУПС, 2004. – С. 137–145.

298. Савин, А.В. Разработка системы контроля безопасной эксплуатации бесстыкового пути по условию его устойчивости [Текст] // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. VIII научно–техническая конференция с международным участием. МИИТ. – Москва, 2011. – С. 43–45.

299. Савин, А.В. Разработка системы контроля безопасной эксплуатации бесстыкового пути по условию его устойчивости [Текст] / А.В. Савин // Проблемы железнодорожного транспорта: сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ» ; под ред. Г.В. Гогричиани. – М.:Интекст, 2011. – С. 185–189.

300. Савин, А.В. Повышение эффективности бесстыкового пути. [Текст] / А.В. Савин // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. Материалы четвертой научно-практической конференции с международным участием МИИТ, РОАТ. – Москва. 2011. – С. 10–15.

301. Патент на изобретение № 2174082 Устройство для измерения продольных перемещений рельсовой плети железнодорожного пути № RU 2174082 C1 [Текст] / Н.П. Виногоров, А.В. Савин // №2000127662/28; Заявл. 08.11.00; Опубл. 27.09.01. – Бюл.№ 27. – 3 с.

302. Патент на изобретение №2239574 Способ определения продольнонапряженного состояния рельсовых плетей бесстыкового железнодорожного пути. Авторское свидетельство №RU 2239574 [Текст] / Н.П. Виногоров, А.В. Савин, П.Н. Кулешев, А.П. Тимашов, Б.Д. Анашкин // С1 Заявл. 25.03.2003, № 2003107881/11Опубл. 10.11.2004 Бюл. № 31. – 4с.

303. Савин, А.В. Напряженное состояние рельсовой плети и методы его определения [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Савин Александр Владимирович // ВНИИЖТ. – Москва, 2002. – 163 с.

304. ГОСТ 32698–2014. Скрепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Требования безопасности и методы контроля. (Rail fastening. Safety requirements and methods of control) [Текст]. – Введ. 2015–03–01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 12 с.

305. Технические требования ЦПТ 11/100. Прокладки для рельсовых скреплений железнодорожного пути [Текст].

306. Технические требования ЦПТ 11/70. Промежуточные рельсовые скрепления железнодорожного пути [Текст].

307. EN 13481–2/A1 EN 13481–2/A1 Железнодорожный транспорт. Железнодорожные пути. Требования к рабочим характеристикам крепежных систем [Текст]. / Часть 2: Крепежные системы для бетонных шпал ; изменение A1.

308. DIN EN 13481–5:2012–08. Крепежные системы для безбалластного пути с рельсом на поверхности или рельсом, встроенным в канал [Текст].

309. Маркарьян, М.А. Сопротивление бесстыкового пути перемещениям [Текст] / М.А. Маркарьян, Н.Б. Зверев // Труды ВНИИЖТ. – М.: Трансжелдориздат, 1962. – № 244. – С. 19–45.

310. Баклагин, Е.С. Сопротивление повороту рельса относительно шпалы в горизонтальной плоскости [Текст] / Е.С. Баклагин, А.В. Лебедев // Вестник ВНИИЖТ. – 2005. – № 4. – С. 37–39.

311. Лебедев, А.В. Экспериментальное определение сопротивления промежуточных скреплений повороту рельсов относительно шпал [Текст] / А.В. Лебедев, А.В. Савин // Вестник ВНИИЖТ. – М.: Трансжелдориздат, 2006. – № 6. – С. 42–43.

312. Карпущенко, Н.И. Технико-экономическое сравнение промежуточных рельсовых скреплений [Текст] / Н.И. Карпущенко, Н.И. Антонов // Совершенствование рельсовых скреплений, Новосибирск Изд-во СГУПСа. – 2003. – С. 269–287.

313. Савин, А.В. Дифференцированные требования к рельсовым скреплениям и качество изготовления их элементов [Текст] / А.В. Савин, Д.В. Козлов // Развитие железнодорожного транспорта в условиях реформирования: сб. научн. тр. ; под ред. Ю.М. Черкашина, Г.В. Гогричиани. – М.: Интекст, 2006. – С. 53–57.

314. Петров, А.В. Рельсовые скрепления, применяемые в безбалластных конструкциях пути на Экспериментальном кольце ОАО "ВНИИЖТ"[Текст] / А.В. Петров, А.В. Савин, А.В. Лебедев // Путь и путевое хозяйство. – М., 2015. – №12. – С.2 – 5.

315. Jia Liu. Einfluss der Schienenbefestigungskomponenten auf das laterale Verformungs- und Lastverteilungsverhalten der Schiene [Text] // Dissertation. – München, 2013. – 187 c.

316. Техническое сообщение ТА – RO 03/2002 – Anforderungskatalog Feste Fahrbahn – 4. Auflage vom 01.08.2002. – Каталог требований по строительству безбалластного пути [Текст] / 4. Вып. от 01. августа 2002 года. – 2002.

317. Директива Deutsche Bahn Gruppe Ril 836.0503. Земляные сооружения.Защитные слои. Оценка защитных слоев на несущую способность. [Текст]. – 164с.

318. Директива Deutsche Bahn Gruppe Ril 836.0502. Земляные сооружения. Насыпь. Укрепление нижнего строения / основания. [Текст]. – 121 с.

319. Основные технические требования к проектированию и строительству земляного полотна для безбалластного пути // Организация сотрудничества железных дорог Р 720/1. – Варшава, 2012.

320. Директива Deutsche Bahn Gruppe Ril 836.0501. Земляные сооружения. Насыпь. Принципы. [Текст]. – 102 с. 321. Code for Design of High Speed Railway. ТВ 10621–2009/Ј 971–2009. Нормы проектирования высокоскоростных железных дорог в Китае [Текст]. – 264 с.

322. ГОСТ 33477–2015. Система разработки и постановки продукции на производство. Технические средства железнодорожной инфраструктуры. Порядок разработки, постановки на производство и допуска к применению [Текст]. Введ. 2016–07–01 – М.: Изд–во стандартов 2015. – 63 с.

323. ГОСТ Р 27.403–2009. Надежность в технике. Планы испытаний для контроля вероятности безотказной работы [Текст]. – Введ. 2010–09–01. – М.: Изд– во стандартов, 2009. – 17 с.

324. Савин, А.В. Комбинированный метод исследования безбалластного пути [Текст] / А.В. Савин // Вестник ВНИИЖТ. – 2015. – № 3. – С. 48–52.

325. Savin, A. Combined Method of Ballastless Track Examination [Текст] / A.B. Savin // VNIIZhT Bulletin. Railway Research Institute Bulletin. – 2015. – № 2. – P. 33–36.

326. Савин, А.В. Комбинированный метод исследования железнодорожного пути [Текст] / А.В. Савин // Вестник транспорта Поволжья. – Самара : Самарский государственный университет путей сообщения, 2014. – № 4. – С. 63–68.

327. Коган, А.Я. Воздействие экипажа на путь при пространственных колебаниях подвижного состава. Описание программы [Текст] / А.Я. Коган, М.А. Левинзон, И.О. Войтов [и др.] // Информационный бюллетень ВНТИЦентр. – М. : ГОСФАП, 1985. – № 4/67. – 40 с.

328. Особенности работы рельсов в условиях сурового климата и необходимость их учета для повышения безопасности движения [Текст] : дис.... канд. тех. наук /Абдурашитов Анатолий Юрьевич. – Москва, ВНИИЖТ, 1988. – 160 с.

329. Концепция комплексного управления надежностью, рисками, стоимостью жизненного цикла на железнодорожном транспорте [Текст] /

Утверждена старшим вице-президентом ОАО "РЖД" В.А. Гапановичем 31.07.2010. – 2010. – 132 с.

330. СТО РЖД 1.05.509.15–2008 Система управления эффективностью поставок. Руководство по оценке стоимости жизненного цикла продукции (LCC) [Текст]. – Введ. 2008. – 8 с.

331. Затраты жизненного цикла в стратегии управления активами [Текст] // Железные дороги мира. – 2015. – ; 5. – С. 64–69.

332. Экономический анализ повышения скорости М. Leboeur. Revue generale des Chemins de fer [Text] // Железные дороги мира. – 2012, – № 11. – Р. 6–16.

333. Хант, Э.И. Определение экономической эффективности технических решений [Текст] / Э.И. Хант // Труды ЦНИИ МПС, Вып. №406. – М.: Транспорт, 1970. – С. 84–97.

334. Брусиловский, М.Э. Комплексная оценка стоимости жизненного цикла технических систем железнодорожного транспорта [Текст]: дис. ... док. экон. Наук: 08.00.05 // Брусиловский Михаил Эдуардович. – М., 2011. – 161 с.

335. Бломайер, Х. Требования к современным путевым системам в отношении обслуживания и экономичности [Текст] // Евразия вести. – 2010.– № 4. – 6 с.

336. Понтиселли, К. Стоимость жизненного цикла железнодорожного подвижного состава: от теории к практике [Текст] // Техника железных дорог. – 2009. – № 4 (8). – С. 19–24.

337. Жизненный цикл. Факты и факторы [Текст] // Техника железных дорог.
 2009. – № 4(8). – С. 24–25.

338. Мурашов, А.Е. Стоимость жизненного цикла (СЖЦ) как основа для определения цены технических средств железнодорожного транспорта [Текст] / А.Е. Мурашов, Н.Г Иванова, Е.К. Ставрова // Техника железных дорог.– 2010, – № 1 (9). – С.19–24.

339. Гапанович, В.А. На основе оптимизации стоимости жизненного цикла
[Текст] / В.А. Гапанович // Железнодорожный транспорт. – 2013. – № 6. – С. 26– 34.

340. Гапанович, В.А. Универсальный инструмент поддержки принятия решений [Текст] / В.А. Гапанович // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 10. – С. 16–22.

341. Беряков, С.Н. Повышение эффективности работы железнодорожного транспорта на основе совершенствования системы управления инвестиционной деятельностью [Текст]: дис. ... канд. тех. наук /Беряков Сергей Николаевич. – М.: МИИТ, 2016. – 141 с.

342. Мазур, И. Управление проектами: учебное пособие. [Текст] / И.И. Мазур, В.Д. Шапиро, Н.Г. Ольдерогге // под общ. ред. И.И. Мазура – 2–е изд. – М.: Омега–Л, 2004. – 664 с.

343. Бурков, В.Н. Как управлять проектами: научно-практическое издание. [Текст] / В.Н. Бурков, Д.А. Новиков. – М.: СИНТЕГ-ГЕО, 1997. – 188 с.

344. Бушуев, С.Д. Креативные технологии управления проектами и программами. [Текст] / С.Д. Бушуев, Н.Д. Бушуева, И.А. Бабаев. – Киев «Саммит– Книга», 2010. – 768 с.

345. Хохлов, Н.В. Управление риском: учебное пособие для вузов. [Текст] / Н.В. Хохлов – М.:ЮНИТИ – ДАНА, 2001. – 239 с.

346. Морозов, Д.С. Проектное финансирование: организация, управление риском, страхование. [Текст] / Д.С. Морозов, В.Ю. Катасонов. – М.: Анкил, 2000. – 272с.

347. Морозов, Д.С. Проектное финансирование: управление рисками. [Текст] / Д.С. Морозов. – М.: Анкил, 1999. – 120 с.

348. Чернова, Г.В. Практика управления рисками на уровне предприятия. [Текст] / Г.В. Чернова. – СПб : Питер, 2000. – 176 с.

349. Широков, В.А. Производственный риск. [Текст] / В. Широков // Хозяйство и право. –1991. – №3. – С. 86–91. 350. Перелет, Р.А. Технический риск и обеспечение безопасности производства. [Текст] / Р.А. Перелет, Г.С. Сергеев. – М.: Знание, 1998. – 64 с.

351. Клейнер, Г.Б. Предприятие в нестабильной экономической среде: риски, стратегии, безопасность. [Текст] / Г.Б. Клейнер, В.Л. Тамбовцев, Р.М. Качалов. – И.: Экономика, 1997. – 288 с.

352. ГОСТ Р 54505–2011. Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте [Текст]. – Введ. 2011–11–23. – М.: Стандартинформ, 2011. – 48 с.

353. Струков, А.В. Анализ международных и российских стандартов в области надежности, риска и безопасности [Текст] / А.В. Струков. – 21 с.

354. Гордон, Б.Г. Об использовании понятия риска в различных отраслях промышленности [Текст] // Вестник Госатомнадзора России. – 2003. – № 1. – С. 3–7.

355. Рябинин, И.А. Надежность и безотказность структурно-сложных систем [Текст] / И.А. Рябинин . – СПб.: Изд-во С.–Петерб. Ун-та, 2007. – 203 с.

356. Ашпиз Е.С Подход к расчету показателей надежности элементов пути [Текст] / Е. С. Ашпиз // Мир транспорта. – 2011. – №5. – С. 34–41.

357. Тановицкий, Ю.Ю. Напряженно-деформированное состояние элементов проезжей части на безбалластном мостовом полотне металлических мостов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – МИИТ, 2010.

358. Bezin, Y. The dynamic response of slab track constructions and their benefit with respect to conventional ballasted track [Text] / Y. Bezin, D. Farrington, C. Penny, B. Temple, S. Iwnicki // Taylor & Francis. Manchester, UK. – 2010. – p.

359. Bilow, D. Slab track for the next 100 years [Text] / D. N. Bilow, G. M. Randich // Portland Cement Association. Skokie, IL. – p.

360. Савин, А.В. Условия применения безбалластного пути [Текст] / А.В. Савин // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство : 9–я научно–практическая конференция с международным участием МГУПС–МИИТ. – Москва, 2016. – С. 75–79.

361. Симановский, М.А. О соотношении между сроком окупаемости и сроком службы [Текст] / М.А. Симановский // Вестник ВНИИЖ. – М.: Трансжелдориздат, 1958. – № 6. – С. 41–44.

362. Шарапов, С.Н. Сравнительная оценка стоимости реконструкции верхнего строения пути [Текст] / С.Н. Шарапов, Д.С. Рубченко, О. И. Грабова, А.А. Сапожников // Железнодорожный транспорт. – 2013.– № 5. – С. 34–37.

363. Методика определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта (основные положения) [Текст] // Утверждена Распоряжением ОАО «РЖД» от 27.12.2007 №2459р. – 2007.

364. Мурашов, А.Е. Стоимость жизненного цикла (СЖЦ) как основа для определения цены технических средств железнодорожного транспорта [Текст] / А.Е. Мурашов, Н.Г. Иванова, Е.К. Ставрова // Техника железных дорог. – 2010. – № 1(9). – С. 19–24.

365. Мачерет, Д.А. Об экономических проблемах развития транспортной инфраструктуры [Текст] / Д.А. Мачерет // Мир транспорта. – 2011. – № 3. – С. 76–83.

366. Измайкова, А.В. Экономическая оценка перспективных инновационных проектов в сфере железнодорожного транспорта [Текст] / А.В. Измайкова // Экономика железных дорог. – 2015. – № 12. – С. 44–53.

367. Ротбард, М.Н. Временное предпочтение [Текст] / М.Н. Ротбард // Экономическая теория : под ред. Дж. Итуэлла, М. Милгейта, П. Ньюмена; пер. с англ. – М.: ИНФРА–М, 2004. – 942 с.

368. Мизес, Л. фон. Человеческая деятельность: трактат по экономической теории. – Челябинск: Социум, 2008. – 717 с.

369. Инвестиционный меморандум Проекта создания высокоскоростной железнодорожной магистрали. Москва – Казань. – 2014. –Источник: ОАО «Скоростные магистрали» [Электронный ресурс]. URL: http://wiki.nashtransport.ru/images/7/74/ (дата обращения 15.02.2015). – 2014.

Приложение А

Таблица А.1 - Характеристики безбалластных конструкций пути, на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ»

Характеристика	Rheda 2000	LVT 2011 г.	LVT 2014 г.	MaxBögl	Alstom	Tines
Особенности конструкции		с коробом				
1	2	3	4	5	6	7
Тип скрепления	Переходные	Переходный	Переходные	Переходные	Переходные	Переходные
	участки:	участок:	участки:	участки:	участки:	участки и
	W30 HH (Vossloh)	ЖБР-65 Ш;	ЖБР-65 Ш;	W30 HH	ЖБР-65 Ш	конструкция:
	Конструкция:	Конструкция:	System 301	(Vossloh)	Конструкция:	W30 HH
	System 301		(Vossloh);	Конструкция:	System DFF 301	(Vossloh)
	(Vossloh)		ЖБР-65 Ш	System 301	(Vossloh);	
			Конструкция:	(Vossloh)	SFC (Pandrol)	
			W30 HH (Vossloh);			
			SBS W SL 1-900-			
			R65 (Schwihag);			
			Пандрол-350			
	(00	500.10	(Pandrol)		505	(00
Эпюра. Расстояние меду узлами	600 мм	590±10мм	590±10мм	На плите	585мм на плите	600 мм
скреплении				650 MM		
Вид переходного участка (вход)	Железобетонные	П-образная	Балка переменного	Ш5-ДФ 43шт	Плита (25000) с	Щебеночный
Длина переходного участка	шпалы на	бетонная	сечения	21м щебеночный	подпорными	балласт
	склеенном	армированная	7920мм	балласт	стенами (10390 мм),	шпалы Ш5-
	полимерным	плита, является			прим. к основной	ДФ
	составом	продорлжением			конструкции и	в нижней
	балласте, длина	плиты в которую			приклеенным	части 15 м
	участка 20 м,	залит бетонный			резиновым матом	тощий бетон
	внутри колеи пара	несущицй слой			проклеенные	
	дополнительных	БКП,			подошвы	
	рельсов	подбалластный			челночных шпал 42	
		полимерный мат			ШТ.	
		толщино 15 мм				

Продолжение Таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7
Вид переходного участка (выход)	Железобетонные		Усиленные	Ш5-ДФ	Плита (25000) с	Щебеночный
Длина переходного участка	шпалы на		шпалы В30 15	50 шт 25м	подпорными	балласт шпалы
	склеенном		шпал с	щебеночный	стенами (10370 мм),	Ш5-ДФ
	полимерным		проклеенной	балласт	примыкающими к	
	составом		подошвой		основной	
	балласте, длина				конструкции	
	участка 20 м,				проклеенные	
	внутри колеи пара				подошвы	
	дополнительных				челночных шпал 42	
	рельсов				ШТ.	
Верхняя плита, м				12 плит	Длины плит	15 плит по 5000
- ширина	3200	3400	-3000 \ 3990	-265	-4000; 4800; 4800	ММ
- высота	180	200	-290±10	-210	4785	- ширина
- длина		-24940	- 56490\23900	-6450	Разделительный	2860мм
					шов; 4775; 4790;	-370мм
					4810; 4685	Через 2 плиты
					Разделит. шов и	сделаны
					переход с фоссло на	деформационны
					пандрол	е швы
					4710; 4750; 4785;	
					4820	
					Разделительный	
					шов; 4780; 4795;	
					4805; 4000	
					-ширина 2510±10	
					-толщина на	
					пандроле 270мм	
					На фоссло – 225	

Продолжение Таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7
Средняя плита	-	-				
- ширина			-3420	-3370	-3490	- 3375
- толщина			-200	-350	-370	- 380
- длина			- 53400	-75000	-74890	-75000
Гидравлически связанный слой						
(ГСНС) из тощего бетона						
- ширина	3800	3800	-3820±30	-3920±30	-3500	-3920±30
- толщина	300	200	-195	-300	-300	-300
- длина	30000	30000	-80390	-75000	-74890	-75000
Морозозащитный слой из	-	-				
щебеночно-песчоно-гравийной						
смеси (ЩПГС)						
- модуль деформации Е _{v2} , МПа			120	120	120	120
- толщина			7000	7000	7000	7000
- ширина			700	700	700	700
Разделительные слои			-	-	-	-
- георешетка						
- мембрана Тефонд						
Полифелизированный слой (МД	-	-				
системы)						
- модуль деформации Е _{v2} , МПа			80	80	80	80
- ширина			7000	7000	7000	7000
- толщина			500	500	500	500

Приложение Б

Результаты расчета на прочность пути на балласте

Исходные данные для расчета Параметры подвижного состава:

- *P_{cm}* статическая нагрузка от колеса на рельс;
 - *q* отнесенный к колесу вес необрессоренных частей;
 - ж приведенная к колесу жесткость рессорного подвешивания;
- *f*_{cm} статический прогиб рессорного подвешивания;
 - d диаметр колеса по кругу катания;
 - *n* количество осей тележки;
 - *li* расстояние между центрами осей колесных пар тележки экипажа;
- *lo* расстояние между последней осью первой тележки и первой осью второй тележки;
- *V*_{констр} конструкционная скорость, означает значение скорости, при которой на стадии проектирования производятся расчеты
 - V -скорость движения;
 - f -коэффициент перехода от осевых напряжений в подошве рельса к кромочным, учитывающий действие горизонтальных нагрузок на рельс и эксцентриситет приложения вертикальной нагрузки;
 - *kд* -коэффициент вертикальной динамики;

z_{max} -прогиб рессорного подвешивания;

е -наибольшие расчетные глубины неровностей на колесах;

Рст,	<i>q</i> ,	Ж,	fcm,	<i>d</i> ,	n,	li,
КГ	КГ	кг/мм	ММ	СМ	ШТ	СМ
10750	1750	125	169	125	2	320

lo,	<i>Vконстр</i> ,	V,	f	k∂	е,	kx	μ	η
СМ	км/ч	км/ч			СМ			
470	160	80	1,16	0,2	0,047	4,80	0,009	-0,006

Параметры пути:

- *U*_{осн} модуль упругости рельсового основания;
 - *k*_ж коэффициент относительной жесткости рельсового основания и рельса;
 - *l*_{*u*} расстояние между осями шпал;
- *L_{неровн}* коэффициент, учитывающий влияние на образование динамической неровности пути типа рельса и шпал, рода балласта, масс пути и колеса, участвующих во взаимодействии;
 - $W_{(0)}$, момент сопротивления рельса по низу подошвы соответственно $W_{(6)}$ при износе головки 0 и 6 мм;
 - *а*₀ коэффициент, учитывающий отношение необрессоренной массы колеса

и участвующий во взаимодействии массы пути;

- *w*_{подкл} площадь рельсовой подкладки;
 - *W_a* площадь полушпалы с учетом поправки на изгиб;
 - *b*_{un} ширина нижней постели шпалы в подрельсовом сечении;
- *z_{pacnp}* коэффициент, учитывающий неравномерность распределения давления вдоль шпалы и пространственность приложения нагрузки;
 - *h* толщина балластного слоя под шпалой.

Характеристика	U_{och} ,	k _ж ,	l_{uu} ,	L _{неровн}	W ₍₀₎ ,	W ₍₆₎ ,
конструкции	кг/см ²	см ⁻¹	СМ		cm ³	cm ³
пути						
Р65(6)1840(ЖБ)Щ	1100	0,015	55	0,261	435	417

α_{o}	ω,	$arOmega_{lpha,}$	b _{un} ,	Z.pacn	h,
	cm ²	cm ²	СМ		СМ
0,4	518	3092	27,6	0,7	55



б) в рельсе

Рисунок Б.1 Зависимость напряжений в элементах пути от модуля

упругости пути



а) в рельсе;

б) в шпале и балласте

Рисунок Б.2 Зависимость напряжений в элементах пути от коэффициента относительной жесткости рельсового основания и рельса







б) в шпале, балласте и земляном полотне

Рисунок Б.З Зависимость напряжений в элементах пути от скорости

движения

347

a)

Напряжения в элементах пути, кг/см2

б)



а) в рельсе;

б) в шпале, балласте и земляном полотне

Рисунок Б.4 Зависимость напряжений в элементах пути от осевой нагрузки



а) в рельсе;

б) в шпале, балласте и земляном полотне
 Рисунок Б.5 Зависимость напряжений в элементах пути от толщины
 балластного слоя под шпалой

Приложение В

Листинг программы расчет безбалластного пути как

многослойной балки

'Подпрограмма checkU.m

function [p]=checkU(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,f1,f2,f3,v) %q=fopen('my.xls','wt'); %fprintf(q, '\n', equation2(75,65,500,0.21*10^12,0.1*10^11,0.3*10^11,0.355*0. 1^4,0.1^9,1,0.1042*10^9,0.1415*10^9,0.25*10^9,0.173*10^5,0.71*10^5,0.115*10 ^7,0,0,0,1)); ts=23.5; t=0; for U1=7*10^7:10^7:7*10^7%7*10^7:10^7:7*10^7 for U2=2.5*10^7:10^7:2.5*10^7%6*10^7:10^7:6*10^7 for U3=1.7*10^7:10^7:1.7*10^7%4*10^7:10^7:4*10^7 t=t+1; %[Wz1p, Wz2p, Wz3p, Wm1p, Wm2p, Wm3p] = equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,0,0); d=1.85; %расстояние между колесными парами 1=22; %расстояние между центрами тележек %ширина слоев h1=0.18; h2=0.54; h3=0.7; %моменты сопротивления слоев W1=I1/h1; $W2 = 2 \times I2 / h2;$ W3=2*I3/h3; %[Wz10, Wz20, Wz30, Wm10, Wm20, Wm30]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,0,0); %[Wz10 md, Wz20 md, Wz30 md, Wm10 md, Wm20 md, Wm30 md]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d,0); %[Wz10 ml, Wz20 ml, Wz30 ml, Wm10 ml, Wm20 ml, Wm30 ml]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-1,0); %[Wz10 mdl, Wz20 mdl, Wz30 mdl, Wm10 mdl, Wm20 mdl, Wm30 mdl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d-1,0); dQ=9.8*500*[ts;ts;ts;ts]; %<Q> [Wz1, Wz2, Wz3, Wm1, Wm2, Wm3]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,0,0); [Wz1 md, Wz2 md, Wz3 md, Wm1 md, Wm2 md, Wm3 md]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d,0); [Wz1 ml, Wz2 ml, Wz3 ml, Wm1 ml, Wm2 ml, Wm3 ml]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-1,0); [Wz1 mdl, Wz2 mdl, Wz3 mdl, Wm1 mdl, Wm2 mdl, Wm3 mdl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d-1,0);

[Wz1 mdpl, Wz2 mdpl, Wz3 mdpl, Wm1 mdpl, Wm2 mdpl, Wm3 mdpl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d+1,0); [Wz1 mlpd, Wz2 mlpd, Wz3 mlpd, Wm1 mlpd, Wm2 mlpd, Wm3 mlpd]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-l+d,0); [Wz1 pd, Wz2 pd, Wz3 pd, Wm1 pd, Wm2 pd, Wm3 pd]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,d,0); [Wz1 pl, Wz2 pl, Wz3 pl, Wm1 pl, Wm2 pl, Wm3 pl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,l,0); [Wz1 pdl, Wz2 pdl, Wz3 pdl, Wm1 pdl, Wm2 pdl, Wm3 pdl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,d+1,0); Wz1Q=[[Wz1,Wz1 md,Wz1 ml,Wz1 mdl]; [Wz1 pd,Wz1,Wz1 mlpd,Wz1 ml]; [Wz1 pl,Wz1 mdpl,Wz1,Wz1 md]; [Wz1 pdl,Wz1 pl,Wz1 pd,Wz1]]; Wz2Q=[[Wz2,Wz2 md,Wz2 ml,Wz2 mdl]; [Wz2 pd,Wz2,Wz2 mlpd,Wz2 ml]; [Wz2 pl,Wz2 mdpl,Wz2,Wz2 md]; [Wz2 pdl,Wz2 pl,Wz2 pd,Wz2]]; Wz3Q=[[Wz3,Wz3 md,Wz3 ml,Wz3 mdl]; [Wz3 pd,Wz3,Wz3 mlpd,Wz3 ml]; [Wz3 pl,Wz3 mdpl,Wz3,Wz3 md]; [Wz3 pdl,Wz3 pl,Wz3 pd,Wz3]]; Wm1Q=[[Wm1,Wm1 md,Wm1 ml,Wm1 mdl]; [Wm1 pd,Wm1,Wm1 mlpd,Wm1 ml]; [Wm1 pl,Wm1 mdpl,Wm1,Wm1 md]; [Wm1 pdl,Wm1 pl,Wm1 pd,Wm1]]; Wm2Q=[[Wm2,Wm2 md,Wm2 ml,Wm2 md1]; [Wm2 pd, Wm2, Wm2 mlpd, Wm2 ml]; [Wm2_pl,Wm2_mdpl,Wm2,Wm2_md]; [Wm2 pdl,Wm2 pl,Wm2 pd,Wm2]]; Wm3Q=[[Wm3,Wm3 md,Wm3 ml,Wm3 mdl]; [Wm3 pd, Wm3, Wm3 mlpd, Wm3 ml]; [Wm3_pl,Wm3_mdpl,Wm3,Wm3 md]; [Wm3 pdl,Wm3 pl,Wm3 pd,Wm3]]; %Wz1Q0=[Wz10,Wz10 md,Wz10 ml,Wz10 mdl]; %Wz2Q0=[Wz20,Wz20 md,Wz20 ml,Wz20 mdl]; %Wz3Q0=[Wz30,Wz30 md,Wz30 ml,Wz30 mdl]; dz1=abs(sum(Wz1Q*dQ)/4) $dz_{2}=abs(sum(Wz_{2}^{*}dQ)/4)$ dz3=abs(sum(Wz3Q*dQ)/4)%Wm1Q0=[Wm10,Wm10 md,Wm10 ml,Wm10 mdl]; %Wm2Q0=[Wm20,Wm20 md,Wm20 ml,Wm20 mdl]; %Wm3Q0=[Wm30,Wm30 md,Wm30 ml,Wm30 mdl]; dm1=abs(sum(Wm1Q*dQ/W1)/4)dm2=abs(sum(Wm2Q*dQ/W2)/4)dm3=abs(sum(Wm3Q*dQ/W3)/4)

```
filename = 'res4.xlsx';
A = [dz1*10^3, dz2*10^3, dz3*10^3, dm1/10^4/9.8, dm2/10^4/9.8]
dm3/10^4/9.8]
x=num2str(t);
S = ['A' x]
%xlswrite(filename,A,1,S)
        end
    end
end
end
%checkU(65,1635,1420,2.1*10^11,3.3*10^10,1.81*10^8,0.355*0.1^4,0.039366,0.1
28625,0.173*10^5,0.45*10^5,0.69*10^5,70/3.6)
%checkU(65,1635,1420,2.1*10^11,3.3*10^10,1.81*10^10,0.355*0.1^4,0.039366,0.
128625,0.173*10^5,0.45*10^5,0.69*10^5,70/3.6)
%checkU(65,1635,1420,0.21*10^12,342*10^6,181*10^6,0.355*0.1^4,0.0053775,0.1
28625,0.173*10^5,0.45*10^5,0.69*10^5,70/3.6)
%checkU(65,690,945,0.21*10^12,450*10^6,234*10^6,0.355*0.1^4,0.00288,0.00787
5,0.673*10^5,1.51*10^5,0.115*10^6,80/3.6)
'Подпрограмма equation2.m
function [Wz1, Wz2, Wz3, Wm1, Wm2,
Wm3]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,uu,w)
%syms a2(w)
%syms a3(w)
%syms a5(w)
%syms b2(w)
%syms b4(w)
%syms b5(w)
%syms b7(w)
%syms c2(w)
%syms c4(w)
%syms c5(w)
%a1=m1*v^2/(E1*I1);
%a2(w) = -v*(f1+m1*w*1i)/(E1*I1);
%a3(w) = (U1-m1*w^2+f1*w*1i) / (E1*I1);
%a4=f1*v/(E2*I2);
%a5(w) =- (U1+f1*w*1i) / (E2*I2);
%b1=f1*v/(E1*I1);
%b2(w) =- (U1+f1*w*1i) / (E1*I1);
%b3=m2*v^2/(E2*I2);
%b4(w) =-v*(f1+f2+2*m2*w*1i)/(E2*I2);
b5(w) = (U1+U2-m2*w^2+w*(f1+f2)*1i)/(E2*I2);
%b6=f2*v/(E3/I3);
%b7(w)=-(U2+f2*w*1i)/(E3*I3);
%c1=f2*v/(E2*I2);
c2(w) = -(U2+f2*w*1i)/(E2*I2);
%c3=m3*v^2/(E3*I3);
%c4(w) =-v*(f2+f3+2*m3*w*1i)/(E3*I3);
c5(w) = (U2+U3-m3*w^2+w*(f2+f3)*1i) / (E3*I3);
```

```
a1=m1*v^2/(E1*I1);
a2=-v*(f1+m1*w*1i)/(E1*I1);
a3=(U1-m1*w^2+f1*w*1i)/(E1*I1);
a4=f1*v/(E2*I2);
a5=-(U1+f1*w*1i)/(E2*I2);
b1=f1*v/(E1*I1);
b2=-(U1+f1*w*1i)/(E1*I1);
b3=m2*v^2/(E2*I2);
b4 = -v^* (f1 + f2 + 2^*m2^*w^*1i) / (E2^*I2);
b5=(U1+U2-m2*w^2+w*(f1+f2)*1i)/(E2*I2);
b6=f2*v/(E3*I3);
b7=-(U2+f2*w*1i)/(E3*I3);
c1=f2*v/(E2*I2);
c2=-(U2+f2*w*1i)/(E2*I2);
c3=m3*v^2/(E3*I3);
c4=-v*(f2+f3+2*m3*w*1i)/(E3*I3);
c5=(U2+U3-m3*w^2+w*(f2+f3)*1i)/(E3*I3);
syms M(l)
M(1) = [[1^4+a1^{1}^2+a2^{1}+a3, b1^{1}+b2, 0];
   [a4*1+a5,1^4+b3*1^2+b4*1+b5,c1*1+c2];
   [0,b6*1+b7,1^4+c3*1^2+c4*1+c5]];
r10=a1+b3+c3;
r_{9=a2+b4+c4};
r8=a3+b5+c5+a1*b3+a1*c3+b3*c3;
r7=a1*b4+b3*a2+a1*c4+c3*a2+b3*c4+c3*b4;
r6=a1*b5+b3*a3+a1*c5+c3*a3+b3*c5+c3*b5+a2*b4+a2*c4+b4*c4-a4*b1-
b6*c1+a1*b3*c3;
r5=a2*b5-b1*a5-b6*c2-c1*b7-
a4*b2+a3*b4+a2*c5+a3*c4+b4*c5+b5*c4+a1*b3*c4+a1*c3*b4+b3*c3*a2;
r4=a3*b5-a5*b2+a3*c5-b7*c2+b5*c5+a1*b4*c4+b3*a2*c4+c3*a2*b4-a1*b6*c1-
a4*b1*c3+a1*b3*c5+a1*c3*b5+b3*c3*a3;
r3=a1*b4*c5+a1*b5*c4+b3*a2*c5+b3*a3*c4+c3*a2*b5+c3*a3*b4+a2*b4*c4-a1*b6*c2-
a1*c1*b7-a4*b1*c4-a4*c3*b2-b1*c3*a5-b6*c1*a2;
r2=a1*b5*c5-a4*b2*c4-b1*a5*c4-b6*a2*c2-c1*a2*b7-c3*a5*b2-
a1*b7*c2+b3*a3*c5+c3*a3*b5+a2*b4*c5+a2*b5*c4+a3*b4*c4-a4*b1*c5-b6*c1*a3;
r1=a2*b5*c5-b1*a5*c5-b6*a3*c2-c1*a3*b7-a2*b7*c2-a5*b2*c4-
a4*b2*c5+a3*b4*c5+a3*b5*c4;
r0=a3*b5*c5-a5*b2*c5-a3*b7*c2;
R=[1 0 r10 r9 r8 r7 r6 r5 r4 r3 r2 r1 r0];
S=roots(R);
%syms S(w)
S(w) = (solve(det(M(1, w) == 0), 1));
%det(M(1))
%K=S(w)
%S=vpa(S(1));
%[s1,s2,s3,s4,s5,s6,s7,s8,s9,s10,s11,s12]
y = [[real(S(1)), imag(S(1))];
   [real(S(2)), imag(S(2))];
   [real(S(3)), imag(S(3))];
   [real(S(4)), imag(S(4))];
   [real(S(5)), imag(S(5))];
   [real(S(6)),imag(S(6))];
```

```
[real(S(7)), imag(S(7))];
   [real(S(8)), imag(S(8))];
   [real(S(9)),imag(S(9))];
   [real(S(10)), imag(S(10))];
   [real(S(11)), imag(S(11))];
   [real(S(12)), imag(S(12))]];
z=sortrows(y,1);
11=z(1,1)+1i*z(1,2);
13=z(2,1)+1i*z(2,2);
15=z(3,1)+1i*z(3,2);
17=z(4,1)+1i*z(4,2);
19=z(5,1)+1i*z(5,2);
111=z(6,1)+1i*z(6,2);
12=z(7,1)+1i*z(7,2);
14=z(8,1)+1i*z(8,2);
16=z(9,1)+1i*z(9,2);
18=z(10,1)+1i*z(10,2);
l10=z(11,1)+li*z(11,2);
112=z(12,1)+1i*z(12,2);
Lm=[11 12 13 14 15 16 17 18 19 110 111 112];
L=[[1 -1 1 -1 1 -1 1 -1 1 -1 ];
   [11^1 -12^1 13^1 -14^1 15^1 -16^1 17^1 -18^1 19^1 -110^1 111^1 -112^1];
   [11^2 -12^2 13^2 -14^2 15^2 -16^2 17^2 -18^2 19^2 -110^2 111^2 -112^2];
   [11^3 -12^3 13^3 -14^3 15^3 -16^3 17^3 -18^3 19^3 -110^3 111^3 -112^3];
   [11^4 - 12^4 13^4 - 14^4 15^4 - 16^4 17^4 - 18^4 19^4 - 110^4 111^4 - 112^4];
   [11^5 -12^5 13^5 -14^5 15^5 -16^5 17^5 -18^5 19^5 -110^5 111^5 -112^5];
   [11^6 -12^6 13^6 -14^6 15^6 -16^6 17^6 -18^6 19^6 -110^6 111^6 -112^6];
   [11^7 -12^7 13^7 -14^7 15^7 -16^7 17^7 -18^7 19^7 -110^7 111^7 -112^7];
   [11^8 -12^8 13^8 -14^8 15^8 -16^8 17^8 -18^8 19^8 -110^8 111^8 -112^8];
   [11^9 -12^9 13^9 -14^9 15^9 -16^9 17^9 -18^9 19^9 -110^9 111^9 -112^9];
   [11^10 -12^10 13^10 -14^10 15^10 -16^10 17^10 -18^10 19^10 -110^10
111^10 -112^10];
   [11^11 -12^11 13^11 -14^11 15^11 -16^11 17^11 -18^11 19^11 -110^11
111^11 -112^11];
g9=a4*b6/(E1*I1);
q10=(a5*b6+a4*b7)/(E1*I1);
q11=(a5*b7-a4*b6*(a1+b3+c3))/(E1*I1);
G=[0;0;0;0;0;0;0;0;0;g9;g10;g11];
CC = L^{(-1)} *G;
BB=0;
AA=0;
for ii=1:12
AA(ii)=CC(ii)*((Lm(ii)^4+c3*Lm(ii)^2+c4*Lm(ii)+c5)*(Lm(ii)^4+b3*Lm(ii)^2+b4
*Lm(ii)+b5)-(b6*Lm(ii)+b7)*(c1*Lm(ii)+c2))/(b6*Lm(ii)+b7)/(a4*Lm(ii)+a5);
    BB(ii) = -CC(ii) * (Lm(ii)^{4}+c3*Lm(ii)^{2}+c4*Lm(ii)+c5) / (b6*Lm(ii)+b7);
end
Wz11=0;
Wz12=0;
Wz21=0;
```

```
Wz22=0;
Wz31=0;
Wz32=0:
Wm11=0;
Wm12=0;
Wm21=0;
Wm22=0;
Wm31=0;
Wm32=0;
%for ii=1:6
%Wz11=Wz11+sum(CC(2*ii-1)*((Lm(2*ii-1)^4+c3*Lm(2*ii-1)^2+c4*Lm(2*ii-
1)+c5)*(Lm(2*ii-1)^4+b3*Lm(2*ii-1)^2+b4*Lm(2*ii-1)+b5)-(b6*Lm(2*ii-
1)+b7)*(c1*Lm(2*ii-1)+c2))/(b6*Lm(2*ii-1)+b7)/(a4*Lm(2*ii-
1)+a5)*exp(uu*Lm(2*ii-1)));
%Wz12=Wz12+sum(CC(2*ii)*((Lm(2*ii)^4+c3*Lm(2*ii)^2+c4*Lm(2*ii)+c5)*(Lm(2*ii
)^4+b3*Lm(2*ii)^2+b4*Lm(2*ii)+b5)-
(b6*Lm(2*ii)+b7)*(c1*Lm(2*ii)+c2))/(b6*Lm(2*ii)+b7)/(a4*Lm(2*ii)+a5)*exp(uu
*Lm(2*ii)));
%Wz21=Wz21+sum(-CC(2*ii-1)*(Lm(2*ii-1)^4+c3*Lm(2*ii-1)^2+c4*Lm(2*ii-
1)+c5)/(b6*Lm(2*ii-1)+b7)*exp(uu*Lm(2*ii-1)));
%Wz22=Wz22+sum(-
CC(2*ii)*(Lm(2*ii)^4+c3*Lm(2*ii)^2+c4*Lm(2*ii)+c5)/(b6*Lm(2*ii)+b7)*exp(uu*
Lm(2*ii)));
%Wz31=Wz31+sum(CC(2*ii-1)*exp(uu*Lm(2*ii-1)));
%Wz32=Wz32+sum(CC(2*ii)*exp(uu*Lm(2*ii)));
%end
%F=[abs(Wz11) abs(Wz12) abs(Wz21) abs(Wz22) abs(Wz31) abs(Wz32)];
%for ii=1:6
%Wm11=Wm11-E1*I1*sum(Lm(2*ii-1)^2*CC(2*ii-1)*((Lm(2*ii-1)^4+c3*Lm(2*ii-
1) ^2+c4*Lm(2*ii-1)+c5) * (Lm(2*ii-1) ^4+b3*Lm(2*ii-1) ^2+b4*Lm(2*ii-1)+b5) -
(b6*Lm(2*ii-1)+b7)*(c1*Lm(2*ii-1)+c2))/(b6*Lm(2*ii-1)+b7)/(a4*Lm(2*ii-
1)+a5)*exp(uu*Lm(2*ii-1)));
%Wm12=Wm12-
E1*I1*sum(Lm(2*ii)^2*CC(2*ii)*((Lm(2*ii)^4+c3*Lm(2*ii)^2+c4*Lm(2*ii)+c5)*(L
m(2*ii)^4+b3*Lm(2*ii)^2+b4*Lm(2*ii)+b5)-
(b6*Lm(2*ii)+b7)*(c1*Lm(2*ii)+c2))/(b6*Lm(2*ii)+b7)/(a4*Lm(2*ii)+a5)*exp(uu
*Lm(2*ii)));
%Wm21=Wm21-E2*I2*sum(-Lm(2*ii-1)^2*CC(2*ii-1)*(Lm(2*ii-1)^4+c3*Lm(2*ii-
1) ^2+c4*Lm(2*ii-1)+c5) / (b6*Lm(2*ii-1)+b7) *exp(uu*Lm(2*ii-1)));
%Wm22=Wm22-E2*I2*sum(-
Lm(2*ii)^2*CC(2*ii)*(Lm(2*ii)^4+c3*Lm(2*ii)^2+c4*Lm(2*ii)+c5)/(b6*Lm(2*ii)+
b7) *exp(uu*Lm(2*ii)));
%Wm31=Wm31-E3*I3*sum(Lm(2*ii-1)^2*CC(2*ii-1)*exp(uu*Lm(2*ii-1)));
%Wm32=Wm32-E3*I3*sum(Lm(2*ii)^2*CC(2*ii)*exp(uu*Lm(2*ii)));
%end
for ii=1:6
Wz11=Wz11+AA(2*ii-1)*exp(uu*Lm(2*ii-1));
Wz12=Wz12+AA(2*ii) *exp(uu*Lm(2*ii));
Wz21=Wz21+BB(2*ii-1)*exp(uu*Lm(2*ii-1));
Wz22=Wz22+BB(2*ii)*exp(uu*Lm(2*ii));
Wz31=Wz31+CC(2*ii-1)*exp(uu*Lm(2*ii-1));
Wz32=Wz32+CC(2*ii)*exp(uu*Lm(2*ii));
end
```

<pre>for ii=1:6 Wm11=Wm11-E1*II*Lm(2*ii-1)^2*AA(2*ii-1)*exp(uu*Lm(2*ii-1)); Wm12=Wm12-E1*II*Lm(2*ii)^2*AA(2*ii)*exp(uu*Lm(2*ii)); Wm21=Wm21-E2*I2*Lm(2*ii-1)^2*BB(2*ii-1)*exp(uu*Lm(2*ii-1)); Wm22=Wm22-E2*I2*Lm(2*ii)^2*BB(2*ii)*exp(uu*Lm(2*ii)); Wm31=Wm31-E3*I3*Lm(2*ii-1)^2*CC(2*ii-1)*exp(uu*Lm(2*ii-1)); Wm32=Wm32-E3*I3*Lm(2*ii)^2*CC(2*ii)*exp(uu*Lm(2*ii)); end</pre>
i f(1111 < 0)
Wz1=Wz12;
Wz2=Wz22;
Wz3=Wz32;
Wm1=Wm12;
Wm2=Wm22;
Wm3=Wm32;
else
Wz1=Wz11;
Wz2=Wz21;
$Wz = Wz \pm i$
WIN1 - WIN11, Wm2 = Wm21.
Wm 3=Wm 31:
end
<pre>%[Wz1, Wz2, Wz3, Wm1, Wm2, Wm3]=equation2(65,1635,1420,0.21*10^12,3.3*10^10,181*10^6,0.355*0.1^4,0.039 366,0.128625,7*10^7,2*10^7,2*10^7,0.173*10^5,0.45*10^5,0.69*10^5,70/3.6,0,0</pre>
%[Wm1/E1/11,Wm2/E2/12,Wm3/E3/13]
%equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,uu,w) %[Wz1, Wz2, Wz3, Wm1, Wm2,
Wm3]=equation2(75,65,500,0.21*10^12,0.1*10^11,0.3*10^11,0.355*0.1^4,0.1^9,1
<pre>,0.1042*10^9,0.1415*10^9,0.25*10^9,0.173*10^5,0.71*10^5,0.115*10^7,0,0,0) %[Wz1, Wz2, Wz3, Wm1, Wm2,</pre>
Wm3]=equation2(65,1635,945,0.21*10^12,450*10^6,181*10^6,0.355*0.1^4,0.00288
,0.128625,0.1042*10^9,0.1415*10^9,0.25*10^9,0.173*10^5,0.71*10^5,0.115*10^7 ,0,0,0)
e [Wal Was Wml Wm)
<pre>%[W21, W22, W23, WM1, WM2, Wm3]=equation2(65,1635,945,0.21*10^12,450*10^6,181*10^6,0.355*0.1^4,0.00288 ,0.128625,0.15*10^9,4.5*10^7,1.8*10^7,0.173*10^5,0.71*10^5,0.115*10^7,500/3 .6,0,0) end</pre>
<pre>%[Wz1, Wz2, Wz3, Wm1, Wm2, Wm3]=equation2(65,690,945,0.21*10^12,450*10^6,234*10^6,0.355*0.1^4,0.00288, 0.007875,0.1042*10^9,0.1415*10^9,1.8*10^7,0.173*10^5,0.31*10^6,0.515*10^5,5 00/3.6,0,1500)</pre>

'Подпрограмма findD.m function [uz1,uz2,uz3,um1,um2,um3] = findD(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,ts)

```
filename1 = 'ommm.xlsx';
filename2 = 'Matrix.xlsx';
xx=xlsread(filename1,1,'A:A');
nom=64;
for k=1:nom
kk=num2str(k);
Range1 = ['A' kk];
Range2 = ['B' kk];
Range3 = ['C' kk];
Range4 = ['D' kk];
Range5 = ['E' kk];
Range6 = ['F' kk];
Range7 = ['G' kk];
Range8 = ['H' kk];
Range9 = ['I' kk];
Range10 = ['J' kk];
Range11 = ['K' kk];
Range12 = ['L' kk];
Range13 = ['M' kk];
Range14 = ['N' kk];
Range15 = ['0' kk];
Rangel6 = ['P' kk];
Range17 = ['Q' kk];
Range18 = ['R' kk];
Range19 = ['S' kk];
Range20 = ['T' kk];
Range21 = ['U' kk];
Range22 = ['V' kk];
Range23 = ['W' kk];
Range24 = ['X' kk];
Range25 = ['Y' kk];
Range26 = ['Z' kk];
Range27 = ['AA' kk];
Range28 = ['AB' kk];
Range29 = ['AC' kk];
Range30 = ['AD' kk];
Range31 = ['AE' kk];
Range32 = ['AF' kk];
```

```
yy(:,:,k)=[[xlsread(filename2,1,Range1)+1i*xlsread(filename2,1,Range2),xlsr
ead(filename2,1,Range3)+1i*xlsread(filename2,1,Range4),xlsread(filename2,1,
Range5)+1i*xlsread(filename2,1,Range6),xlsread(filename2,1,Range7)+1i*xlsre
ad(filename2,1,Range8)];
```

```
[xlsread(filename2,1,Range9)+1i*xlsread(filename2,1,Range10),xlsread(filena
me2,1,Range11)+1i*xlsread(filename2,1,Range12),xlsread(filename2,1,Range13)
+1i*xlsread(filename2,1,Range14),xlsread(filename2,1,Range15)+1i*xlsread(fi
lename2,1,Range16)];
```

[xlsread(filename2,1,Range17)+1i*xlsread(filename2,1,Range18),xlsread(filen ame2,1,Range19)+1i*xlsread(filename2,1,Range20),xlsread(filename2,1,Range21))+1i*xlsread(filename2,1,Range22),xlsread(filename2,1,Range23)+1i*xlsread(filename2,1,Range24)];

```
[xlsread(filename2,1,Range25)+1i*xlsread(filename2,1,Range26),xlsread(filen
ame2,1,Range27)+1i*xlsread(filename2,1,Range28),xlsread(filename2,1,Range29)
)+1i*xlsread(filename2,1,Range30),xlsread(filename2,1,Range31)+1i*xlsread(filename2,1,Range32)]]
```

end

%нужны SQ,dQ,l d=1.85; %расстояние между колесными парами 1=22; %расстояние между центрами тележек %ширина слоев h1=0.18; h2=0.54; h3=0.7; %моменты сопротивления слоев W1=I1/h1; W2=2*I2/h2; W3=2*I3/h3; dQ=9.8*500*[ts;ts;ts;ts]; [Wz1, Wz2, Wz3, Wm1, Wm2, Wm3]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,0,0); [Wz1_md, Wz2_md, Wz3_md, Wm1 md, Wm2 md, Wm3 md]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d,0); [Wz1 ml, Wz2 ml, Wz3 ml, Wm1 ml, Wm2 ml, Wm3 ml]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-1,0); [Wz1 mdl, Wz2 mdl, Wz3 mdl, Wm1 mdl, Wm2 mdl, Wm3 mdl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d-1,0); [Wz1 mdpl, Wz2 mdpl, Wz3 mdpl, Wm1 mdpl, Wm2 mdpl, Wm3 mdpl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d+1,0); [Wz1 mlpd, Wz2 mlpd, Wz3 mlpd, Wm1 mlpd, Wm2 mlpd, Wm3 mlpd]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-l+d,0); [Wz1 pd, Wz2 pd, Wz3 pd, Wm1 pd, Wm2 pd, Wm3 pd]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,d,0); [Wz1 pl, Wz2 pl, Wz3 pl, Wm1 pl, Wm2 pl, Wm3 pl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,l,0); [Wz1 pdl, Wz2 pdl, Wz3 pdl, Wm1 pdl, Wm2 pdl, Wm3 pdl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,d+1,0); Wz1Q0=[[Wz1,Wz1 md,Wz1 ml,Wz1 mdl]; [Wz1 pd,Wz1,Wz1 mlpd,Wz1 ml]; [Wz1 pl,Wz1 mdpl,Wz1,Wz1 md]; [Wz1 pdl,Wz1 pl,Wz1 pd,Wz1]]; Wz2Q0=[[Wz2,Wz2 md,Wz2 ml,Wz2 mdl]; [Wz2 pd,Wz2,Wz2 mlpd,Wz2 ml]; [Wz2 pl,Wz2 mdpl,Wz2,Wz2 md]; [Wz2 pdl,Wz2 pl,Wz2 pd,Wz2]]; Wz3Q0=[[Wz3,Wz3 md,Wz3 ml,Wz3 mdl]; [Wz3 pd,Wz3,Wz3 mlpd,Wz3 ml]; [Wz3 pl,Wz3 mdpl,Wz3,Wz3 md]; [Wz3 pdl,Wz3 pl,Wz3 pd,Wz3]];

Wm1Q0=[[Wm1,Wm1 md,Wm1 ml,Wm1 mdl];

[Wm1 pd,Wm1,Wm1 mlpd,Wm1 ml]; [Wm1 pl,Wm1 mdpl,Wm1,Wm1 md]; [Wm1 pdl,Wm1 pl,Wm1 pd,Wm1]]; Wm2Q0=[[Wm2,Wm2 md,Wm2 ml,Wm2 md1]; [Wm2 pd, Wm2, Wm2 mlpd, Wm2 ml]; [Wm2 pl,Wm2 mdpl,Wm2,Wm2 md]; [Wm2 pdl,Wm2 pl,Wm2 pd,Wm2]]; Wm3Q0=[[Wm3,Wm3 md,Wm3 ml,Wm3 mdl]; [Wm3 pd,Wm3,Wm3 mlpd,Wm3 ml]; [Wm3 pl,Wm3 mdpl,Wm3,Wm3 md]; [Wm3 pdl,Wm3 pl,Wm3 pd,Wm3]]; dz1=abs(sum(Wz1Q0*dQ)/4);dz2=abs(sum(Wz2Q0*dQ)/4);dz3=abs(sum(Wz3Q0*dQ)/4);dm1=abs(sum(Wm1Q0*dQ/W1)/4);dm2=abs(sum(Wm2Q0*dQ/W2)/4);dm3=abs(sum(Wm3Q0*dQ/W3)/4);for s=1:nom %можно задать большую меньшую точность вычисления интегралов w=xx(s) SQ=yy(:,:,s) [Wz1, Wz2, Wz3, Wm1, Wm2, Wm3]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,0,w); [Wz1 md, Wz2 md, Wz3 md, Wm1 md, Wm2 md, Wm3 md]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d,w); [Wz1 ml, Wz2 ml, Wz3 ml, Wm1 ml, Wm2 ml, Wm3 ml]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-1,w); [Wz1 mdl, Wz2 mdl, Wz3 mdl, Wm1 mdl, Wm2 mdl, Wm3 mdl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d-l,w); [Wz1 mdpl, Wz2 mdpl, Wz3 mdpl, Wm1 mdpl, Wm2 mdpl, Wm3 mdpl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-d+1,w); [Wz1 mlpd, Wz2 mlpd, Wz3 mlpd, Wm1 mlpd, Wm2 mlpd, Wm3 mlpd]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-l+d,w); [Wz1 pd, Wz2 pd, Wz3 pd, Wm1 pd, Wm2 pd, Wm3 pd]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,d,w); [Wz1 pl, Wz2 pl, Wz3 pl, Wm1 pl, Wm2 pl, Wm3 pl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,l,w); [Wz1 pdl, Wz2 pdl, Wz3 pdl, Wm1 pdl, Wm2 pdl, Wm3 pdl]=equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,d+1,w); Wz1Q=[[Wz1,Wz1 md,Wz1 ml,Wz1 mdl]; [Wz1 pd,Wz1,Wz1 mlpd,Wz1 ml]; [Wz1 pl,Wz1 mdpl,Wz1,Wz1 md]; [Wz1 pdl,Wz1 pl,Wz1 pd,Wz1]]; Wz2Q=[[Wz2,Wz2 md,Wz2 ml,Wz2 mdl]; [Wz2 pd, Wz2, Wz2 mlpd, Wz2 ml]; [Wz2 pl,Wz2 mdpl,Wz2,Wz2 md]; [Wz2 pdl,Wz2 pl,Wz2 pd,Wz2]]; Wz3Q=[[Wz3,Wz3 md,Wz3 ml,Wz3 mdl]; [Wz3 pd,Wz3,Wz3 mlpd,Wz3 ml];

[Wz3 pl,Wz3 mdpl,Wz3,Wz3 md]; [Wz3 pdl,Wz3 pl,Wz3 pd,Wz3]]; Sz1=conj(Wz1Q)*SQ*Wz1Q'*10^6; Sz2=conj (Wz2Q) *SQ*Wz2Q'*10^6; Sz3=conj(Wz3Q)*SQ*Wz3Q'*10^6; Wm1Q=[[Wm1,Wm1 md,Wm1 ml,Wm1 mdl]; [Wm1 pd, Wm1, Wm1 mlpd, Wm1 ml]; [Wm1 pl,Wm1 mdpl,Wm1,Wm1 md]; [Wm1 pdl,Wm1 pl,Wm1 pd,Wm1]]; Wm2Q=[[Wm2,Wm2 md,Wm2 ml,Wm2 md1]; [Wm2 pd, Wm2, Wm2 mlpd, Wm2 ml]; [Wm2 pl, Wm2 mdpl, Wm2, Wm2 md]; [Wm2 pdl,Wm2 pl,Wm2 pd,Wm2]]; Wm3Q=[[Wm3,Wm3 md,Wm3 ml,Wm3 mdl]; [Wm3 pd,Wm3,Wm3 mlpd,Wm3 ml]; [Wm3 pl,Wm3 mdpl,Wm3,Wm3 md]; [Wm3_pdl,Wm3_pl,Wm3_pd,Wm3]]; Sm1=conj(Wm1Q)*SQ*Wm1Q'/W1/W1*10^6; Sm2=conj (Wm2Q) *SQ*Wm2Q'/W2/W2*10^6; Sm3=conj(Wm3Q)*SQ*Wm3Q'/W3/W3*10^6; isz11(s) = abs(Sz1(1,1)); isz12(s) = abs(Sz1(2,2)); isz13(s) = abs(Sz1(3,3)); isz14(s) = abs(Sz1(4,4)); isz21(s) = abs(Sz2(1,1)); isz22(s) = abs(Sz2(2,2)); isz23(s)=abs(Sz2(3,3)); isz24(s) = abs(Sz2(4,4)); isz31(s) = abs(Sz3(1,1)); isz32(s) = abs(Sz3(2,2)); isz33(s) = abs(Sz3(3,3)); isz34(s) = abs(Sz3(4,4)); ism11(s) = abs(Sm1(1,1)); ism12(s) = abs(Sm1(2,2)); ism13(s) = abs(Sm1(3,3)); ism14(s) = abs(Sm1(4,4)); ism21(s) = abs(Sm2(1,1)); ism22(s) = abs(Sm2(2,2)); ism23(s) = abs(Sm2(3,3)); ism24(s) = abs(Sm2(4,4)); ism31(s) = abs(Sm3(1,1)); ism32(s) = abs(Sm3(2,2)); ism33(s) = abs(Sm3(3,3)); ism34(s) = abs(Sm3(4,4));

X(s) = w;
end

```
Iz11=trapz(X, isz11);
Iz12=trapz(X, isz12);
Iz13=trapz(X, isz13);
Iz14=trapz(X,isz14);
Iz21=trapz(X,isz21);
Iz22=trapz(X, isz22);
Iz23=trapz(X,isz23);
Iz24=trapz(X, isz24);
Iz31=trapz(X, isz31);
Iz32=trapz(X, isz32);
Iz33=trapz(X, isz33);
Iz34=trapz(X, isz34);
Im11=trapz(X, ism11);
Im12=trapz(X,ism12);
Im13=trapz(X, ism13);
Im14=trapz(X,ism14);
Im21=trapz(X,ism21);
Im22=trapz(X, ism22);
Im23=trapz(X, ism23);
Im24=trapz(X,ism24);
Im31=trapz(X,ism31);
Im32=trapz(X,ism32);
Im33=trapz(X, ism33);
Im34=trapz(X,ism34);
Dz1=(Iz11+Iz12+Iz13+Iz14)*1/4
Dz2=(Iz21+Iz22+Iz23+Iz24)*1/4
Dz3=(Iz31+Iz32+Iz33+Iz34)*1/4
Dm1=(Im11+Im12+Im13+Im14)*1/4
Dm2 = (Im21 + Im22 + Im23 + Im24) * 1/4
Dm3=(Im31+Im32+Im33+Im34)*1/4
uz1=dz1^2+Dz1;
uz2=dz2^2+Dz2;
uz3=dz3^2+Dz3;
um1=dm1^2+Dm1;
um2=dm2^2+Dm2;
um3=dm3^2+Dm3;
%[uz1,uz2,uz3,um1,um2,um3]=findD(65,1635,1420,2.1*10^11,3.3*10^10,1.81*10^8
,0.355*0.1^4,0.039366,0.128625,7*10^7,2.5*10^7,1.7*10^7,0.173*10^5,0.45*10^
5,0.69*10^5,300/3.6,18)
end
```

'Подпрограмма plot3balka.m function [p]=plot3balka(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v) %g=fopen('my.xls','wt');

%fprintf(g, '\n', equation2(75, 65, 500, 0.21*10^12, 0.1*10^11, 0.3*10^11, 0.355*0. 1^4,0.1^9,1,0.1042*10^9,0.1415*10^9,0.25*10^9,0.173*10^5,0.71*10^5,0.115*10 ^7,0,0,0,1)); for w=1:3000 %p0(w) =equation2(65,1635,945,0.21*10^12,450*10^6,181*10^6,0.355*0.1^4,0.002 88,0.128625,0.1042*10^9,0.1415*10^9,0.25*10^9,0.173*10^5,0.31*10^6,0.0515*1 0^8,83.33333,0,w); %p185(w) =equation2(65,1635,945,0.21*10^12,450*10^6,181*10^6,0.355*0.1^4,0.0 0288,0.128625,0.1042*10^9,0.1415*10^9,0.25*10^9,0.173*10^5,0.31*10^6,0.0515 *10^8,83.33333,1.85,w); %p1851(w) =equation2(65,1635,945,0.21*10^12,450*10^6,181*10^6,0.355*0.1^4,0. 00288,0.128625,0.1042*10^9,0.1415*10^9,0.25*10^9,0.173*10^5,0.31*10^6,0.051 5*10^8,83.33333,-1.85,w); p0(w)=equation2(75,65,500,0.21*10^12,0.1*10^11,0.3*10^11,0.355*0.1^4,0.1^9, 1,0.1042*10^9,0.1415*10^9,0.25*10^9,0.173*10^5,0.71*10^5,0.115*10^7,0,0,w); p185(w) = equation2(75,65,500,0.21*10^12,0.1*10^11,0.3*10^11,0.355*0.1^4,0.1^ 9,1,0.1042*10^9,0.1415*10^9,0.25*10^9,0.173*10^5,0.71*10^5,0.115*10^7,0,1.8 5,w); p1851(w) = equation2(75,65,500,0.21*10^12,0.1*10^11,0.3*10^11,0.355*0.1^4,0.1 ^9,1,0.1042*10^9,0.1415*10^9,0.25*10^9,0.173*10^5,0.71*10^5,0.115*10^7,0,-1.85,w); $[W_{2}p(w), W_{2}p(w), W_{2}p(w), W_{m}p(w), W_{m}p(w), W_{m}p(w)] =$ equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,1.85,w); [Wz1(w), Wz2(w), Wz3(w), Wm1(w), Wm2(w), Wm3(w)] =equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,0,w); [Wz1m(w), Wz2m(w), Wz3m(w), Wm1m(w), Wm2m(w), Wm3m(w)] =equation2(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v,-1.85,w); q(w) = wend p0=plot(q, abs(Wm1), 'b'); p0.LineWidth=2; %xlabe('w, c^-1'); %ylabeK('|Wz1|'); hold on; pp=plot(q,abs(Wm1p),'r'); pp.LineWidth=2; hold on; pm=plot(q,abs(Wm1m),'g'); pm.LineWidth=2; hold off; end %plot3balka(65,1635,1420,0.21*10^12,3.3*10^10,181*10^6,0.355*0.1^4,0.039366 ,0.128625,7*10^7,2.5*10^7,1.7*10^7,0.173*10^5,0.85*10^5,1.1*10^5,70/3.6) %plot3balka(65,1635,945,0.21*10^12,450*10^6,181*10^6,0.355*0.1^4,0.00288,0. 128625,0.1042*10^9,0.1415*10^9,0.25*10^9,0.173*10^5,0.31*10^6,0.515*10^7,0) %plot3balka(65,1635,945,0.21*10^12,450*10^6,181*10^6,0.355*0.1^4,0.00288,0. 128625,1.5*10^7,4.5*10^7,1.8*10^7,0.173*10^5,0.31*10^6,0.515*10^7,0/3.6) %plot3balka(65,690,945,0.21*10^12,450*10^6,234*10^6,0.355*0.1^4,0.00288,0.0

07875,0.1042*10^9,0.1415*10^8,1.8*10^7,0.173*10^6,0.71*10^6,0.115*10^7,500/ 3.6)

```
%plot(q,p);
%plot3balka(75,65,500,0.21*10^12,0.1*10^11,0.3*10^11,0.355*0.1^4,0.1^9,1,0.
1042*10^9,0.1415*10^9,0.25*10^9,0.173*10^5,0.71*10^5,0.115*10^7,0,0,1)
%equation2(65,1635,945,0.21*10^12,450*10^6,181*10^6,0.355*0.1^4,0.00288,0.1
28625,0.1042*10^9,0.1415*10^9,0.25*10^9,0.173*10^5,0.71*10^5,0.115*10^7,0,0
,0,1)
%syms Wzl(u,w);
%Wz2(u,w), Wz3(u,w), Wm1(u,w), Wm2(u,w), Wm3(u,w)]
% [Wz1(u,w), Wz2(u,w), Wz3(u,w), Wm1(u,w), Wm2(u,w),
Wm3(u,w)]=equation2(65,1635,945,0.21*10^12,450*10^6,181*10^6,0.355*0.1^4,0.
00288,0.128625,0.1042*10^9,0.1415*10^9,0.25*10^9,0.173*10^5,0.31*10^6,0.051
5*10^8,83.33333,u,w);
\% = linspace(0,30);
%y1 = Wz1(0, w);
%y2 = Wz1(1.85, w);
%y3 = Wz1(-1.85, w);
%figure
%здще (чбн1бчбн2бчбн3)
'Подпрограмма tonnage.m
function [T1] =
tonnage(m1,m2,m3,E1,E2,E3,I1,I2,I3,U1,U2,U3,f1,f2,f3,v0,v1,MM1,MM0,r1,c1,ck
0,ts0,ts1)
[uz11, uz21, uz31, um11, um21, um31]=findDE(m1, m2, m3, E1, E2, E3, I1, I2, I3, U1, U2, U3,
f1, f2, f3, v0, MM1, MM0, r1, c1, ck0, ts0)
[uz12, uz22, uz32, um12, um22, um32]=findDE(m1, m2, m3, E1, E2, E3, I1, I2, I3, U1, U2, U3,
f1, f2, f3, v1, MM1, MM0, r1, c1, ck0, ts1)
%тоннаж на ЭК до исчерпания ресурса
T0=600;
%показатель повреждаемости на ЭК
D0=um21;
%показатель повреждаемости на линии, получаемый расчетом из модели
D1=um22;
%показатель степени повреждаемости
k=3;
%средняя осевая нагрузка на ЭК
P0=23.5;
%средняя осевая нагрузка на линии
P1=18;
%число переходов оттаивания\замерзания на ЭК
q0=50;
%число переходов оттаивания \замерзания на линии
g1=300;
%коэффициент влияния климата
Kt=0.13*q1/q0;
%тоннаж на линии до исчерпания ресурса
T1=T0*(D0/D1)^k*P1/P0*Kt
%[T1]=tonnage(65,690,945,0.21*10^12,450*10^6,234*10^6,0.355*0.1^4,0.00288,0
.007875,0.1042*10^8,0.1415*10^8,1.8*10^7,0.173*10^5,0.71*10^5,0.115*10^7,80
/3.6,300/3.6,9650,994,9300,2*10^6,5*10^8,23.5)
%[T1]=tonnage(65,690,945,0.21*10^12,450*10^6,234*10^6,0.355*0.1^4,0.00288,0
.007875,0.3042*10^8,0.5415*10^8,5.8*10^7,0.173*10^5,0.71*10^5,0.115*10^7,80
/3.6,300/3.6,9650,994,9300,2*10^6,5*10^8,23.5,18)
end
```

Приложение Г

Результаты расчета безбалластного пути как многослойной балки

Слой	Материал	Толщина, мм	Ширина, мм	Объем в 1 погонном метре, м ³	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, <i>E</i> , Н/м ²	Момент инерции (верт.) <i>I</i> , ^{M⁴}	Распределенная приведенная масса <i>m</i> , кг/м	Распределенное приведенное демпфирование <i>f</i> , H [.] c/м ²
1	Рельс	180				0,21.10 ¹²	0,355.10-4	65	$0,173\cdot10^{5}$
2	Бетонный слой	240	2500	0,6	2300	$34,5\cdot10^{3}$	0,00288	690	$0,29^{\cdot}10^{5}$
3	Тощий бетон	300	3500	1,05	1800	$23,4.10^3$	0,007875	945	$0,65.10^{5}$
	ЩПГС	700	4500	3,15	1500	$18,1.10^3$	0,128625	1420	$0,69.10^{5}$
	Химически	500	6000	3,0	1350	$14,6.10^3$	0,0625	750	$0,73 \cdot 10^5$
	укрепленный								
	грунт								

Таблица Г.1 - Исходные данные для расчета



















Рисунок Г.5 Зависимость напряжений от скорости для 2 слоя



Рисунок Г.6 Зависимость напряжений от скорости для 3 слоя

366



Рисунок Г.7 Зависимость прогибов от осевой нагрузки в 1-м слое







Рисунок Г.9 Зависимость прогибов от осевой нагрузки в 3-м слое

367











Рисунок Г.12 Зависимость напряжений от осевой нагрузки в 3-м слое

368

Приложение Д

Таблица Д.1 - Трудозатраты на текущее содержание опытных конструкций безбалластного пути

Дата	Пропущ. тоннаж	Название констр. БКП	Звено	№ шпалы / полушпа лы	Замененный элемент	Наименование неисправности, ее величина и протяженность	Количество занятых монтеров	Наимено- вание машин	Время, затраченное на работу, ч
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
21.11.14	0,56376	Tines подходы; Alstom подходы; MaxBogl подходы; LVT подходы	141-142, 149-150 151-152, 161-162 163-164, 171-172,173 174-175, 185-186			+ 30 мм		ВПРС	0,5 маш./смен
24.11.14	2,74421	То же	То же			+ 30 мм		ВПРС	0,5 маш./смен
27.11.14	4,68152	То же	То же			+ 30 мм		ВПРС	0,5 маш./смен
04.12.14	11,84753	То же	То же			+ 40 mm		ВПРС	0,5 маш./смен
11.12.14	19,31316	То же	То же			+ 30 мм		ВПРС	0,5 маш./смен
18.12.14	26,43506	То же	То же			+ 20мм		ВПРС	0,5 маш./смен
26.12.14	33,02689	То же	То же			+ 25 мм		ВПРС	0,5 маш./смен
30.12.14	37,46120	То же	То же			+ 30 мм		ВПРС	0,5 маш./смен
21.11.14, 24.11.14, 25.11.14	0,56376 2,74421 3,32182	По всем БКП с подходами	140-186			Затяжка скреплений			122 чел/час
22.01.15, 06.02.15, 24.02.15, 10.03.15	54,59176 69,42991 82,81920 96,02158	Alstom (контррельсы)	159-160, 153-154			Затяжка контррельсов, замена болтов и шурупов			52,6 чел./час.

Продолжение Таблицы Д.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
04.03.15	90,33229	По всем БКП	140/141, 148/149, 150/151, 164/165, 175/176			Выправка стыков		ЭШП	18,5 чел./час
		Tines подходы	141/142 149/150			+15мм			0.25
		Alstom подходы	151/152 161/162			+30мм		ВПРС	маш./смен
08 04 15	116 85642	MaxBogl подходы	163/164			+20мм			
00.04.15	110,85042	Tines полхолы	141/142 149/150						
		Alstom подходы	151/152 161/162	52 62		Пополнение шпальных	7		7 чел/час
	MaxBogl подходы	163/164			ящиков щебнем				
		MaxBogl подходы	171/172 173/174			+15мм		ВПРС	1 час
14.04.15	121,31119	LVT подходы	175/176 185/186 187/188			+15мм		ВПРС	1 час
14.04.15 121,311		MaxBogl подходы	171/172 173/174			Пополнение			1
		LVT подходы	175/176 185/186			шпальных ящиков щебнем	7		Гчас
14.05.15	156,73049	По всем БКП с подходами	140-186			Температурное закрепление плети на +31°С	16		8 час

Продолжение Таблицы Д.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Tines подходы	149/150						
		Alstom	151/153			Пополнение			
22.06.15	186,72478	подходы	160/162			шпальных	7		1 час
		MaxBogl	163/164			ящиков шебнем			
		подходы	171/174			, ,			
		LVT подходы	175/176						
		Tines	141/142			±15xxx			
		подходы	149/150			+ I J MM			
		Alstom	151/152			±20xxx			
24.06.15	197 00490	подходы	161/162			1 ZOMM		рпрс	4 110.00
24.00.13	107,90400	MaxBogl	163/164			+1000		DIIFC	4 4400
		подходы				+ I UMM			
			185/186			+10MM			
		Е • Г подходы	187/188						
		Alstom	151/152		Закрепление				
01-02.06.15	204	полхолы	161/162		дополнительных		4		32
		подлоды	101,10		рельсов в колее				
		Tines	141/142			+15мм			
		подходы	111/112			1011111			
		Alstom	149/153			+15мм			
05.08.15	224,46722	подходы	149/155			+ 1 <i>5</i> MIM		ВПРС	4 часа
		MaxBogl	160/164			+10мм			
		подходы	100/104						
		LVТ подх.	171/176			+10мм			
				29-42	Замена 64 блоков		12 чел		
26-	241,76118	LVT		1-28	со скреплением			2 ПОМИТРАТА	
27.08.15			178/180	40-41	Швихаг			2 домкрата 1 автокран	2 смены
					Заделка трещин			і автокран	
		LVT			несущей плиты		8 чел		

Продолжение Таблицы Д.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Alstom подходы	149/153			+20мм			
30.09.15	255,94480	MaxBogl подходы	160/164			+20мм		ВПРС	4 часа
		LVT подходы	171/176			+10мм			
19- 20.10.2015	261,2145	MaxBogl плита по всей длине	Плита по всей длине		Заделка щели вдоль по краям плит		16 чел	Компрессор	2 смены
		Tines подходы	141/142			+15мм			
08.12.15	299,85	Alstom подходы	149/153			+15мм		ВПРС	4 часа
		MaxBogl подходы	160/164			+10мм			
		LVT подходы	171/176			+10мм			
22.01.16	339,87	Tines подходы	140/141		Замена 2-х рельсов по 12,5 м	140-левая (зазор); 141-левая (дефект 53.1 по 1-му болт.отв.)	16	МПТ	6 час
02.02.2016	350,20	Alstom подходы				Закрепл. доп. рельсов на перех. участках	2 чел		4 часа
02.02.2016	350,20	Тинес подходы				Закреп. скреплений	4		4
17.03.2016	409,22	MaxBogl			излом клеммы	замена клеммы	2 чел		1 час
17.05.2016	461,12	Tines подходы	141/142 149/150			+10 +15	3	ВПРС	1,5 часа

Продолжение Таблицы Д.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Alstom подходы MaxBogl подходы LVT подходы	151/152 160/161 163/164 171/172 175/176			+10 +15 +15 +12 +12 +12			
29-30.09.16	592,11	Tines стык путевой плиты и тощего бетона	143/144 147/148			Очистка, продувка, герметизация шва мастикой MEGAflexy 40PU	6	компрессор	16
30.09.2016	592,11	Tines путевая плита	143/144 147/148		просадка левой нити на 13 блоках	Выправка на регулировочных подкладках фирмы Vossloh	6		16
25.10.2016	617,65	LVT первый переходный участок	175/176		Дефекты 5 шпал. Выплеск	Замена 5 шпал Замена щебня	7	Дрезина. Грейферный кран	4 часа

		Наименован	ние конструкции	
Наименование	LVT	MaxBogl	Alstom	Tines
Количество человеко-часов	210,0	112,5	180,5	279,5
Количество машино-часов	16,5	9,0	6,5	15,5

Таблица Д.2 - Сравнительный анализ трудозатрат на текущее содержание



Рисунок Д.1 Сравнительный анализ трудозатрат на текущее содержание

Приложение Е

Результаты испытаний безбалластных конструкций Tines, Alstom, MaxBogl, LVT в 2014-2016 г.г.

		0-100	МЛН. Т	100-20	0 млн.т	200-30	0 млн.т	300-40	0 млн.т	400-50	0 млн.т	500-60	0 млн.т
		Правая	Левая										
		НИТЬ											
		Осадка,											
		MM	MM	MM	MM	MM	ММ	ММ	MM	MM	MM	MM	MM
s	переходной	1,3	4,0	-0,3	1,3	4,3	6,7	-3,7	-3,3	-2,3	-1	-1,7	-1,7
ine	плита	2,1	1,9	2,5	2,6	-0,6	-2,0	2,0	1,5	1,44	1,06	2	1,8
Γ	переходной	5,0	13,2	-8,8	-1,6	-13,8	-16,8	2,6	3,6	2,2	1,6	2,4	1,8
m	переходной	-13,0	-6,3	-14,5	-9,8	3,5	5,8	2,0	2,8	1,5	2	2	1,5
lsto	плита	1,9	2,7	-2,5	-1,1	11,8	12,8	1,7	1,8	1,57	1,68	1,36	1,6
A	переходной	-19,8	-13,0	-3,3	-2,0	-6,8	-2,5	-0,5	-0,8	-0,25	0	-0,25	1,25
gl	переходной	5,5	10,8	-0,3	2,5	-2,3	0,5	0,3	0,8	-0,75	1	1,5	1,25
Bo	плита	-1,2	-0,8	2,7	4,5	10,0	8,3	0,5	0,2	0,77	0,69	1,15	1,46
Max	переходной	-2,5	1,5	-18,8	-13,5	-8,3	-8,5	-0,3	0,0	0,5	0,5	0,75	0,75
r	переходной	1,2	5,8	-15,8	-10,8	-3,8	-2,8	0,8	-1,6	0,4	-1	1,4	-0,6
V	плита	1,4	1,9	1,9	0,8	0,8	1,3	0,5	0,8	0,58	0,84	0,84	0,84
Ι	переходной	-6,0	-1,9	0,5	0,5	-4,4	-0,6	0,2	0,6	0,77	0,92	0,92	0,81

Таблица Е.1 - Осадки на участках безбалластных конструкций

Таблица Е.2 - Данные по ширине колеи и уровню на конструкции Tines

	Декабрь	2014 года	Март 20)15 года	Август	2015 года	Декабрь	2015 года	Март 2	016 года	Июль 2	016 года	Октябрь	2016 года
отметка по пути, м	ширина колеи, мм	уровень, мм (лево "-", право +")												
1821,38	1523	8	1524	3	1519	6	1519	12	1519	13	1520	16	1520	16
1826,37	1523	10	1524	6	1520	3	1521	-21	1521	-20	1521	-20	1521	-21
1831,39	1524	7	1524	5	1520	-2	1520	7	1521	6	1521	7	1521	8
1836,39	1521,5	2	1522	2	1521	-1	1521	0	1522	-7	1522	-10	1520	-14
1841,41	1522	2	1523	-0,5	1520	-3	1521	-1	1521	-3	1522	-5	1520	-5
1846,39	1522	2	1522	-1	1521	-3	1522	-2	1522	-2	1522	-5	1520	-5
1851,43	1522	1	1522	-1	1521	0	1521	-2	1522	-2	1522	-4	1519	-5
1856,42	1522	0	1522	-1	1522	2	1522	2	1522	-1	1522	-3	1520	-3
1861,44	1522	-0,5	1522	-1	1522	3	1522	-2	1521	-1	1521	0	1519	0
1866,45	1521	0	1522	-2	1521	-1	1521	2	1522	2	1522	2	1519	2
1871,51	1522	-1	1523	-3	1520	2	1522	3	1522	4	1522	3	1521	2
1876,48	1524	1	1524	-2	1520	2	1521	-4	1522	-4	1522	-2	1521	-2
1881,49	1524	1	1524	0	1519	1	1519	1	1520	1	1522	3	1521	4
1886,48	1523	1	1522	-2	1519	0	1519	0	1520	0	1520	0	1520	-1
1891,48	1522	1	1523	1	1519	1	1520	0	1520	2	1521	3	1521	2
1896,51	1522	0	1523	0	1521	1	1521	-1	1520	-1	1520	-1	1521	-1
1901,52	1522	0	1522	-1	1520	0	1520	-1	1520	-2	1520	-3	1521	-2
1906,5	1522	-1	1523	-1	1520	-1	1520	-2	1521	-2	1521	-1	1521	0
1911	1523	1	1523	-1	1520	-1	1519	0	1520	1	1522	2	1522	4
1916,02	1523	8	1524	-2	1519	9	1519	1	1520	4	1521	4	1521	3
1920,99	1523	6	1524	0	1519	9	1519	8	1520	10	1521	9	1521	9
1925,98	1522	8	1525	0	1520	9	1519	9	1519	10	1522	9	1522	9
Среднее	1522,5	3,2	1523,1	-0,1	1520,0	2,0	1520,3	0,7	1520,71	0,58	1521,25	0,375	1520,54	0,125
СКО	0,9	4,0	0,9	2,2	1,0	3,7	1,12	6,1	0,99	6,49	0,79	6,98	0,83	7,44

Таблица Е.3 - Данные по ширине колеи и уровню на конструкции Alstom

	Декабрь	2014 года	Март 2	015 года	Август	2015 года	Декабрь	2015 года	Март 2	016 года	Июль 2	016 года	Октябрь	2016 года
отметка по пути, м	ширина колеи, мм	уровень, мм (лево "-", право "+")												
1952,41	1522	13	1523	2	1521	2	1520	3	1521	3	1522	4	1521	3
1958,36	1522	13	1523	3	1520	3	1520	5	1521	7	1522	9	1522	9
1964,34	1523	13	1523	3	1519	2	1521	3	1520	3	1521	3	1521	3
1970,3	1523	2	1524	-2	1520	3	1520	11	1520	12	1520	11	1520	10
1976,22	1526	-1	1524	-3	1525	3	1525	12	1524	13	1524	14	1523	13
1982,07	1525	4	1524	2	1524	0	1524	5	1525	6	1525	5	1524	4
1988,05	1523	1,5	1524	0	1522	0	1522	1	1522	1	1522	1	1522	0
1994,05	1524	5	1524	3	1521	0	1522	3	1522	4	1522	3	1523	3
2000,09	1522	3	1522	0	1522	-2	1522	-2	1523	-3	1523	-2	1523	-1
2006,04	1525	5	1524	2	1520	-1	1523	2	1523	2	1523	2	1523	3
2012,03	1523	3	1523	0	1524	-2	1524	-8	1525	-9	1524	-10	1524	-10
2017,8	1523	6	1523	3	1521	-1	1521	2	1522	2	1523	3	1524	4
2023,8	1522	1	1523	-2	1521	-4	1522	0	1522	0	1522	0	1522	0
2029,76	1524	1	1524	-1	1520	0	1520	2	1521	1,5	1522	1	1523	1,5
2035,76	1524	3	1524	0	1520	1	1521	2	1522	3	1522	4	1522	5
2041,72	1523	5	1523	4	1522	-1	1522	0	1524	0	1524	0	1523	1
2047,64	1523	4,5	1523	-2	1521	-3	1521	-2	1522	-3	1522	-3	1523	-3
2050,6	1522	1,5	1523	0	1521	1	1522	1	1524	2	1524	3	1524	4
2056,55	1524	6	1524	-1	1520	1	1523	4	1521	3	1522	3	1522	5
2062,54	1523	6	1524	-3	1522	4	1522	5	1523	6	1523	7	1523	10
2068,55	1522	9	1525	1	1520	7	1521	6	1522	5	1523	5	1522	6
2074,52	1524	7	1524	3	1520	6	1520	7	1522	7	1522	7	1522	7
Среднее	1523,3	5,1	1523,5	0,5	1521,2	0,9	1521,7	2,8	1522,32	2,98	1522,59	3,18	1522,55	3,52
СКО	1,1	4,0	0,7	2,2	1,5	2,7	1,4	4,3	1,43	4,78	1,14	4,97	1,06	4,92

Таблица Е.4 - Данные по ширине колеи и уровню на конструкции MaxBogl

	Декабрь	2014 года	Март 2	015 года	Август 2	2015 года	Декабрь	2015 года	Март 2	016 года	Июль 2	016 года	Октябрь	2016 года
отметка по пути, м	ширина колеи, мм	уровень, мм (лево "-", право "+")												
2094,43	1525	5,5	1525	-3	1524	4	1524	7	1525	7	1524	8	1523	8
2099,5	1525	6	1525	-2	1523	4	1523	7	1524	8	1524	8	1524	8
2104,49	1526	6	1526	0	1523	5	1523	6	1525	7	1525	7	1524	7
2109,49	1525	5,5	1526	2	1524	3	1524	5	1525	5	1524	5	1524	4
2114,49	1523	1	1522	-2	1523	5	1523	0	1522	-1	1523	0	1524	0
2120,31	1522	1	1522	0	1522	-1	1522	0	1522	1	1523	2	1523	3
2126,79	1522	1	1522	0	1520	0	1520	2	1522	4	1523	6	1524	6
2133,29	1522	1	1522	-1	1520	0	1520	0	1521	0	1522	-1	1523	-1
2139,8	1522	1	1522	0	1520	0	1520	0	1522	0	1522	-1	1522	-2
2146,31	1522	1	1523	-1	1519	0	1519	1	1521	-2	1522	-5	1522	-5
2152,79	1521	1	1522	0	1519	0	1519	5	1520	4	1521	5	1522	5
2159,27	1521	1	1522	2	1520	-1	1520	-2	1520	-2	1521	-2	1522	-2
2165,75	1521	1	1522	2	1520	-1	1520	0	1520	1	1521	1	1521	0
2172,26	1521	1	1521	-1	1520	-1	1520	-1	1521	-2	1521	-2	1521	-3
2178,7	1521	2	1523	-2	1519	-1	1519	-1	1520	-2	1521	-4	1522	-4
2185,19	1521	2	1523	0	1520	-1	1520	-2	1520	-2	1520	-2	1521	1
2191,64	1523	1	1523	1	1521	0	1521	2	1520	1	1521	2	1522	5
2196,62	1524	0	1525	2	1521	3	1521	4	1521	6	1522	6	1522	6
2201,6	1523	5,5	1525	4	1521	5	1521	6	1522	5	1522	6	1522	6
2206,66	1523	5	1525	-2	1520	5	1520	4	1521	4	1523	3	1522	3
2211,72	1525	5	1524	-3	1522	6	1522	5	1522	5	1522	5	1523	5
Среднее	1522,8	2,5	1523,3	-0,2	1521,0	1,6	1521	2,3	1521,7	2,24	1522,24	2,24	1522,52	2,38
СКО	1,6	2,2	1,6	1,9	1,3	2,6	1,6	3	1,71	3,46	1,3	4,05	1,03	4,09

Таблица Е.5 - Данные по ширине колеи и уровню на конструкции LVT

	Декабрь	2014 года	Март 2	015 года	Август 2	2015 года	Декабрь	2015 года	Март 2	016 года	Июль 2	016 года	Октябрь	2016 года
отметка по пути, м	ширина колеи, мм	уровень, мм (лево "-", право "+")												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2232,47	1523	5,5	1524	-2	1520	5,5	1521	8	1522	5	1522	3	1523	1
2240,45	1522	8	1523	0	1520	8	1522	6	1522	1	1522	-2	1522	-5
2245,46	1523	8	1523	-2	1522	8	1523	8	1522	2	1522	-2	1522	-5
2251,07	1524	5	1524	-2	1522	5	1522	8	1523	9	1523	10	1523	8
2256,39	1524	3	1525	6	1519	3	1520	0	1521	1	1521	2	1522	2
2257,1	1523	2	1523	0	1519	2	1519	1	1520	2	1520	0	1521	0
2262,35	1524	2	1523	2	1520	2	1521	1	1520	4	1520	5	1521	5
2268,23	1523	2	1523	-1	1520	2	1520	0	1520	0	1520	-1	1521	-2
2274,17	1524	1,5	1524	-1	1520	1,5	1521	1	1521	1	1521	2	1521	2
2280,14	1523	1,5	1523	-2	1522	1,5	1522	2	1522	3	1522	4	1521	5
2286,07	1523	1,5	1523	-1	1521	1,5	1521	-3	1522	-4	1522	-3	1522	-3
2292,02	1524	2,5	1524	-1	1520	2,5	1520	-2	1521	-3	1521	-4	1522	-5
2297,97	1523	2,5	1524	1	1517	2,5	1519	-4	1520	-4	1520	-4	1522	-4
2303,91	1524	2,5	1524	1	1520	2,5	1520	1	1520	-1	1520	-2	1522	-3
2309,84	1523	0,5	1523	-1	1520	0,5	1522	1	1522	1	1522	2	1522	3
2315,78	1522	0,5	1523	-1	1520	0,5	1520	0	1521	-1	1521	0	1522	0
2321,73	1523	-0,5	1523	-1	1520	-0,5	1521	2	1520	2	1520	3	1522	3
2327,68	1524	-0,5	1524	-1	1521	-0,5	1521	0	1521	2	1521	3	1521	4
2333,28	1522	1,5	1523	-1	1520	1,5	1520	-1	1521	0	1521	2	1522	3
2338,38	1524	5	1524	7	1519	5	1519	-2	1521	-3	1521	-4	1522	-5
2344,39	1523	12	1523	14	1517	12	1519	-15	1521	-14	1521	-14	1521	-14
2350,41	1523	20	1523	16	1520	20	1522	-24	1521	-22	1521	-20	1521	-19

Продолжение Таблицы Е.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2356,41	1521	24	1522	23	1524	24	1524	-26	1523	-26	1523	-26	1522	-26
2362,41	1524	31	1524	30	1524	31	1524	-27	1523	-27	1523	-28	1523	-29
2363,48	1524	32	1525	29	1524	32	1524	-28	1523	-26	1523	-26	1523	-26
2368,48	1525	36	1525	31	1524	48	1524	-27	1525	-28	1525	-28	1524	-28
2373,48	1524	42	1525	37	1520	56	1522	-28	1524	-25	1524	-23	1524	-23
2378,48	1524	45,5	1524	42	1522	60	1522	-28	1523	-27	1523	-28	1524	-29
2383,48	1525	51	1525	47	1522	64	1522	-28	1523	-29	1523	-29	1524	-29
2388,48	1524	59	1525	50	1521	75	1522	-31	1523	-30	1523	-29	1523	-28
Среднее	1523,4	13,6	1523,7	10,6	1520,7	15,9	1521,3	-7,8	1521,7	-7,9	1521,7	-7,9	1522,17	-8,23
СКО	0,9	17,7	0,8	16,9	1,8	22,4	1,53	13,7	1,32	13,1	1,32	12,99	0,99	12,86

	П	равая нить)	Левая нить			
	Износ, м	ИM	Подуклонка,	Износ, м	ИМ	Подуклонка,	
	вертикальный	боковой	1/	вертикальный	боковой	1/	
1821,38	0,01	0,02	18	0,01	0,07	20	
1826,37	0,01	0,03	18	0,01	0,08	20	
1831,39	0,01	0,03	18	0,01	0,08	22	
1836,39	0,01	0,04	19	0,01	0,09	21	
1841,41	0,01	0,06	19	0,01	0,07	19	
1846,39	0,015	0,06	18	0,01	0,07	18	
1851,43	0,01	0,07	17	0,02	0,08	17	
1856,42	0,01	0,1	17	0,01	0,08	17	
1861,44	0,01	0,08	17	0,01	0,07	18	
1866,45	0,01	0,07	17	0,02	0,07	19	
1871,51	0,01	0,07	18	0,01	0,08	19	
1876,48	0,01	0,08	18	0,01	0,08	19	
1881,49	0,02	0,08	18	0,02	0,07	18	
1886,48	0,015	0,06	18	0,02	0,07	18	
1891,48	0,01	0,06	18	0,02	0,08	18	
1896,51	0,01	0,06	17	0,01	0,08	19	
1901,52	0,015	0,07	18	0,01	0,08	19	
1906,5	0,01	0,07	18	0,02	0,08	19	
1911	0,01	0,07	18	0,02	0,09	19	
1916,02	0,01	0,08	19	0,02	0,1	19	
1920,99	0,01	0,09	19	0,02	0,11	19	
1925,98	0,01	0,09	20	0,02	0,11	19	
1930,95	0,01	0,09	19	0,02	0,12	19	
1935,97	0,01	0,09	19	0,02	0,12	20	
Среднее	0,011	0,068		0,015	0,085		
СКО	0,003	0,02		0,005	0,016		

Таблица Е.6 - Данные по износам и подуклонке на конструкции Tines

	П	равая нитн)	Левая нить			
	Износ, м	ИM	Подуклонка,	Износ, м	ſМ	Подуклонка,	
	вертикальный	боковой	1/	вертикальный	боковой	1/	
1952,41	0,01	0,07	20	0,01	0,10	20	
1958,36	0,01	0,08	20	0,01	0,10	20	
1964,34	0,02	0,08	19	0,02	0,10	20	
1970,3	0,02	0,07	19	0,02	0,11	20	
1976,22	0,01	0,07	20	0,03	0,11	21	
1982,07	0,01	0,07	20	0,02	0,11	21	
1988,05	0,01	0,07	21	0,02	0,10	21	
1994,05	0,01	0,08	20	0,03	0,10	21	
2000,09	0,02	0,08	21	0,03	0,11	20	
2006,04	0,01	0,08	20	0,03	0,10	21	
2012,03	0,01	0,09	20	0,02	0,11	20	
2017,8	0,01	0,10	21	0,02	0,11	20	
2023,8	0,01	0,09	21	0,02	0,12	21	
2029,76	0,01	0,08	19	0,02	0,11	19	
2035,76	0,02	0,09	20	0,02	0,11	21	
2041,72	0,02	0,1	20	0,03	0,10	21	
2047,64	0,02	0,09	21	0,03	0,10	20	
2050,6	0,02	0,10	21	0,03	0,10	20	
2056,55	0,02	0,12	21	0,03	0,12	20	
2062,54	0,02	0,12	19	0,03	0,12	21	
2068,55	0,02	0,12	20	0,02	0,11	21	
2074,52	0,02	0,12	21	0,03	0,12	20	
Среднее	0,015	0,090		0,024	0,108		
СКО	0,005	0,018		0,007	0,008		

Таблица Е.7 - Данные по износам и подуклонке на конструкции Alstom

383	

	П	равая нить	•	Левая нить			
	Износ, м	ΔM	Подуклонка,	Износ, м	ΔM	Подуклонка,	
	вертикальный	боковой	1/	вертикальный	боковой	1/	
2094,43	0,01	0,09	21	0,02	0,10	21	
2099,5	0,02	0,10	21	0,02	0,11	20	
2104,49	0,01	0,10	21	0,02	0,11	20	
2109,49	0,02	0,10	20	0,02	0,11	20	
2114,49	0,01	0,10	20	0,02	0,11	21	
2120,31	0,01	0,10	20	0,02	0,12	21	
2126,79	0,01	0,09	20	0,02	0,11	21	
2133,29	0,01	0,08	20	0,02	0,11	21	
2139,8	0,01	0,09	20	0,02	0,11	21	
2146,31	0,01	0,08	20	0,02	0,11	21	
2152,79	0,02	0,09	20	0,02	0,10	20	
2159,27	0,02	0,09	19	0,02	0,10	21	
2165,75	0,02	0,09	20	0,02	0,10	21	
2172,26	0,02	0,10	20	0,02	0,10	21	
2178,7	0,01	0,10	20	0,02	0,10	21	
2185,19	0,01	0,09	20	0,01	0,10	21	
2191,64	0,01	0,10	21	0,01	0,09	20	
2196,62	0,02	0,11	21	0,02	0,13	21	
2201,6	0,02	0,10	21	0,02	0,12	21	
2206,66	0,02	0,10	21	0,02	0,12	21	
2211,72	0,02	0,10	21	0,02	0,12	21	
Среднее	0,015	0,095		0,019	0,109		
СКО	0,005	0,007		0,003	0,010		

Таблица Е.8 - Данные по износам и подуклонке на MaxBogl

	П	равая нить	, ,	Левая нить			
	Износ, м	1M	Подуклонка,	Износ, м	ſМ	Подуклонка,	
	вертикальный	боковой	1/	вертикальный	боковой	1/	
2232,47	0,02	0,10	20	0,02	0,10	21	
2240,45	0,02	0,11	21	0,02	0,10	22	
2245,46	0,02	0,10	21	0,02	0,11	22	
2251,07	0,02	0,10	21	0,02	0,10	21	
2256,39	0,02	0,10	21	0,02	0,12	22	
2257,1	0,02	0,10	21	0,02	0,12	22	
2262,35	0,02	0,10	20	0,02	0,12	22	
2268,23	0,02	0,10	20	0,02	0,12	22	
2274,17	0,02	0,11	21	0,03	0,12	21	
2280,14	0,02	0,10	21	0,02	0,12	20	
2286,07	0,02	0,11	21	0,02	0,12	20	
2292,02	0,01	0,11	21	0,03	0,12	20	
2297,97	0,01	0,10	21	0,02	0,12	20	
2303,91	0,01	0,11	21	0,02	0,12	20	
2309,84	0,01	0,11	21	0,02	0,12	21	
2315,78	0,01	0,11	21	0,02	0,12	21	
2321,73	0,01	0,11	19	0,02	0,12	21	
2327,68	0,01	0,10	21	0,02	0,12	22	
2333,28	0,02	0,11	21	0,02	0,12	20	
2338,38	0,02	0,11	21	0,03	0,12	21	
2344,39	0,02	0,11	20	0,02	0,12	22	
2350,41	0,02	0,11	20	0,02	0,11	22	
2356,41	0,02	0,11	21	0,03	0,12	22	
2362,41	0,02	0,10	21	0,04	0,12	21	
2363,48	0,02	0,12	21	0,03	0,13	21	
2364,48	0,03	0,11	21	0,04	0,12	21	
2365,48	0,03	0,11	20	0,03	0,12	22	
2366,48	0,03	0,12	21	0,03	0,13	22	
2367,48	0,02	0,10	21	0,03	0,13	22	
Среднее	0,019	0,107		0,024	0,118		
СКО	0,006	0,006		0,006	0,008		

Таблица Е.9 - Данные по износам и подуклонке на конструкции LVT

Вертикальный износ на всех конструкциях составил от 0,011 до 0,024 мм, при значениях СКО 0,002 до 0,007 мм. Боковой износ на всех конструкциях составлял от 0,068 до 0,118 мм, при значениях СКО 0,006 до 0,02 мм.

Приложение Ж

Документация на оптоволоконную систему диагностики.

Акты укладки. Сертификат

УТВЕРЖДАЮ Генеральный директор ЗАО «Лазер Солющенс»/ А.Л. Ермилов 2014 г.

Волоконно-оптическая система сигнализации состояния объектов

инфраструктуры

Технические условия

ЛАБД.401223.005 ТУ/П

Дата введения в действие-28.11.2014 г. Срок действия не ограничен

Согласовано:

Центр обследования и диагностики инженерных сооружений - филиал ОАО "РЖД" (Центр ИССО) Заместитель директора по земляному полотну

Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ОАО «ВНИИЖТ») Начальник Испытательного центра

Технический директор ЗАО «Лазер Солюшенс»

Лебедев А.В.



1 Область применения	3
2 Технические требования	5
2.1Общие требования	5
2.2Описание составных частей	5
2.3 Требования к основным элементам системы мониторинга	18
2.3.1 Требование к сенсору деформации	18
2.3.2 Требование к сенсору температуры	20
2.3.3 Требования к анализатору ВРМБ DITEST-14	22
2.3.4 Требования к оптическим коммутаторам DITEST-SO	24
2.3.5 Требования к серверу системы	26
2.4 Описание и требования к автоматизированному рабочему	29
mecty (APM)	
2.5 Требования к материалам и покупным изделиям	31
2.6 Основные требования к волоконно-оптической системы	
сигнализации состояния объектов инфраструктуры	
3 Комплектность	32
4 Маркировка	32
5 Упаковка	34
6 Требования по безопасности	35
7 Требования к энергоснабжению, эргономике стойкости к	36
внешним воздействиям и электромагнитной совместимости	
8 Правила приемки	38
9 Методы контроля	40
10 Транспортирование и хранение	41
11 Указания по эксплуатации	42
12 Гарантии изготовителя	42

1 Область применения

1.1 Настоящие технические условия (далее по тексту – «ТУ») распространяются «волоконно-оптическую на систему сигнализации состояния объектов инфраструктуры» (далее по тексту – «система»), предназначенную заблаговременного обнаружения изменений для В состоянии контролируемых объектов и для последующего предупреждения соответствующих служб заказчика о наблюдаемых изменениях и, как следствие, для повышения безопасности и надежности Железнодорожного Полотна (далее ЖДП) и Полотна Автомобильной Дороги автодорог (далее ПАД), для получения информации о состоянии грунта по следующим параметрам

- распределения деформация грунта вдоль объекта мониторинга;

- распределения температура вдоль объекта мониторинга;

Контроль распределения деформации и температуры на объекте позволяет проводить мониторинг следующих событий:

- распределение деформации в грунте под ЖДП и ПАД (относительно начального измерения);

- смещение ЖДП или ПАД вследствие геологического или техногенного влияния (относительно начального положения, зафиксированного системой в момент первого измерения);

- обнаружение растепления многолетнемерзлого грунта в районах прохождения ЖДП или ПАД;

- обнаружения провалов грунта вследствие карстовых или суффозионных проявлений в районах прохождения ЖДП или ПАД.

Изм	Пист	№ докум.	Подп.	Лата					

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. Nº подл.

1.2 Условное обозначение комплекса при заказе и/(или) в другой технической документации:

«Волоконно-оптическая система сигнализации состояния объектов инфраструктуры» ЛАБД.401223.005 , XX-XX-XX-XX»

- условное обозначение сенсора

в поставке:

ТГ – температура грунта;

ДГ – деформация грунта;

УС – возможность

использования температурного сенсора для связи;

КС – деформация грунта вследствие карстовых или суффозионных проявлений;

0-отсутствие сенсора.

Пример: «Волоконно-оптическая система сигнализации состояния объекта инфраструктуры» ЛАБД.401223.005, ТГ-0-УС-0», т.е. «Система» с сенсором температуры грунта и возможностью использования температурного сенсора для связи.

1.3 Настоящий документ предназначен для персонала организации заказчика и сторонних специализированных организаций, занимающихся вопросами проектирования, монтажа и ввода в эксплуатацию системы.

	-			
ИзмП	ucm	NO DOKUM	Пода	Пата

Лист

2 Технические требования

2.1 Общие требования

Волоконно-оптическая система сигнализации состояния объектов инфраструктуры должна соответствовать требованиям настоящих технических условий.

Описание составных частей системы

Система состоит из линейной и программно-аппаратной частей.

2.2.1 Линейная часть в зависимости от назначения системы в свою очередь может состоять из нескольких подсистем и частей.

2.2.2.1 Деформационная подсистема

Волоконно-оптический сенсор деформации (ФОСД-Г) предназначен для мониторинга распределения продольной механической деформации объектов различной природы. Для прокладки и монтажа сенсора деформации В грунтах различных категории должны применяться специальные разработанные методы прокладки предприятием изготовителем. Волоконно-оптический сенсор деформации представляет из себя специальный оптический кабель закрепленный в грунте (рисунок 2.2.2.1).



Рисунок 2.2.2.1 – Внешний вид сенсора деформации грунта

Примечание: строение сенсора может меняться в зависимости от категории грунта и условий монтажа.

							Лисп
						ЛАБД.401223.005 ТУ/П	
	Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Инв. № подл. Подп. и дата Взам. инв. № Инв. № дубл. Подп. и дата

2.2.2.2 Температурная подсистема

Температурная подсистема предназначена для температурного контроля грунта, кроме основной задачи она используется для термокомпенсации сенсоров деформации грунта. Представляет из себя распределенный сенсор (ДКП – ГТМ), закрепленный внутри грунта в непосредственной близости от объекта мониторинга и сенсора деформации (рисунок 2.2.2.2 и 2.2.26). В зависимости от категории грунта и способа монтажа возможно изготовление сенсора с допустимым растягивающим усилием от 3 до 100 кН.



Рисунок 2.2.2.2а - Строение сенсора температуры с одним повивом



Броня (стальная проволока) Внутренняя Оптический модvль (трvбка из ПБТ) Оптическое Центральный силовой элемент Кордель Межмодvльный Гидрофобный Внешняя защитная

Рисунок 2.2.2.26 – Строение сенсора температуры с двумя повивами проволочной брони

В зависимости от конфигурации системы возможно изготовление ДКП – ГТМ с числом волокон 8, 16, 24.

						Лист
					ЛАБД.401223.005 ТУ/П	<u> </u>
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

	Таблица 2.2.2.	4 – Вспомогателн	ьные элем	ленты монтажа		
	Наименование вспомогательного элемента	Основной доку	иент	Назначение		
	Комплект для герметизации защитной пластиковой трубы	ЛАБД.305622.00	01ПС	Использование в состан волоконно-оптической систем мониторинга для герметизаци мест ввода сенсора деформаци и температуры в защитну пластиковую трубу, защит сенсора деформации температуры или аналогичног в местах его отвода от ЖДП ПАД	зе ы и и ю ы и то и	
	Кабельный колодец ККТ-1	ТУ40242405-01 2009	3-	Предназначена для защит соединительной муфты укладки запаса оптико волоконного кабеля	ы И Э-	
Подп. и дата	Комплект вводов кабеля для кабельного колодца	ЛАБД.301529.0	01ПС	Предназначен для герметизаци вводного патрубка колодца провода сенсоров температур и деформации в кабельны колодец	и и ы й	
Взам. инв. Nº дубл.	Комплект вводов ЗПТ в кабельного колодца	ЛАБД.301529.0	02ПС	Предназначен для герметизаци вводного патрубка колодца провода сенсоров температур и деформации в кабельны колодец	и и ы й	
одл. Подп. и дата ,						
в. Nº пс		ЛАБЛ 401223 005 ТУ/П				
ЧЧ	Изм Лист № докум. Подг	. Дата	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			

Г

	Продолжен	ие таб	блиць	ы 2.2.2.4 – Вспом	югательные элементы монтажа	
На вспо	именование могательно элемента	е го		Основной документ	Назначение	
Комі зазем	плект прово иления	да	Инф пись декл соот изде «Свя	ормационное мо о арациях ветствия на лия ЗАО изьстройдеталь»	Провод для подключения брони кабеля к земле	
Комі ввод M6, 1	плект №4 дл а ОК (МТО Б1, В2)	ія К- ²	ТУ5 27564	5296-058- 1371-2009	Предназначен для ввода в цилиндрические патрубки оголовника муфты типа МТОК с наружным диаметром от 6 до 22 мм (диаметром по внутренней оболочке до 12,5 мм).	
Лентг	а сигнальная	C A F	Серти cooтв RU.A	ификат етствия №РОСС Ю.64.НО5968	Укладывается в грунт, выше сенсоров и кабелей питания, для обнаружения прокладки линии до поднятия грунта во время демонта: и проверки системы	жа
Комплект заземления оптических кабелей в БРЭКС ВКУ-1			Серт соот RU.A	гификат ветствия РОСС АЯ55.Н06545	Предназначены для заземления брони в муфте	[
Муфта оптическая МТОК Б1/216 – 1КТ3645-К-55		сая	ТУ 5 2756	5296-058- 54371-2009	Предназначена для коммутации сенсоров и оптоволоконных кабелей, для защиты соединения. зависимости от грунта, условий эксплуатации и места монтажа выбирается тип муфты.	В
	I			т	агл 401 22 2 005 ту/п	Лисг
м Лист	№ докум.	Подп.	Дата	J.	алд.401223.003 ТУ/11	

I

Подп. и дата

Взам. инв. Nº Инв. Nº дубл.

Подп. и дата

Инв. Nº подл.

Продолжение	таблицы 2.2.2.4 – Вспо	могательные элементы монтажа
Наименование вспомогательного элемента	Основной документ	Назначение
Контейнер проводов заземления	ТУ 5296-058-27564371- 2009	Предназначен для осуществления периодических измерений величины сопротивления изоляции шлангов ОК и подачи сигнала генератора по броне ОК при поиске мест повреждений шланга.
Муфта оптическая МТОК Б1/216 – 1КТ3645-К-44	ТУ 5296-058- 27564371-2009	Предназначена для коммутации сенсоров и оптоволоконных кабелей, для защиты соединения. В зависимости от грунта, условий эксплуатации и места монтажа выбирается тип муфты.
Якорь кабельный грунтовой ЯКГ-3	ЛАБД.301363.001 ПС	Устанавливается на сенсор деформации грунта, используется для контроля подвижек в грунте
Пригруз мягкий	ЛАБД.322411.00 1ПС	Пригруз устанавливаемый на сенсор деформации грунта, используется для контроля: провалов, размытия и суффозионных проявлений грунта в районах прохождения ЖДП или ПАД

Примечание: в зависимости от сложности монтажных работ и желаний заказчика могут использоваться различные комбинации вспомогательных элементов монтажа.

2.2.3 Работа программно-аппаратной части основывается на опросе состояния волоконно-оптического сенсора.

Программно-аппаратная часть состоит из:

тодл.						
Nº I						
Н8.						
Ż	Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

- шкафа удаленного измерительного устройства (RTU, в зависимости от поставки модель шкафа подбирается индивидуально под требования заказчика);

- серверов;

- автоматизированного рабочего места (APM), соединенных между собой по сети Ethernet.

2.2.3.1 Шкаф RTU представляет из себя металлическую стойку для оборудования. Основная задача шкафа с установленным оборудованием это сбор информации с сенсоров, её анализ и представление в удобном для анализа виде.

В шкафу RTU устанавливается:

анализатор DITEST. Ключевым измерительным прибором программно-аппаратной части системы является анализатор, который представляет собой импульсный оптический рефлектометр, измеряющий сигнал вынужденного Бриллюэновского рассеяния из каждой точки оптического сенсора. Анализ волокна сигнала вынужденного Бриллюэновского рассеяния, в зависимости от типа подключенного сенсора, позволяет измерять распределение температуры или напряжения по всей длине сенсора. Таким образом, протяженный волоконнооптический сенсор является эквивалентом огромного количества точечных датчиков (например, программное обеспечение анализатора DITEST позволяет разбить контролируемый участок длиной 50 км на 100 000 датчиков);

Рисунок 2.2.3.1а – Внешний вид анализатора DITEST

			Лист
		ЛАБД.401223.005 ТУ/П	
Подп.	Дата		

Лист

/31/

№ докум.

- <u>шкаф кроссовый оптический</u>. Шкаф предназначен для концевой заделки, распределения и коммутации оптических кабелей связи.

- <u>оптический переключатель</u> серии DITEST-SO-N, где N обозначает число коммутируемых каналов, например DITEST-SO-16 (рисунок 2.2.3.16) или DITEST-SO-20. Переключатель расширяет возможности анализатора DITEST-14 увеличивая число подключаемых к нему каналов измерения.



Рисунок 2.2.3.16 – Внешний вид оптического переключателя DITEST-SO-N 16 - <u>Серверное оборудование</u>

Данные по сети Enternet полученные от оборудования, расположенного в шкафах RTU, направляются в сервер обработки данных DITEST AIM, где из машинного кода преобразовываются в удобно читаемый вид. Данные о распределенной температуре отправляются сразу на автоматизированное рабочее место оператора (APM). Данные о деформации отправляются на сервер 3DPIPE, где преобразуются в наглядно представляемый вид деформации грунта под ЖДП и ПАД.

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

1нв. № подл.

Лист

Изм

№ докум.

Подп.

Дата

Сервер со специализированным ПО устанавливается в помещении диспетчерской и связывается с шкафом RTU по сети Ethernet.

2.2.4 Программно-аппаратная часть системы должна отвечать требованиям для климатического исполнения категории 4 по <u>ГОСТ 15543-70</u>. По функционалу система состоит из линейной и программно-аппаратной частей, программно-аппаратная часть <u>предназначена для</u> работы при температуре воздуха в рабочем помещении от плюс 10 °C до <u>плюс 35 °C</u>, относительной влажности до 80% (при температуре 20 °C) и атмосферном давлении 83.9 – 106.6 кПа (630 – 800 мм.рт.ст.).

ЛАБД.401223.005 ТУ/П

Лист

2.2.5 Структурная схема системы для ЖДП приведена на рисунке

2.2.5а, структурная схема для автомобильной дороги приведена на рисунке 2.2.5б.

Примечание: схема прокладки сенсора может меняться в зависимости от конкретного проекта и желаний заказчика.

2.2.5.1 Монтаж осуществляется в соответствии с инструкцией по монтажу волоконно-оптических сенсоров принятой на предприятии изготовителе.

2.2.6 Система мониторинга балластной призмы и земляного полотна при эксплуатации безбалластных конструкций верхнего строения пути.

2.2.6.1 Расположение (конфигурация) сенсоров в балластной призме и земляном полотне является ключевым фактором, позволяющим проводить измерения и интерпретацию параметров с заданной точностью (рисунок 2.2.6.1), однако может меняться в зависимости от технологии укладки и производства бетона железнодорожного полотна и будет окончательно определено на этапе проектирования.



Тодп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

1нв. № подл.

Рисунок 2.2.6.1 Схема расположения в земляном полотне и балластной призме при использовании безбалластной конструкции верхнего строения пути.

2.2.6.2 Глубина расположения линейной части в грунте в общем случае зависит от: схем возможного деформирования грунта, необходимости защиты сенсоров и технологии устройства системы, и

						Лист
					ЛАБД.401223.005 ТУ/П	
Изм	Пист	№ докум.	Подп.	Лата		
должна назначаться отдельно в каждом конкретном случае. На сенсоры деформации земляного полотна с шагом 1-3 метра установлены якоря, обеспечивающие механическую связь с грунтом.

2.2.6.3 Ппроцесс монтажа, наладки, испытаний и ввод в эксплуатацию волоконно-оптических систем мониторинга аналогичен подобным работам для волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Это обусловлено тем, что система мониторинга имеет в своей основе ВОЛС (т.е. использует их компоненты: волоконно-оптический кабель (специальной конструкции), оптические муфты, камеры оптические трубопроводные, оптические кроссы, оптические шнуры и т.д., а также специализированное монтажное и измерительное оборудование), и через соответствующие интерфейсы сопрягается с ними. Все это, а также структурная схожесть с ВОЛС позволяет частично использовать при организации монтажа, наладке, эксплуатацию соответствующие испытаний И вводе В нормативнотехнические документы, регламентирующие процесс создания ВОЛС; работы проводить силами подрядных организаций, специализирующихся на строительстве ВОЛС.

Вместе с тем в процессах монтажа, наладки, испытаний и вводе в эксплуатацию систем мониторинга существует и своя специфика связанная, с использованием протяженного волоконно-оптического сенсора:

- сенсоры деформации земляного полотна крепятся к анкерным якорям, устанавливаемым в соответствие с выбранной топологией сенсоров;

- сенсоры деформации должны монтироваться с контролируемым растягивающим усилием;

- производится привязка сенсоров к контролируемому объекту (пикетажу).

Изм	Пист	№ докум.	Подп.	Лата

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

Лист



Рисунок 2.2.5 а – Структурная схема системы расположенной под ЖДП

2.2.6 Средний срок службы.

2.2.6.1 Линейная часть:

- срок службы изделий составляет 25 лет.

2.2.6.2 Программно-аппаратная часть:

- срок службы изделий не менее 10 лет.

2.2.7 Профилактическое техническое обслуживание:

- резервное копирование базы данных, архивацию и очистку, замену пылевого фильтра проводят ежегодно (в течение 1 дня работы на объекте);

- замена вентиляторов проводится каждые 5 лет (в течение двух рабочих дней на объекте);

- замена компьютеров, жестких дисков проводится каждые 10 лет (в течение 2 рабочих дней на объекте);

Для кабелей/волокон установленных на объекте, профилактическое обслуживание не требуется. В случае поломки, замена осуществляется только в том участке, где произошел обрыв.

	10,1	BRO B IOM	y fac I KC	, 1Д
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дan

Тодп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

Лист



В ряде случаев рекомендуется производить измерения натяжения оптических волокон сенсоров для оценки их остаточного ресурса и планирования предупредительного ремонта.

2.3 Требования к основным элементам системы мониторинга. Описание и требования к линейной части системы:

2.3.1 Требование к сенсору деформации

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. N<u>e</u>

Подп. и дата

нв. № подл.

2.3.1.1 Технические параметры и характеристики сенсора деформации соответствуют данным техническим условиям таблицы 2.3.1.1.

2.3.1.2 Оптическое одномодовое волокно, соответствующее рекомендации ITU-T G.652.D (G.657.A или специальное), диаметром 125 мкм, с исходным коэффициентом затухания не более 0,6 дБ/км на длине волны излучения 1,55 мкм, в плотном (tight-buffer) полимерном, УФ отверждаемом покрытии.

2.3.1.3 Два силовых элемента из стеклопластика с этилакрилатным покрытием, параллельно расположенных, диаметром 1 мм, с межосевым расстоянием 2,4 мм.

2.3.1.4 Наружное защитное покрытие из полимерной композиции с размерами 2х4,4мм.

2.3.1.5 Промежуточное защитное покрытие из полимерной композиции с размерами 2х4,4мм.

2.3.1.6 Двухслойная разнонаправленная обмотка, в слое по 6 проволок из нержавеющей стали, диаметром 0,4 мм.

Таблица 2.3.1.1 – Технические параметры и характеристики сенсора деформации

		N⁰		Парам	етр		Значение	Метод		
		3.1	Коэффициент затухания				не более 0,3 дБ/км	ГОСТ Р МЭК 793-1, С1С		
		3.2	Темпе	ратурны	ій диа	пазон		ГОСТ Р МЭК 793-1, F	'1	
			хранен	ния и эко	сплуат	ации,	- 50 +70 °C			
							ΠΛΕΠ 401222 0) 0 5 T V/II		
							03 1 9/11			
ļ	Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата					

	монтажа	- 30 + 50°C	
3.3	Предельно допустимое		ГОСТ Р МЭК 794-1, п.10, Е1
	растягивающее усилие в	1,8 кН	
	диапазоне упругой деформации		
	(соответствует удлинению 1.5%)		
3.4	Предельно допустимое		
	раздавливающее усилие		
	перпендикулярной широкой грани	10 кН/100 мм	ГОСТ Р МЭК 794-1, п.12, ЕЗ
	*		
3.5	Минимальный радиус изгиба		
	при изгибе в плоскости,	150 мм (при минус	
	перпендикулярной широкой грани	30°C)	
	**		
3.6	Стойкость к удару	не менее 10 Дж	ГОСТ Р МЭК 794-1, п.13, Е4
3.7	Габариты сечения – согласно		
	чертежу	6,5х7,5 мм	
3.8	Строительная длина	4 км	
3.9	Вес 1 км кабеля	36 кг	

* Предельно допустимое раздавливающее усилие в другой плоскости определяется испытаниями ** Минимальный радиус изгиба в плоскости широкой грани определяется испытаниями

2.3.2 Требование к сенсору температуры

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

2.3.2.1 Технические параметры и характеристики сенсоров температуры соответствуют данным техническим условиям

2.3.2.2 Оптическое одномодовое волокно, соответствующее рекомендации ITU-T G.652.D (G.657.A или специальное), диаметром 125 мкм, с исходным коэффициентом затухания не более 0,22 дБ/км на длине волны излучения 1,55 мкм, в плотном (tight-buffer) полимерном.

2.3.2.3 Кабель с оптическим сердечником из диэлектрических материалов, броней из круглых стальных проволок, с внешним полиэтиленовым защитным шлангом, с четырьмя элементами в повиве.

2.3.2.4 На оболочке маркировка согласно требованиям заказчика и метражные метки через 1 метр.

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

2.3.2.5 Конструкция температурного сенсора должна обеспечивать отсутствие продольной деформации измерительного волокна под действием внешних нагрузок в условиях эксплуатации.

2.3.2.6 Каждая строительная длина сенсора должна сопровождаться комплектом технической документации в электронном виде, совместимым с форматом данных измерительного прибора. Техническая документация должна включать результаты измерений в лабораторных условиях, необходимые для калибровки каждого измерительного OB.

2.3.2.7 Каждое измерительное волокно сенсора температуры должно быть протестировано на соответствие нелинейно-оптических характеристик требованиям анализатора (таблица 2.3.1.7). Соответствие должно быть подтверждено протоколом измерения.

Таблица 2.3.2.7 – Требования к нелинейно-оптическим характеристикам измерительного ОВ сенсора температуры.

Характеристика	Значение
Бриллюэновский сдвиг частоты, ГГц	от 10,8 до 12,2
Форма спектра Бриллюэновского	Соответствие
рассеяния	требованиям анализатора

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

2.3.2.8 Характеристики температурного сенсора должны соответствовать значениям, приведенным в таблице 2.3.2.8.

Таблица 2.3.2.8 – Требования к характеристикам сенсора температуры

-			Наиме	нован	ие параметра	Значение		
		Стойкос	ть к ра	аздав	8 кН/100мм			
	E3)							
		Радиус и	изгиба	кабел	Я	15 х диаметр кабеля (во		
					время работы)			
	ЛАБД					01223.005 ТУ/П	Лисп	
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				

Диапазон рабочей температуры (IEC	-40 °С до +50 °С
794-1-F5B)	
Диапазон температуры транспортировки	-40 °C до +50 °C
и хранения	
Диапазон температуры во время	-30 °С до +50 °С
прокладки	

В зависимости от категории грунта и способа монтажа возможно изготовление сенсора температуры ДКП – ГТМ с допустимым растягивающим усилием от 3 до 100 кН.

В зависимости от конфигурации системы возможно изготовление сенсора ДКП – ГТМ с числом волокон 8, 16, 24.

Описание и требования к программно-аппаратной части системы:

2.3.3 Требования к анализатору **BPMБ DITEST**

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

'нв. № подл.

2.3.3.1 Анализатор вынужденного бриллюэновского рассеяния (ВРМБ) DITEST является опросным устройством, которое подключается к сенсору с одного конца и с заданной периодичностью снимает характеристики текущего состояния сенсора.

В зависимости от протяженности участка мониторинга анализатор выбирается из ряда с динамическим диапазоном: 10, 12, 14 дБ на измеряемую полу-петлю.

2.3.3.2 Анализатор ВРМБ должен отвечать требованиям таблицы 2.3.3.2

Таблица 2.3.3.2 – Основные характеристики DITEST

					ЛАБД.401223.005 ТУ/П
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

		Хранение данных	Встроенный »	кесткий диск (10	60 ГБ или более)	
	Технические данные	Обмен данными и соединения	10 сек. минимальное 1- 2 мин. типичное 5-10 мин. измерения с высоким разрешением Порты Ethernet, USB, RS232, выходные реле SPTP (сигнал тревоги и системный статус, Макс. 230 В переменного напряжения и током 1 А)			
		Время сбора данных				
		Диапазоны	10 ГГц- 13 ГГц	-273°С до 700°С	- 3% сжатие до + 3% растяжение	
		Разрешение	частоты 0.1 МГц	о.1°С	2 мкстр	
	X	Измеряемые величины	Механические де частоты, значе Бриллюэновся Брилл. сдвиг	еформации, Бри ения Температу кого усиления и	ллюэновский сдвиг ры, коэффициент ширина полосы	
	сарактерис	Динамический диапазон	От 10 до 20 дБ на измеряемой полу-петле (в зависимости от модели анализатора)			
	ГИКИ	Количество точек измерения		100 000		
		способность по		0.1 м		
		разрешение* <i>Типичное</i> Разрешающая	1 м при 20 км / 2 м	при 30 км / 3 м км	при 50 км/4 м при 65	
		Пространственное	0.5 до 20	м. (при дискрет	ности 0.1 м)	
			Стандартное одно		еское волокно G.032	
		Конфигурация датчиков	Два о одиночное оп	птоволокна (пет товолокно (зерн	гля) или кало на торце)**	
		Количество каналов	Совместим с внешними оптическими переключателями модели SO-N (опционально). Максимальное количество каналов 21.			

Подп. и дата

Подп. и дата 🛛 Взам. инв. № Инв. № дубл.

Инв. № подл.

	Формат данных	База данных, текстовые файлы, MS Excel, растровый
	I ···	график
	Оптические разъемы	E-2000 / APC
	Рабочая температура	от 0 до 40°С
	Размеры (Ш х Г х В)	449 x 500 x 266 мм (стойка 19")
	Bec	21 кг
	Питание	100-240 В; 50-60 Гц; макс. 200 Вт
	Режимы измерения	Ручное или полностью автоматическое измерения
	Vanhummanna	Автоматическая конфигурация измерений
	конфигурация	(автоматическая настройка к различным условиям)
		Анализ измерений, сравнение сгруппированных
	Анализ данных	результатов сканирования с выбранной линией отсчета
		измерение тенденций, графическое изменение масштаб
	Улаленный лоступ	Удаленное управление, конфигурирование и
	2 duitembin door ju	обслуживание по протоколу TCP/IP
I	Система контроля	Продолжительная работа 24/7 обеспечивается системо
IHOCTI	(Watch dog)	автоматического восстановления и постоянной
обен	Сигноли и	Автоматическое включение аварийного сигнала,
Õ		настраиваемые типы аварийных сигналов (температур
	предупреждения	деформация)
		Непрерывный контроль системы, включая системный
	Система мониторинга	статус, качество измерений, детектирование поломки
		оптоволокна и ее местоположение
		Продукция Omnisens DITEST генерирует невидимое
	Базопасности назова	инфракрасное излучение в диапазоне длин волн 1550
	везопасность лазера	нм. классифицированное EN 60825-1 (2001-03) как
		лазерный продукт Класса 1М.

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

2.3.4 Требования к оптическим коммутаторам DITEST-SO-N

лодл.	2.3.4 Треоования к оптическим коммутаторам DITEST-SO-N											
۶ No								Лист				
ΗĞ.							ЛАБД.401223.005 ТУ/П					
Z		Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

2.3.4.1 Оптический переключатель DITEST-SO предназначен для расширения возможности канала оптическо-волоконных систем мониторинга распределений механических деформаций и температуры.

2.3.4.2 Модуль оптического переключателя должен подключаться напрямую к Графическому Пользовательскому Интерфейсу (GUI) и обеспечивать эффективное управление каналами и автоматический контроль циклом мониторинга.

2.3.4.3 Количество подключаемых каналов к одному оптическому переключателю – 20.

2.3.4.4 Оптический переключатель DITEST-SO должен отвечать требованиям таблицы 2.3.4.4

Таблица 2.3.4.4 – Основные технические характеристики оптического переключателя

Совместимость	Устройства серии DITEST		
Количество каналов подключения N	От 4 до 20		
Конфигурация датчика	Два оптоволокна (петля) или одномодовое оптическое волокно		
Оптические соединения	E2000/APC		
Время переключения	<1 сек. (включая время настройки параметров)		
Количество циклов переключения	> 1,000,000 циклов		
Вносимые потери	< 1.5 dB		
Взаимодействие с устройствами серии DITEST	через протокол RS232		
Дистанция между DITEST STA-R и модулем оптического переключателя DITEST SO-N	Мах. 10 м		
Рабочая температура	0° С до 40 °С		
Температура хранения	-10 °С до 50 °С		
Высота	< 3000 м		
Класс защиты	IP20 (использование в помещении)		
	Уровень загрязнения 2		
	_ 1		

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. N<u>e</u>

Подп. и дата

Инв. № подл.

Изм

Лист

№ докум.

Подп.

Дата

Питание	100-240 В; 50-60 Гц
Энергопотребление	< 5 Ватт
Класс перенапряжения	Ш
Габариты (Ш-Г-В)	449 х 305 х 132.5 мм (19" стойка высотой3U)
Bec	1кг

2.3.5 Требования к серверу системы

2.3.5.1 Сервер системы мониторинга, на котором работает специализированное ПО, должен подключаться к анализаторам ВРМБ через сеть Ethernet.

2.3.5.2 Передача данных. Аппаратные средства системы: анализатор, свитч, сервер. Анализатор и свитч должны подключаться друг к другу при помощи специализированного интерфейса RS-232 (разъем D-SUB9).

2.3.5.3 Если анализатор и сервер размещаются рядом, то они должны подключаться друг к дугу при помощи интерфейса Ethernet (компьютерный разъем 8P8C, более известный как «RJ-45») и образуют локальную вычислительную сеть. Если сервер и анализатор удалены друг от друга, данные с анализатора должны передаваться посредством протокола MODBUS TCP/IP.

2.3.5.4 Время опроса анализатором одного сегмента сенсора может варьироваться в пределах от 1 до 30 минут (зависит от ряда факторов, в первую очередь от точности: больше время накопления информации выше точность и наоборот). Предлагается использовать следующие настройки системы: время опроса анализатором одного сегмента 5-10 минут, полный цикл опроса всех сенсоров системой не более 2-х часов (в рамках проекта максимальное число сегментов, заведенных на один анализатор, 12).

2.3.5.5 Объем файла данных, содержащего информацию измерения одного сегмента, составляет 0,2 - 0,5 Мб (зависит от настроек измерений,

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

1нв. № подл.

но в первую очередь от длины сегмента). Т.е. требование для системы передачи данных, связанное со сбором данных от анализаторов, следующее:

~ 15 кбит/с («худший» вариант: 5 минут время накопления, 0,5 Мб объем файла) со стороны каждого из анализаторов;

~ 150 кбит/с со стороны центрального сервера (поскольку по схемам максимальное число анализаторов, которое может быть задействовано Кроме того, для возможности удаленного доступа оператором с сервера на любой из анализаторов требуется канал 128 – 512 кбит/с (чем выше, тем более комфортным будет управление; ситуация аналогична доступу с одного персонального компьютера на другой).

2.3.5.6 Подключение сенсоров производится в соответствии с руководством пользователя волоконно-оптического анализатора распределения температуры и механических напряжений «DITEST» и согласно схеме рисунок 2.3.5.6.

2.3.5.7 ПО, расположенное на сервере, позволяет:

- хранить в единой базе результаты измерений от всех анализаторов;

- производить пост обработку и анализ полученных данных (интерпретируются полученные данные в реальные события, позволяя идентифицировать и классифицировать эти события);

- производить визуализацию событий в виде таблиц и графиков.

2.3.5.8 Получаемая на выходе системы ключевая информация о состоянии ЖДП и ПАД и грунта под ними может тут же анализироваться оператором, либо автоматически передаваться на более высокий уровень иерархии (принятия решения).

Изм Пист	Ν∘ док∨м	Подп	Лата

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.



Рисунок 2.3.5.6 – Схема подключения сенсоров

2.3.5.9 Сервер AIM должен быть подключен к одному (или более) анализатору DITEST по сети TCP/IP. Пока по сети установлена связь TCP/IP, для работы системы не имеет никакого значения, LAN это или VPN.

2.3.5.10 После активации сервер AIM опрашивает каждый находящийся в сети анализатор DITEST с целью синхронизации (определяет, что цикл предыдущего измерения завершен) и для старта новых измерений. При опросе AIM сервер работает как TCP/IP клиент, а

 энализиновнору

 TCP/IP, для

 VPN.

 2.3.5.1

 находящийс

 (определяет

 новых изме

 ч

 изм Лист
 № докум.

Подп.

Дата

Тодп. и дата

Инв. № дубл.

ş



каждый анализатор как TCP/ IP сервер. Объем пакета одного цикла запрос/ответ составляет не более 100 байт.

Примечание. В анализаторе DITEST номер порта по умолчанию – 8001, но он может быть и переконфигурирован; также может быть настроена скорость опроса. Конечный пользователь может настроить их в соответствии с ожидаемой продолжительностью измерений анализаторов.

Описание и требования к автоматизированному рабочему месту (АРМ)

2.4.1 АРМ должно позволять:

Подп. и дата

Инв. Nº дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

1нв. № подл.

Лист

№ докум.

Изм

Подп.

Дата

- управлять заданным автоматическим режимом опроса сенсоров (очередность опроса, продолжительность усреднения результатов, длительность зондирующих импульсов и т.д.);

- сохранять полученные результаты в базе данных. В последующем эти данные должны открываться коммерческими программами типа MS Excel и MS Access;

- обрабатывать и анализировать полученные результаты измерений (идентифицировать и классифицировать их в реальные события);

- позволять разбивать контролируемый объект на подучастки, на каждом таком подучастке выставлять пороговые значения 2-х уровней («желтый» и «красный») для контролируемых параметров;

- осуществлять визуализацию полученных значений (график изменения контролируемого параметра с течением времени);

- генерировать предупреждающие оповещения о достижении пороговых значений (информация о превышении порога должна проверяется системой несколько раз и только при постоянном подтверждении генерироваться и передаваться сигнал тревоги);

- программное обеспечение должно иметь функцию watchdog («сторожевая собака»). Данная функция позволяет не держать рядом с сервером и анализатором постоянного оператора для контроля

нормального функционирования работы сервера (при всей своей надежности любые сервера подвержены сбоям в той или иной степени). Если ПО сервера зависает, система делает попытку мягко (программно) перегрузить систему. Если это не удается, то перегрузка идет жесткая посредством кратковременного отключения питания (функция Reset);

за счет специальных алгоритмов базовое ПО должно делает всю
 систему - анализатор DITEST и распределенный сенсор –
 нечувствительной к влиянию и изменениям окружающей среды;

- программа должна позволять работу одновременно несколько пользователей, имеющих прямой или удаленный (с помощью модема или порта LAN) доступ к ней. Если необходимо изменить режим опроса сенсоров на каком-то из анализаторов, то необходимо иметь доступ (ключ), при этом автоматический режим опроса прервется и анализатор будет перезапущен.

2.4.2 Для надежного хранения истории измерений контролируемого объекта, сервер использует несколько жестких дисков, организованных в RAID-массив с дублированием информации (зеркалирование). Тем не менее, рекомендуется с согласованной периодичностью (раз в квартал, раз в пол года), дополнительно сохранять базу данных на DVD-R/RW носителях.

2.4.3 Сервер AIM осуществляет работу MODBUS TCP сервера в режиме «подчиненный» (slave) и вся информация относительно структур, находящихся под мониторингом, также как информация о состоянии анализаторов DITEST может быть прочитана системами SCADA, у которых встроены клиент MODBUS TCP в режиме «главный» (master).

Форматы данных и структуры данных в MODBUS обладают гибкой настройкой.

Стандартный AIM MODBUS сервер не предоставляет доступ с правом записи клиенту SCADA, но это может быть осуществлено по

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

требованию, где необходимо (например, сброс тревог или изменение конфигурации параметров и т.д.).

После того, как система SCADA получит информацию AIM сервера, владелец системы SCADA становится ответственным за представление и анализ этих данных.

AIM может экспортировать данные измерения, мониторинга и конфигурации в форматы .XML и .CSV. Кроме того, диаграммы (графики) могут быть преобразованы в формат .JPG.

Сохраняемые данные поддерживаются программами Excel, Mathlab, OpenOffice.

AIM является надстройкой верхнего уровня над объектнореляционной системой управления базами данных Oracle RDBMS и стандарты доступа к базам данных, такие как ODBC, OLEDB, PL/SQL, JDBC, являются доступными для работы с AIM.

Сервер AIM не может экспортировать данные в выходные файлы, данная особенность может быть осуществлена по согласованию.

2.4.5 AIM обеспечивает функциональные возможности для конфигурации системы (определение структуры для мониторинга, зон, критериев для сигналов тревог и предупреждений, подключение анализатора DITEST и т.д.). Кроме того, то же самое ПО обеспечивает визуализацию данных мониторинга, событий тревоги (алармов) и диаграммы измерений (графики).

Требования к материалам, покупным изделиям

2.5.1 Материалы, полуфабрикаты и покупные изделия, применяемые для изготовления частей системы, должны соответствовать требованиям технической и нормативной документации, в соответствии с которыми они изготовлены, и сопровождаться документами, подтверждающими их качество.

2.5.2 Покупные изделия, приобретаемые для производства комплекса, в том числе материалы зарубежного производства, должны иметь сертификаты

№ докум.	Подп.	Лата

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

1нв. № подл.

Лист

Изм

Лист

соответствия или другие документы, подтверждающий качество и безопасность.

2.5.3 Перед использованием в производстве составных частей системы материалы, полуфабрикаты и покупные изделия должны быть подвергнуты входному контролю на предприятии-изготовителе в объеме и последовательности, установленными технологической документацией.

2.6 Основные требования к волоконно-оптической системы сигнализации состояния объектов инфраструктуры.

2.6.1 Погрешность по определению вертикальной просадки (0,5...5)см, предельные отк0лонения 0,5см.

2.6.2 Погрешность по расстоянию до области вертикальной просадки до ±2м.

3 Комплектность

В комплект поставки должны входить:

- волоконно-оптическая система сигнализации состояния объектов инфраструктуры;

 документы на вспомогательный элементы в соответствии с таблицей 2.2.2.4;

- технические условия ЛАБД.401223.005ТУ/П на систему.

Примечание: Количество экземпляров и тип эксплуатационной документации может быть изменен по согласованию с заказчиком.

4 Маркировка

4.1 Маркировка должна соответствовать требованиям ГОСТ 26828 и конструкторской документации.

Маркировка должна наноситься на бирки и содержать следующую информацию:

Лист

- наименование предприятия-изготовителя;

				ЛАБД.401223.005 ТУ/П
Изм Лист	№ докум.	Подп.	Дата	na

4нв. № подл. Подп. и дата Взам. инв. № Инв. № дубл.

Подп. и дата

сен	- назван сора в пост	ие сист гавке, н	темы, апри	, обозначение настоящего ТУ, условное назначение мер:	;
	ЛАБД	.401223	3.005	, XX-XX-XX-XX»	
вп	уставке.			условное обозначение сенсор	a
DIN	Je lubke.			ΤΓ - τεмπερατικά εριμιτά:	
				ПГ — леформация грунта;	
				Ді деформация группа, VC – возможность	
исп	олговани	а темпе	natv		
nen	0,115,015,016,114		pary	КС – леформация грунта	
всп	епстрие ка	notorli	у илт	и суффогноциция проявлений.	
BCJI	сдетвие ка	ретовы		0 – отсутствие сенсора	
	- серийн	ный ном	ven.	o oregretishe cencopa	
	- Hannax	кение п	иср, итан	Nd.	
	- Macca.		iri i aii	ил,	
	- Mecqu	и гол и	ντοτο	ирпения.	
	- налпи	и год и	лапо 1010		
			10110 11910		
KOU			мент	ании	
KUII		помбир	OPQUI	иции. ие полжно прородиться пломбами отдела	
тех		KOUTDO	па	ие должно проводиться пломоами отдела	
IUA	413 M	ankuno	лл. ркя т	тансполтной тары – по ГОСТ 14192 с нанесением	
Mar		аркиро	2U9	ков в соответствии с конструкторской	
лок	ипуляцион	ппыл	эпа	ков в соответствии с конструкторской	
док	Маркир	m. Opra Th	auon		Б
Poo	таркир	obra ip	unun	ортной тары должна содержать падниев «еделано	ט
100	Unn//.				
\square				ЛАБЛ.401223.005 ТУ/П	Лисп
л Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

4.1.5 Допускается по решению изготовителя указывать в маркировке дополнительную информацию (например, штрих-код, сведения о сертификации и др.).

5 Упаковка

5.1 Систему упаковывают в транспортную тару в соответствии с требованиями конструкторской документации. Упаковка должна обеспечивать сохранность при соблюдении условий транспортирования и хранения.

5.2 Упаковке подлежат части системы, проверенные представителем отдела технического контроля и опломбированные пломбами отдела технического контроля.

5.3 Упаковка частей системы должна проводиться в закрытых вентилируемых помещениях с температурой окружающего воздуха от плюс 15 до плюс 40 °C, относительной влажностью воздуха до 80 % при температуре плюс 25 °C и содержанием в воздухе коррозионных агентов, не превышающем установленное для атмосферы типа I по ГОСТ 15150.

5.4 Составные части должны быть упакованы в соответствии с требованиям ГОСТ 23170 (для упаковки категории КУ-4) и установлены в ящики ГОСТ 5959.

5.5 По согласованию с заказчиком допускается использование упаковочных материалов других видов.

5.6 Документация, отправляемая с изделиями, должна быть упакована в полиэтиленовый пакет и уложена в транспортную тару, на которую наносится надпись: «Техдокументация здесь».

14044	Duom	No dovour	Dodr	Domo
V131VI	JIUCIIII	I /V≌ UUKVM. I	110011.	цаШа

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. Nº подл.

6 Требования по безопасности

<u>Линейная часть:</u>

6.1 Общие требования к безопасности системы – по ГОСТ 12.1.031, ГОСТ Р 50723.

Аппаратная часть:

6.2 В системе должно быть предусмотрено защитное заземление в соответствии с ГОСТ 12.1.030 и ГОСТ 12.2.007.0.

6.3 Требования безопасности к конструкции системы и его составным частям по ГОСТ 12.2.007.0.

6.4 По способу защиты человека от поражения электрическим током должны соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.007.0 для изделий класса I.

6.5 В части электробезопасности система должна соответствовать ГОСТ 12.1.019.

6.6 Электромагнитная совместимость системы должна соответствовать ГОСТ Р 51318.14.1.

Прочее:

6.7 Ремонту, наладке и испытанию системы допускаются лица, имеющие соответствующую квалификацию и прошедшие инструктаж по технике безопасности.

6.8 К работе с системой допускаются лица, достигшие 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний, прошедшие курс специального обучения в соответствии с ГОСТ 12.0.004, обучение в установленном порядке работе и аттестацию на группу по охране труда при работе на электроустановках с соответствующим напряжением.

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

1нв. Nº подл.

Лист

7 Требования к энергоснабжению, эргономике стойкости к внешним воздействиям и электромагнитной совместимости

7.1 Электропитание шкафов, серверов, АРМ системы должно осуществляться от сети переменного тока напряжением (220±22) В и частотой (50±0,4) Гц, соответствующей требованиям ГОСТ 13109.

7.2 Используемые шкафы, серверы, АРМ должны быть обеспечены бесперебойным энергоснабжением в течение времени не менее 3 часов автономной работы.

7.3 Оборудование должно сохранять работоспособность и внешний вид после воздействия на него испытательных механических воздействий, и факторов, возникающих при транспортировании в упакованном виде автомобильным транспортом в средних (С) условиях транспортирования по ГОСТ 23170.

7.4 Оборудование должно быть устойчиво к воздействию внешних магнитных полей (постоянных или переменных) с напряженностью до 400 А/м согласно ГОСТ Р 50648.

7.5 Оборудование должно быть устойчиво к воздействию:

Подп. и дата

Инв. Nº дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

1нв. Nº подл.

Лист

Изм

№ докум.

Подп.

Дата

- радиочастотных электромагнитных полей, соответствующих степени жесткости испытаний по ГОСТ Р 51317.4.3 (МЭК 61000-4-2-95);

- наносекундных импульсных помех в сети электропитания, соответствующих степени жесткости испытаний 3 по ГОСТ Р 51317.4.4 (МЭК 61000-4-4-95);

- микросекундных импульсных помех в сети электропитания, соответствующих степени жесткости испытаний 2 по ГОСТ Р 51317.4.5 (МЭК 61000-4-5-95);

- воздушных и контактных электростатических разрядов, соответствующих степени жесткости испытаний 2 по ГОСТ Р 51317.4.2 (МЭК 61000-4-2-95);

ЛАБД.401223.005 ТУ/П

к кондуктивным помехам, наведенными радиочастотными
 электромагнитными полями, соответствующим степени жесткости
 испытаний 2 по ГОСТ Р 51317.4.6
 (МЭК 61000-4-6-95).

7.6 Оборудование устойчиво к динамическим изменениям электропитания, соответствующим степени жесткости испытаний 2 по ГОСТ Р 51317.4.11 (МЭК 61000-4-11-94).

7.7 Оборудование должно быть устойчиво к сейсмическим воздействиям до 9 баллов по шкале MSK-64.

7.8 Требования к эргономике и технической эстетике:

- компоновка шкафов логических модулей должна обеспечивать свободный доступ к элементам шкафа для осуществления наладки, замены и ремонта.

- Качество покрытий шкафов логических модулей по показателям внешнего вида соответствует классу IV по ГОСТ 9.032.

8 Правила приемки

Для контроля качества и приемки системы установлены следующие виды испытаний:

- приемо-сдаточные;

- приемочные;

- периодические;

- типовые;

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

1нв. № подл.

- сертификационные.

8.1 Приемо-сдаточные испытания

8.1.1 Приемо-сдаточные испытания проводят с целью проверки соответствия системы требованиям ТУ и комплекта конструкторской документации.

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

8.1.2 Испытания проводятся службой технического контроля предприятия - изготовителя по программе и методике предприятия изготовителя.

8.1.3 При неудовлетворительных результатах испытаний, система подлежит возврату для выявления причин брака и устранения дефектов, после чего может быть вновь предъявлен к приемке.

8.1.4 В случае повторного отказа, приемка системы останавливается до полного устранения причин отказа и последующего разрешения дальнейшей приемки.

8.2 Типовые испытания

8.2.1 Типовые испытания проводятся при изменении конструкции, схемы или технологии изготовлении, материалов, если эти изменения могут оказать влияние на характеристики комплекса.

8.2.2 Решение о необходимости проведения типовых испытаний принимает должностное лицо, утверждающее изменение в конструкторской или технологической документации.

8.2.3 При отрицательных результатах типовых испытаний предлагаемые изменения не вносятся.

8.3 Сертификационные испытания

8.3.1 Объем, и содержание сертификационных испытаний определяется согласно требованиям, установленным нормативными документами и сертифицирующим органом.

9 Методы контроля

Подп.

Дата

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. N<u>e</u>

Подп. и дата

1нв. № подл.

Лист

Изм

№ докум.

9.1 Все испытания проводят при нормальных климатических условиях согласно <u>ГОСТ 15150</u>.

9.2 Внешний вид и конструктивное исполнение, маркировка, упаковку проверяют внешним осмотром на предмет выявления видимых дефектов сборки, механических повреждений.

Лист

9.3 Соответствие материалов и комплектующих изделий требованиям документов на них удостоверяют сертификатами предприятий - поставщиков материалов и изделий.

9.4 Проведение испытаний основных характеристик системы проводят по программе, утвержденной предприятием изготовителем.

9.5 Стойкость к механическим и климатическим воздействиям проверяют по ГОСТ 16962.1, ГОСТ 16962.2.

9.6 Проверку лакокрасочных покрытий проводят по ГОСТ 9.032.

9.7 Проверка металлических покрытий проводят по ГОСТ 9.302.

9.8 Испытания на надежность проводят по ГОСТ 27.301.

9.9 Параметры лазерного излучения контролируют по ГОСТ 12.1.031.

9.10 Электробезопасность проверяют по ГОСТ 1516.2, ГОСТ 14254.

9.11 Испытания на электромагнитную совместимость проводят по ГОСТ Р 51318.14.1.

9.12 Шумовые характеристики проверяют по ГОСТ 12.1.035.

10 Транспортирование и хранение

10.1 Части системы допускается транспортировать всеми видами транспорта в крытых транспортных средствах (самолетами - в герметизированных отапливаемых отсеках) в соответствии с правилами перевозки грузов, действующими на данном виде транспорта.

10.2 Размещение и крепление в транспортных средствах частей системы в транспортной таре должно обеспечивать устойчивое положение тары и не допускать ее перемещения во время транспортирования.

10.3 При транспортировании должна быть обеспечена защита транспортной тары и барабанов с упакованными частями системы от непосредственного воздействия атмосферных осадков, прямых солнечных

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

1нв. № подл.

лучей; не допускается наличие в воздухе паров кислот, щелочей и прочих агрессивных примесей.

10.4 Части системы в транспортной таре должны выдерживать условия транспортирования, соответствующие условиям хранения 5, а при морских перевозках в трюмах – условиям хранения 3 по ГОСТ 15150, но при нижнем значении температуры минус 40 °C.

10.5 Части системы в транспортной таре должен выдерживать многократные удары, действующие вдоль трех взаимно перпендикулярных осей тары, со значением пикового ускорения 98 м/с2, длительностью ударного импульса 16 мс. Число ударов - (1500 ± 10) для каждого направления.

10.6 Части системы должны храниться в упаковке в отапливаемых складских помещениях. Условия хранения - I по ГОСТ 15150. Срок хранения без переконсервации – 3 года.

10.7 Разрешено штабелировать все части системы, кроме катушек с сенсорами и комбинированными соединительными кабелями. Высота штабелированния должна соответствовать требованиям маркировки на упаковке.

11 Указания по эксплуатации

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

1нв. Nº подл.

Лист

Лзм

№ докум.

Подп.

Дата

11.1 При техническом обслуживании системы необходимо выполнять требования ГОСТ Р 50723, СанПиН 5804.

Техническое обслуживание (ТО) системы в процессе эксплуатации можно разделить на ТО программно-аппаратно части и ТО линейной части.

11.2 В эксплуатацию должны приниматься части системы, прошедшие входной контроль. Распаковка должна проводиться непосредственно перед началом входного контроля и монтажа на объекте.

11.3 Монтаж системы, установка его на место эксплуатации, эксплуатация и проверка технического состояния системы при

ЛАБД.401223.005 ТУ/П

Лист

эксплуатации должны проводиться в соответствии с инструкциями, действующими на объектах, использующих систему, и руководством по эксплуатации системы.

12 Гарантии изготовителя

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

12.1 Предприятие-изготовитель гарантирует соответствие частей системы требованиям настоящих технических условий в течение 24 месяцев с даты изготовления, в том числе 12 месяцев в условиях эксплуатации, при соблюдении потребителем условий транспортирования, хранения и эксплуатации.

12.2 Гарантийный срок исчисляется с момента получения изделия потребителем.

12.3 При возникшем в течение гарантийного срока по вине предприятия-изготовителя несоответствии системы требованиям настоящих технических условий, предприятие-изготовитель обязуется безвозмездно произвести ремонт, а при невозможности его проведения - заменить не исправную часть системы.

тодл.							
٩							Лист
Ηġ.						ЛАБД.401223.005 ТУ/П	
Z	Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

АКТ № 1 освидстельствования скрытых работ

г. Москва	«24» августа 2014 г.
Волокопно-оптическая си	стема диагностики состояния земляного полотна (ВОС ДСЗП)
	(объект)
Прокладка нижнего слоя	волоконно-оптических сенсоров деформации и температуры
	(наименование работ)
выполненных на Экспер	иментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ» ст. Щербинка
	(место проведения работ)
Комиссия в составе представи	гелей:
ОАО "ВНИИЖТ" <u>Начальни</u>	са Испытательного центра ОАО «ВНИИЖТ» Савина А.В
Монтажной организации Гла	(должность, ФПО)
Монтажной организации 1ла	вного инженера SAO «лазер Солюшенс» Кузеванова С.М.,
менеджера по развитию оиз	неса ЗАО «Лазер Солюшенс» Бурова Б.н.
IDOUSDAILS ACHOTE BADAT BUILDI	
произвела осмотр работ выпол	ненных ЗАО «Лазер Солюшенс»
и составила настоящий акт о и	(наименование монтажной организации) вжеспетралием:
1 К освидетель створацию и пр	имесяедующем.
послатка волоковно от	мемке предыявлены следующие работы.
-прокладка волоконно-ог	пического сенсора деформации ФОСД-1-1,8-1,5 (нижний слои
в земляном полотне на 500 м	м ниже слоя полифилизации и монтажом якореи ИКІ -3 с
шагом 2 м) - 1040 м;	
-прокладка сенсора темп	ературы ДКП-20-7-4/24 (нижний слой в земляном полотне на
300 мм ниже слоя полифилиз	ации) - 1190 м
	(наименование скрытых работ)
2. Работы выполнены по Про	екту производства работ ЗАО «Лазер Солюшенс»
3. При выполнении работ прим	енены волоконно-оптический сенсор деформации
ФОСД-Г-1,8-1,5 - 1046 м; яко	рь ЯКГ-3 - 530 шт., волоконно-оптический сенсор
температуры ДКП-20-7-4/24 -	- 1190 м
	(наименование материалов, конструкций

2/22 2	изделий с указанием марки, типа, категории качества и т. п.)	
4. Дата начала работ _	23.08.2014	
5. Дата окончания рабо	23.08.2014	

РЕШЕНИЕ КОМИССИИ

Работы выполнены в соответствии с проектом производства работ, стандартами, строительными нормами и отвечают требованиям их приемки.

На основании изложенного разрешается производство последующих работ по монтажу термометок

ПРЕДСТАВИТЕЛИ:	ОАО "ВНИИЖТ"	1-	/А.В. Савин /
		(noonucs)	(расшифровка подписи)
	Монтажной организации	the for	/ С.М. Кузеванов /
	<	(побпись)	(расшифровка подписи)
	-	SH	/_В.Н. Буров /
		(noonucs)	(расшифровка подписи)

АКТ № 2 освидетельствования скрытых работ

Волоконно-оптическая система	диагностики состояния земляного полотна (ВОС ДСЗП
	(объект)
Монтаж термометок на сено	соре деформации и сенсоре температуры нижнего слоя
	(наименование работ)
выполненных на Эксперимента	альном кольце ОАО «ВНИИЖТ» ст. Щербинка
(me	сто проведения работ)
Комиссия в составе представителей:	
ОАО "ВНИИЖТ" Начальника Исп	ытательного центра ОАО «ВНИИЖТ» Савина А.В
(0	должность, ФИО)
Монтажной организации Главного в	инженера ЗАО «Лазер Солюшенс» Кузеванова С.М.,
менеджера по развитию бизнеса ЗА	АО «Лазер Солюшенс» Бурова В.Н.
	(должность, ФИО
произвела осмотр работ выполненных	< ЗАО «Лазер Солюшенс»
	(наименование монтажной организации)
и составила настоящий акт о нижесле,	дующем:
1. К освидетельствованию и приемке п	предъявлены следующие работы: Монтаж термометок на
сенсоре деформации и сенсоре темп	ературы нижнего слоя - 12 шт.
(наименов	зание скрытых работ)
2. Работы выполнены по Проекту пр	роизводства работ ЗАО «Лазер Солюшенс»
3. При выполнении работ применены	термометки – 12 шт.

	изоелии с указанием марки, типа, категории качества и т. п.)
4. Дата начала работ _	24.08.2014
5. Дата окончания рабо	DT 24.08.2014

РЕШЕНИЕ КОМИССИИ

Работы выполнены в соответствии с проектом производства работ, стандартами, строительными нормами и отвечают требованиям их приемки.

На основании изложенного разрешается производство последующих работ по засыпке траншей с сенсорами, трамбованию грунта

Sector 1	//	
ОАО "ВНИИЖТ"	0	/А.В. Савин /
	(подпись)	(расшифровка подписи)
монтажной организации	tet	/ С.М. Кузеванов /
2	(подпись)	(расшифровка подписи)
	SHA	/_В.Н. Буров /
<	(потись)	(расшифровка подписи
	ОАО "ВНИИЖТ" Монтажной организации	ОАО "ВНИИЖТ" (подпись) Монтажной организации (подпись) (подпись)

AKT № 3

освидетельствования скрытых работ

г. Москва	«10» сентября 2014 г.
Волоконно-онтичест	ая система лиагностики состояния земляного полотия (ВОС ЛСЗП)
прокладка верхнего	слоя волоконно-онтических сенсоров деформации и температуры
	(наименование работ)
выполненных на	спериментальном кольце ОАО «ВНИИЖ І» ст. Щербинка
K	(место проведения работ)
комиссия в составе пред-	гавителеи:
ОАО "ВНИИЖТ" Нач	альника Испытательного центра ОАО «ВНИИЖТ» Савина А.В
	(должность, ФИО)
Монтажной организации	Главного инженера ЗАО «Лазер Солюшенс» Кузеванова С.М.,
менеджера по развити) бизнеса ЗАО «Лазер Солюшенс» Бурова В.Н.
	(должность, ФНО
произвела осмотр работ н	ыполненных _ЗАО «Лазер Солюшенс»
	(наименование монтажной организации)
и составила настоящий а	т о нижеследующем:
1. К освидетельствовании	и приемке предъявлены следующие работы:
-проклалка волоков	но-оптического сенсора леформации ФОСЛ-Г-1.8-1.5 (верхний слой
cencons lectonwanna na	то они неского сенеори деформации слоя. ШШТС с устройством
сенсора деформации на	лучине чоо мм от верхней границы слоя при с с устроиством
песчаной подушки и мо	<u>птажом якорен ЯКІ -3 с шагом 2 м) – 1085 м;</u>
-прокладка сенсора	семпературы ДКП (верхний слой сенсора температуры на глубине
400 мм от верхней гран	цы слоя ЩПГС с устройством песчаной подушки) - 987 м
	(наименование скрытых работ)
2. Работы выполнены по	Проекту производства работ ЗАО «Лазер Солюшенс»
3. При выполнении работ	применены волоконно-оптический сенсор леформации
ФОСЛ-Г-1 8-1 5-1085 м	яковь ЯКГ-3 - 530 шт. водоконно-онтинеский сенсов темнературы
TKTL-20.7.4/24 087 M	якора или - 550 шта волоконно-онтическия сенсор температуры
ARII-20-7-4/24 - 967 M	luminario anno umanuma sour
	(наименование материалов, конс
	тий суказанием марки типа категопии качестка и т. п.)
4 Лата нацала работ	00 09 2014
5. Hars avouvouvo notor	05.05.2014
 дата окончания работ _ 	09.09.2014
	РЕШЕНИЕ КОМИССИИ
Работы выполнен	ы в соответствии с проектом производства работ, стандартами,
строительными нормами	сотвечают требованиям их приемки.
1	
U	E
па основании изложен	юго разрешается производство последующих работ по монтажу
термометок и оптически	х муфт
	(наименование работ и конструкций)
ПРЕДСТАВИТЕЛИ:	ОАО "ВНИИЖТ" /А.В. Савин /
201	(подпись) (расшифповка подписи)
	Монтежной
	ONCOMPANIE WAS IC M Knowners
	(C.M. Ky3cBaHoB /
	(поопись) (расшифровка поописи)
	RUHT

(подтись)

(расшифровка подписи

СИСТЕМА ДОБРОВОЛЬНОЙ СЕРТИФИКАЦИИ

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА И ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Зарегистрирована в Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии

Регистрационный № РОСС RU.3787.04ЖТС0

№ 00089



ОРГАН ПО СЕРТИФИКАЦИИ АО «НОВЫЙ РЕГИСТР» № СДС ЖТ и ТС RU 004.0С 105318, г. Москва, ул. Ибрагимова, 31

СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ

№ СДС ЖТ в ТС RU. П 00088

Действителен с «06» августа 2015 г.

по «05» августа 2018 г.

НАСТОЯЩИЙ СЕРТИФИКАТ УДОСТОВЕРЯЕТ, ЧТО ДОЛЖНЫМ ОБРАЗОМ ИДЕНТИФИЦИРОВАННАЯ ПРОДУКЦИЯ Волоконно-оптическая система сигнализации состояния объектов инфраструктуры, изготавливаемая по ЛАБД.401223.005ТУ/П

Код ОКП 63 4200

СООТВЕТСТВУЕТ ТРЕБОВАНИЯМ технических условий ЛАБД.401223.005ТУ/П (п.п. 2.6.1, 2.6.2)

ИЗГОТОВИТЕЛЬ ЗАО «Фосенс» Россия, 117335, г. Москва, Нахимовский просп., д. 56

СЕРТИФИКАТ ВЫДАН ЗАО «Лазер Солюшенс» Россия, 117335, г. Москва, Нахимовский просп., д. 56, пом. XXIV



1. Сертификат соответствия выдан на основании:

результатов сертификационных испытаний, проведенных в испытательном центре ИЦ ЖТ ОАО «ВНИИЖТ» (аттестат аккредитации № ССФЖТ RU.01ЖТ.12ОО.00232 срок действия до 23.06.2016г., свидетельство СДС ЖТиТС. RU 001 A, срок действия до 30.06.2016г.), протокол сертификационных испытаний №2125 от 17.07.2015;

результатов анализа состояния производства, проведенного ОС ЖП АО «Новый регистр», акт рег. № НР СП/012 от 10.07.2015;

комплексной оценки соответствия, проведенной ОС ЖП АО «Новый регистр», комплексное заключение о соответствии от 27.07.2015.

 Изготовитель обязан обеспечить соответствие реализуемой продукции испытанным образцам и требованиям нормативных документов, на соответствие которым она была сертифицирована.

 Продукция маркируется знаком соответствия Системы добровольной сертификации железнодорожного транспорта и транспортного строительства.

Знак соответствия наносить на товаросопроводительную документацию.

4. Первый инспекционный контроль провести путем испытаний продукции, отобранной у изготовителя перед отправкой потребителю и анализа состояния производства через 8 месяцев от даты выдачи сертификата соответствия. Дальнейшая периодичность инспекционного контроля устанавливается по результатам предыдущих проверок в рамках инспекционного контроля, но не реже одного раза в 12 месяцев.

 В случае невыполнения условий, лежащих в основе выдачи сертификата соответствия, он аннулируется органом по сертификации.

6. Для сохранения (продления) действия сертификата соответствия, заявитель заблаговременно (не позднее 6-ти месяцев до окончания срока его действия) подает заявку в орган по сертификации на проведение сертификации.

Руководитель органа по сертифантиции разво от	Ю.В. Рязанов
Эксперт по сертификации	- А.Б. Бабашкин
Зарегистрирован в Ресстре Системы добровольной сертификации	06 августа 2015 г.

Приложение 3

Перемещения и температуры слоев земляного полотна под безбалластными конструкциями пути, зафиксированные оптоволоконной системой диагностики на Экспериментальном кольце ст. Щербинка



Рисунок 3.1 Осадка. Верхний слой, наружный рельс



Рисунок 3.2 Температура. Верхний слой, наружный рельс



Рисунок З.3 Осадка. Верхний слой, внутренний рельс



Рисунок 3.4 Температура. Верхний слой, внутренний рельс



Рисунок 3.5 Осадка. Нижний слой, наружный рельс


Рисунок 3.6 Температура. Нижний слой, наружный рельс



Рисунок 3.7 Осадка. Нижний слой, внутренний рельс



Рисунок 3.8 Температура. Нижний слой, внутренний рельс

Приложение И

Патенты на изобретения



№ 2174082

Российским агентством по патентам и товарным знакам на основании Патентного закона Российской Федерации, введенного в действие 14 октября 1992 года, выдан настоящий патент на изобретение

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ РЕЛЬСОВОЙ ПЛЕТИ железнодорожного пути

Патентообладатель(ли):

Виногоров Николай Павловий

по заявке № 2000127662, дата поступления: 08.11.2000 Приоритет от 08.11.2000

Автор(ы) изобретения:

Виногоров Николай Павловий, Савии Александр Владимировий

Патент действует на всей территории Российской Федерации в течение 20 лет с 8 ноября 2000 г. при условии своевременной уплаты пошлины за поддержание патента в силе

Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации

г. Москва, 27 сентября 2001 г.

POCCHINCKAN DEMEPAUMIN



POCCHINCKAN DELLEPAULIN



路路班班路路

密

密

密密密路路路路路

斑

Г.П. Ивлиев

HATENT!

班班班班班基

發發發發發

斑

斑

斑斑

斑斑

發發

發發

斑

密

윩

路路路

密

密

斑

路路

斑

路路

路路

на изобретение № 2613126

УСТРОЙСТВО ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ БЕЗБАЛЛАСТНОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Патентообладатель: Акционерное общество "Научноисследовательский институт железнодорожного транспорта" (АО "ВНИИЖТ") (RU)

Авторы: Савин Александр Владимирович (RU), Солодянкин Максим Алексеевич (RU), Ермилов Алексей Леонидович (RU), Чугунов Денис Анатольевич (RU)

Заявка № 2015145218

Приоритет изобретения 21 октября 2015 г. Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 15 марта 2017 г. Срок действия исключительного права на изобретение истекает 21 октября 2035 г.

> Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

elles

Приложение К

Сравнительный анализ нормативной базы по рельсовым скреплениям

		-					
Категория	Назначение	Макс. осевая нагрузка, кН / тс	Макс. скорость, км/ч	Тип рельса	Мин. радиус кривой, м	Расстояние между опорными точками, мм эпюра шпал, шт./км	Тип основания
А	Легкий городской и некоторые промышленные пути	100* / 10,2	100	40E1	80	800/ 1250	жб. шпалы, дер. шпалы, стал.шпалы, безбалласт, брусья стрелочных переводов
В	Легкий городской и некоторые промышленные пути	160* / 16,3	140	54E1	100	600/ 1667	жб. шпалы, дер. шпалы, стал.шпалы, безбалласт, брусья стрелочных переводов
С	Основные железнодорожные линии	225 / 22,9	250	60E1	400	600/ 1667	жб. шпалы, дер. шпалы, стал.шпалы, безбалласт, брусья стрелочных переводов
D	Линии с большими радиусами кривых для BCM	180 / 18,4	по усмотрени ю оператора	60E1	800	600/ 1667	жб. шпалы, безбалласт, брусья стрелочных переводов
Е	Линии смешанного движения, пропускающие тяжеловесные грузовые поезда	300 / 30,6	200	60E1	150	600/ 1667	жб. шпалы, дер. шпалы, стал.шпалы, брусья стрелочных переводов

Таблица К.1 - Классий	рикация рельсовых	скреплений по	категориям

* – Максимальная осевая нагрузка категорий А и В не относится к путевой технике.

Таблица К.2 - Требования стандартов и требований

ГОСТ 32698-2014			EN 13481-2:2012		
Наименование показателя безопасности	Значение	Требование	Значение		
1 Удерживающая способность узла вертика. рельсового скрепления при действии 100 кН циклических нагрузок на базе 4 млн. циклов, горизон 5-10Гц Углы приложения нагрузки 27° горизон 100 кн	пьной, г., 50 кН,	Требований нет	 Снижение показателя после воздействия циклической нагрузки на базе 3 млн. циклов, 4Гц. Углы приложения нагрузки и вертикальная сила зависит от категории скрепления А-Е 	 продольн. сопр. рельса – не более 20%; вер. статич. жесткость – не более 25%; усилие прижатия рельса – не более 20% 	
1.1 Остаточное перемещение головки рельса, мм, не бол	iee	3		Tracanaunituan	
1.2 Остаточное перемещение подошвы рельса, мм, не бо	олее	2	-	треоовании нет	
1.3 Наличие трещины, разрушения элементов рельсового скрепления и шпалы		не допускается		-//-	
2 Удерживающая способность в продольном направлен	ии пути				
2.1 Усилие монтажного прижатия рельса к шпале при $T_{A\leq}$ (подкладке), кН, не менее при $T_{A}>$	110°C 110°C	20 25	A 11	Проверяется только уменьшение	
2.2 Усилие монтажного прижатия подкладки к шпале (для при $T_A \leq$ раздельных рельсовых скреплений с резьбовыми	110°C	40	2. Усилие прижатия рельса	усилия прижатия после воздействия циклической нагрузки, не более 20%	
прикрепителями), кн. не менее при 1_A	TIO C	50			
2.5 продольная нагрузка, неооходимая для возникновения $I_A \ge 110^{\circ}$ С необратимого смещения рельса или подкладки при их монтажном прижатии, кН не менее		14,0	3. Продольное сопротивление рельса, кН	7,0 9,0 (для скоростей >250 км/ч)	
 Упругие характеристики узпа рельсового скрепления 	1,4 110 0	10,5	4 Статическая жесткость узпа скрепления	Снижение показателя см. п.1	
3.1 Вертикальная жесткость узла рельсового скреплени:	я, МН/м	от 50 до 150	5. Определение классификации скрепления по коэффициенту затухания ударной нагрузки	средний 15-30%, высокий >30%	
3.2 Поперечная жесткость (по подошве рельса), не мене	30	6. Динамическая жесткость узла скрепления	Требование определяет заказчик		
4 Электрическое сопротивление между узлами скрепления на шпале, кОм, не менее	10	7. Электрическое сопротивление, кОм, не менее	5		
-	Требований нет	 Воздействие агрессивной окружающей среды (испытания в солевой камере) 	Демонтаж скрепления без нарушения работоспособности элементов		
-	_//_	9. Сопр. вырыванию закладных элементов нагрузкой не менее 60кН в течение 3 минут.	Отсутствие трещин, элементов рельсового скрепления и шпалы		
-	_//_	10. Уменьшение интенсивности шума и вибрации	Требование определяет заказчик		
-	_//_	 Влияние допусков элементов скрепления в сборке на величину ширины колеи, мм 	±1 (расчет с учетом допусков на элементы)		
_	_//_	12. Полигонные испытания (пропущенный тоннаж не менее 20 млн. т. брутто и не менее 1 года)	Требования определяет заказчик		

Приложение Л

Электрическое сопротивление безбалластного пути

УТВЕРЖДАЮ: Заместитель Генерального директора OAO «ВНИИЖТ» А.Б. Косарев 2015 r.

Протокол замеров переходного сопротивления «рельс-земля».

Дата проведения замеров: 19октября 2015 года. Место проведения замеров: Экспериментальное кольцо ОАО «ВНИИЖТ».

Цель проведения замеров: определение переходного сопротивления «рельс-земля» контрольных участков Экспериментального кольца: участка с безбалластными конструкциями длиной 550 м (3-й км 2-го кольцевого пути) и участка с балластной щебеночной призмой длиной около 500м (5-й км 2-го кольцевого пути). Общая длина 2-го кольцевого пути составляет 5700м.

Замеры проводили сотрудники отделов «ВКА» (Бардин А.Н., Долженков Д.Ю., Лиманский Ю.А.) и «СТЭ» (Добровольские Т.П.).

Атмосферные условия во время проведения замеров: -температура окружающего воздуха: +7°С;

-атмосферное давление: 747 мм. рт. столба;

-относительная влажность воздуха: 81%;

временами шел небольшой дождь

Перед началом замеров проводился демонтаж стыков с 2-х сторон контрольных участков 2-го кольцевого пути: сначала на участке с безбалластными конструкциями железнодорожного пути, после чего проводился замер. Затем на этом участке восстановили стыки. После этого, проводился демонтаж стыков участка с балластной щебеночной призмой, после чего на этом участке проводился замер. Таким образом, каждый из этих участков пути поочередно был электрически изолирован от остальных участков 2-го кольцевого пути.

Участок с установленными безбалластными конструкциями железнодорожного пути состоит из 4-х типов;

 Безбалластный путь фирмы LVT(РЖДстрой, Россия), рельсовые скрепления Pandrol, Vossloh, Schwihap.

- 2. Безбалластный путь фирмы FFB (MaxBögl, Германия), рельсовые скрепления Vossioh W300
- 3. Безбалластный путь фирмы NBT (Alstom, Франция), рельсовые
- скрепления 2-х типов: 3 Pandrol типа SFC и 5 Vossioh типа FDF. 4. Безбалластный путь фирмы EBS (Tines, Польша). Рельсовые скрепления на промежуточных участках- АРС-4.

На участке с балластной щебеночной призмой установлены скрепления ЖБР.

Замеры сопротивлений проводились между отсоединенными участками пути и остальной частью 2-го кольцевого пути. Во время измерений, на рельсах отсоединенных участков находилась дрезина. 2-й кольцевой путь электрически соединен с 3-м кольцевым путем. Общая длина

3-го кольцевого пути составляет 5700м. Схема измерений показана на рис. 1. Переходное сопротивление «рельс-земля» контрольного участка должно быть значительно больше электрически соединенных рельсовых цепей 2-го и 3-го путей, так как их длина более чем в 20 раз превышает длину контрольного участка. Поэтому, замержемое сопротивление на стыке контрольного участка и других путей практически равно переходному сопротивлению «рельс-земля» контрольного участка.

Результаты замеров:

Характеристика участка пути	измеренное сопротивление, (Ом)	переходное сопротивление	
Участок с безбалластными конструкциями	20	(Om KM)	
Участок с обычными балластными конструкциями	18	9	

Список оборудования, использованного во время замеров.

Наименование, марка и номер испытательного оборудования и средств измерения Поибор конбор	Сведения об аттестации и поверке (номер, дата, периодичность)
ТЕSTO-622 Заводской №39502430/206	Свидетельство о поверке № СП 0677827 от 17.12.2014 до 17 12 2015
Измеритель заземления тип MC-08 Зав. № 0856747	Свидетельство о поверке № 303 от 14.09.2015 до 14.09.2016





Рис. 1. Схема измерения сопротивления «рельс-земля»

Заведующий отделом ВКА А.Н. Бардин Денеер – Д.Ю. Долженков A Заместитель заведующего отделом ВКА -Научный сотрудник отдела ВКА Научный сотрудник отдела ВКА Ведущий научный сотрудник отдела СТЭ // Т.П. Добровольские ____ю.А. Лиманский