

На правах рукописи

МЕРЕНЧЕНКО КОНСТАНТИН ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ПУТИ В ЗОНЕ СОПРЯЖЕНИЯ
ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА И ИСКУССТВЕННОГО СООРУЖЕНИЯ**

05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва–2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта»

Научный руководитель	Кандидат технических наук Замуховский Александр Владимирович
Официальные оппоненты:	Суслов Олег Александрович – доктор технических наук, технический эксперт Научного центра «Путевая инфраструктура и вопросы взаимодействия колесо-рельс» акционерного общества «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» Романов Андрей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Железнодорожный путь» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I»
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

Защита состоится «12» сентября 2019 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 218.005.15 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 7618.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РУТ (МИИТ) по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9 и на сайте <http://www.mii.ru>

Автореферат разослан «___» июля 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Королёв Вадим Вадимович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время перед железнодорожным транспортом возникли две важнейшие задачи – введение движения с осевыми нагрузками 27 т и более, а также снижение эксплуатационных расходов за счет создания малообслуживаемой конструкции пути. Одной из важнейших проблем, которые необходимо решить для выполнения поставленных задач, является повышение стабильности пути в зоне сопряжения земляного полотна и искусственного сооружения (далее – зона сопряжения). Суть проблемы заключается в том, что на подходах к искусственному сооружению (далее – ИССО) развиваются характерные неровности в виде так называемых «предмостовых ям». Одной из основных причин возникновения таких неровностей считается перепад модуля упругости пути в зоне сопряжения. Предмостовые ямы требуют достаточно частых выправок пути, что приводит к увеличению затрат на текущее содержание. Для предотвращения появления предмостовых ям устраивают специальные конструкции пути – участки переменной жесткости (далее – УПЖ), однако, как показал ряд инструментальных исследований, они нуждаются в дальнейшем совершенствовании. Поэтому актуальным является вопрос по разработке мероприятий и рекомендаций по повышению стабильности пути в зоне сопряжения.

Степень разработанности темы исследования. Принцип реализации укладываемых в настоящее время УПЖ заключается в плавном увеличении жесткости пути по мере приближения к ИССО за счет изменения конструкции верхнего строения пути (далее – ВСП) и/или рабочей зоны земляного полотна. Другим направлением является уменьшение жесткости пути на самом ИССО за счет применения в безбалластной конструкции мостового полотна (БМП) упругих прокладных слоев.

Указанные мероприятия направлены, в основном, на устранение перепада модуля упругости пути и не применяются в комплексе, т.е. затрагивают либо только ВСП на подходе к ИССО, либо рабочую зону земляного полотна, либо ВСП на ИССО. При этом нет четких критериев назначения параметров УПЖ, например, такого как длина в зависимости от скорости движения. Как показал ряд инструментальных исследований и проходы нагрузочных комплексов,

устройством УПЖ полностью исключить перепад модуля упругости пути не удастся, а на подходах к мостам возникают характерные неровности. Эти исследования проводились при нагрузках на ось до 23,5 т. Очевидно, что введение в обращение вагонов с большими осевыми нагрузками усугубит проблему сопряжения земляного полотна и ИССО.

До сих пор не в полной мере изученными остаются вопросы о том, какие из эксплуатационных параметров в большей степени влияют на величину остаточных деформаций и интенсивность их развития в зоне сопряжения, какова природа их возникновения и развития на въезде и съезде с ИССО, чем должна определяться длина УПЖ.

Цель диссертационной работы заключается в разработке и научном обосновании рекомендаций и мероприятий по повышению стабильности пути в зоне сопряжения.

Задачи исследования:

- 1) выбрать математическую модель прогноза остаточных деформаций в зоне сопряжения;
- 2) выполнить экспериментальную проверку адекватности выбранной математической модели;
- 3) определить причины возникновения и развития остаточных деформаций на въезде и съезде, определить эксплуатационные параметры, которые больше всего влияют на величину остаточных деформаций и интенсивность их накопления;
- 4) разработать рекомендации по совершенствованию конструкции УПЖ в зависимости от эксплуатационных параметров.

Объектом исследования является зона сопряжения железнодорожного пути, уложенного на земляном полотне и ИССО.

Предметом исследования являются параметры железнодорожного пути и условия его эксплуатации, при которых наиболее интенсивно развиваются остаточные деформации.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- 1) по результатам экспериментальных работ расширена сфера применения существующей математической модели прогнозирования остаточных деформаций пути;

2) определены основные причины возникновения периодических неровностей пути на подходе к ИССО и параметры, влияющие на их интенсивность;

3) разработан и обоснован критерий выбора длины УПЖ в зависимости от скорости движения;

4) определено различие возникновения и развития остаточных деформаций при въезде и съезде с ИССО.

Теоретическая и практическая значимость:

Результаты, полученные на основе экспериментальных исследований, показали возможность применения математической модели прогнозирования остаточных деформаций пути для расчетов его напряженно-деформированного состояния на участках с перепадом модуля упругости пути.

Сведения об условиях эксплуатации пути и его параметры, при которых предмостовые ямы развиваются наиболее интенсивно, а также разработанный критерий определения длины УПЖ позволяют принимать обоснованные решения при проектировании УПЖ.

Рекомендации и мероприятия по повышению стабильности пути в зоне сопряжения позволят снизить расходы на текущее содержание пути, создать малообслуживаемую конструкцию ВСП.

Методология и методы исследования. Решение поставленных задач осуществлялось с использованием общесистемного метода исследования, базирующегося на анализе выполненных научно-исследовательских работ по данной тематике в СНГ и странах дальнего зарубежья, проведения натурных экспериментов на действующем участке пути, а также математического моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1) расширение сферы применения существующей математической модели прогнозирования остаточных деформаций для определения напряженно-деформированного состояния пути в зоне сопряжения;

2) результаты анализа напряженно-деформированного состояния железнодорожного пути при сопряжении земляного полотна и ИССО;

3) генезис остаточных деформаций на въезде и съезде с ИССО;

4) критерий определения длины УПЖ;

5) рекомендации по совершенствованию конструкции зоны сопряжения земляного полотна и ИССО.

Степень достоверности и апробации результатов. Достоверность результатов исследования подтверждается сходимостью результатов математического моделирования с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований, инструментальных обследований железнодорожного пути в зоне сопряжения. Также полученные результаты согласуются с результатами исследований, полученными другими учеными.

Основные положения диссертационной работы докладывались, были обсуждены и одобрены: на заседаниях кафедры «Путь и путевое хозяйство» Института пути, строительства и сооружений, Москва, РУТ (МИИТ) в 2019 г, на научно-технических конференциях с международным участием «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути», Москва, МИИТ, в 2011, 2012, 2016 и 2017 гг.; на научно-технической конференции «Транспорт XXI века», Екатеринбург, УрГУПС, в 2011 г.

Внедрение результатов исследований. Результаты работы внедрены при разработке следующих нормативных документов: Типовые конструктивно-технологические решения к конструкции железнодорожного пути с участком переменной жесткости на подходах к безбалластному железнодорожному пути, Типовые конструктивно-технологические решения к конструкции железнодорожного пути с участком переменной жесткости на подходах к искусственным сооружениям утверждены 28 декабря 2016 г. № 803 первым вице-президентом ОАО «РЖД» А.С. Мишариным.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 8 печатных работах, из них 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении изложено обоснование актуальности диссертационной работы, обозначены объекты исследования и приведены методы исследования.

В первой главе проведен анализ состояния вопроса по сопряжению земляного полотна и ИССО. Проанализированы труды ученых, посвященные этой проблеме. Установлено, что в настоящее время в научно-технической

литературе отсутствует описание генезиса предмостовых ям, не установлены зависимости между интенсивностью их развития и условиями эксплуатации, такими как скорости движения, нагрузки от подвижного состава. Проблеме сопряжения земляного полотна и ИССО были посвящены труды ученых: Ашпиза Е.С., Гасанова А.И., Дорошкевича А.А., Замуховского А.В., Клинова С.И., Когана А.Я., Козьмина Ю.Г., Курбацкого Е.Н., Носарева А.В., Полякова В.Ю., Прокудина И.В., Серебрякова Д.В. и др.

Проведен анализ результатов экспериментальных исследований работы участков сопряжения, выполненных ранее. По результатам испытаний нагрузочными комплексами СМ-460 и СПМ-18 установлено, что даже при устройстве участков переменной жесткости не удается исключить перепад модуля упругости пути, а наибольшие значения этого модуля наблюдаются в зоне опорной части пролета и на шкафной стенке устоя.

В ходе исследования обобщены особенности конструкции пути в зоне сопряжения, которые необходимо учитывать при определении условий эксплуатации и параметров железнодорожного пути, влияющих на интенсивность развития остаточных деформаций, выявленные предыдущими исследователями. Основные из этих особенностей – накопление остаточных деформаций пути на балласте и отсутствие таких деформаций на безбалластном пути, наличие резкого изменения модуля упругости пути в зоне сопряжения двух конструкций.

Определен метод дальнейшего исследования – математическое моделирование. Выбор этого метода вызван, прежде всего, возможностью:

- изменять только один фактор в математической модели и на основе изменения результатов установить его однозначное влияние на те или иные процессы;
- в широком диапазоне варьировать исходные данные для моделирования;
- существенно сократить время исследования.

Во второй главе выполнен анализ математических моделей, характеризующих взаимодействие пути и подвижного состава при неравноупругом основании. Критериями выбора стали следующие параметры: возможность определения напряженно-деформированного состояния железнодорожного пути под воздействием подвижного состава в зоне перепада

модуля упругости пути; определение динамических сил, возникающих при прохождении подвижным составом зоны перепада модуля упругости пути; возможность прогнозирования остаточных деформаций пути. В результате была выбрана конечно-разностная модель взаимодействия пути и подвижного состава (авторы Гасанов А.И., Гречаник А.В). При разработке этой модели авторы в качестве исходных данных задавали начальную неровность пути и принимали в расчетах равноупругое основание. Выбранная математическая модель прошла проверку адекватности по следующим параметрам: динамические добавки, напряжения на основной площадке земляного полотна, прогноз накопления остаточных деформаций при различных начальных неровностях.

В рамках решаемой задачи принято, что в пути нет начальных геометрических неровностей, но имеется перепад модуля упругости. Эти предпосылки отличаются от тех, при которых проверена адекватность выбранной модели, поэтому возникла необходимость обоснования достоверности расчета упругих прогибов рельса при переменном модуле упругости пути. Для этого автором были проведены эксперименты на действующем участке пути, в ходе которых были измерены упругие прогибы рельса в зоне перепада модуля упругости пути под эталонной нагрузкой от нагрузочных комплексов и под графиковыми поездами для сравнения прогибов, полученных экспериментальным и расчетным путем.

Эксперименты проведены на устое моста через р. Вязьму (246 км ПК 5) Московской железной дороги. Выбор места проведения эксперимента обусловлен тем, что на участке пути имелся ярко выраженный перепад модуля упругости пути, земляное полотно стабильное, время испытаний было согласовано с графиком проходов нагрузочного комплекса.

Результаты измерений под нагрузочным комплексом позволили определить модуль упругости пути по формуле

$$U = \frac{1}{\sqrt[3]{256EI}} \sqrt[3]{\left(\frac{\Delta P}{\Delta y}\right)^4}, \quad (1)$$

где ΔP – разница между эталонными нагрузками P_1 и P_2 , а Δy – разница между двумя прогибами под этими нагрузками.

Вертикальное перемещение рельса измеряли по оси подошвы при помощи электропрогибомеров (далее – прогибомер) относительно неподвижной опоры.

На рисунке 1 показаны результаты измерений упругих деформаций рельса под нагрузками СПМ-18 и значения модуля упругости пути в каждом сечении.

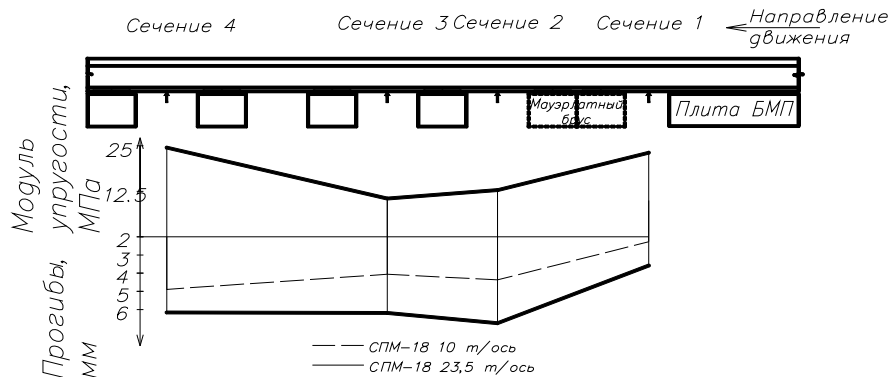


Рисунок 1 – Измеренные деформации рельса и значения модуля упругости на участке сопряжения устоя моста и пролетного строения

После определения характеристик пути их подставили в модель, имитировали пропуск локомотивов, т.к. известна их осевая нагрузка, и сравнили с результатами измерений (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Сравнение расчетных и экспериментальных прогибов рельса

Подвижной состав	Сечения											
	Сечение 1			Сечение 2			Сечение 3			Сечение 4		
	эксперимент	расчет	отклонение, %	эксперимент	расчет	отклонение, %	эксперимент	расчет	отклонение, %	эксперимент	расчет	отклонение, %
ЧС-4	3,40	3,50	-3	6,6	6,2	6	5,76	6,28	-9	5,98	5,37	10
ВЛ80Т	3,80	3,65	4	6,35	6,44	-1	6,35	6,55	-3	6,42	5,91	8
Электропоезд	2,75	2,89	-5	5,22	4,87	7	5,01	5,5	-10	5,19	4,7	9
СПМ-18	3,58	3,56	-1	6,75	6	-11	6,19	6,2	0	6,16	5,54	-10

Значения прогибов рельса, полученные в результате моделирования и экспериментально, отличаются не более чем на 11% (таблица 1), что свидетельствует о достаточной адекватности результатов расчета по принятой модели при переменном модуле упругости пути.

В третьей главе для оценки влияния условий эксплуатации пути на интенсивность развития предмостовых ям и раскрытия их генезиса была

проведена проверка чувствительности выбранной математической модели на изменение входных параметров. Для определения границы моделирования был использован тот факт, что путь с отступлениями, не превышающими I степень, обеспечивает заданные межремонтные сроки. Исходя из этого, в качестве допускаемой остаточной деформации в зоне сопряжения принято отступление, не превышающее I степень – 10 мм, развившееся при пропуске не менее 150 млн. т бр. – минимального межремонтного тоннажа для пути первого класса. При обеспечении такой интенсивности развития остаточных деформаций при эксплуатации не потребуется проводить работы по выправке. При этом следует ожидать, что развитие неровности не будет иметь скачкообразный характер.

Для проверки чувствительности модели был смоделирован участок сопряжения земляного полотна и ИССО, по которому имитировался пропуск поездной нагрузки до достижения принятого критерия – остаточной деформации 10 мм, либо до пропуска тоннажа 150 млн. т бр. (что наступает раньше). В ходе моделирования изменяли только один параметр для определения его влияния на те или иные результаты при неизменных остальных. В качестве влияющих параметров были рассмотрены: скорость подвижного состава, нагрузка на ось, модуль упругости пути и его перепад. Проверка реакции модели проведена при: нагрузках на ось 23,5; 25; 27; 30 т, скоростях движения от 60 до 100 км/ч с шагом 20 км/ч. Значения начального модуля упругости пути на земляном полотне приняты по результатам проходов нагрузочных комплексов: 25; 35 и 50 МПа; перепад модуля упругости в сторону увеличения 0; 20 и 40 МПа.

По результатам математического моделирования установлено, что даже при отсутствии перепада модуля упругости пути на подходах к ИССО развиваются предмостовые ямы. Причем величина скачка модуля упругости пути не оказывает существенного влияния на интенсивность их развития. На рисунке 2 представлена зависимость остаточных деформаций пути при осевой нагрузке 23,5 т, скорости движения 100 км/ч, начальном модуле упругости пути 50 МПа и различных перепадах модуля упругости пути (ΔU).

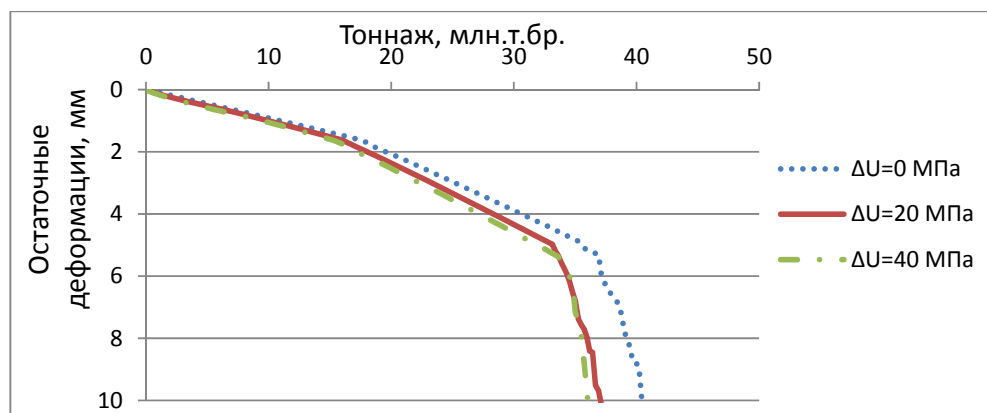


Рисунок 2 – Зависимость остаточных деформаций от пропущенного тоннажа при различных перепадах модуля упругости пути

Для более детального исследования влияния перепада модуля упругости пути на процесс формирования остаточных деформаций были построены графики развития остаточных деформаций и соответствующих им динамических добавок (см. рисунок 3) при сопряжении земляного полотна и ИССО без перепада модуля упругости пути (рисунок 3а) и динамические добавки сил (рисунок 3б) после пропуска 2,35 млн. т бр. и 7,05 млн. т бр.

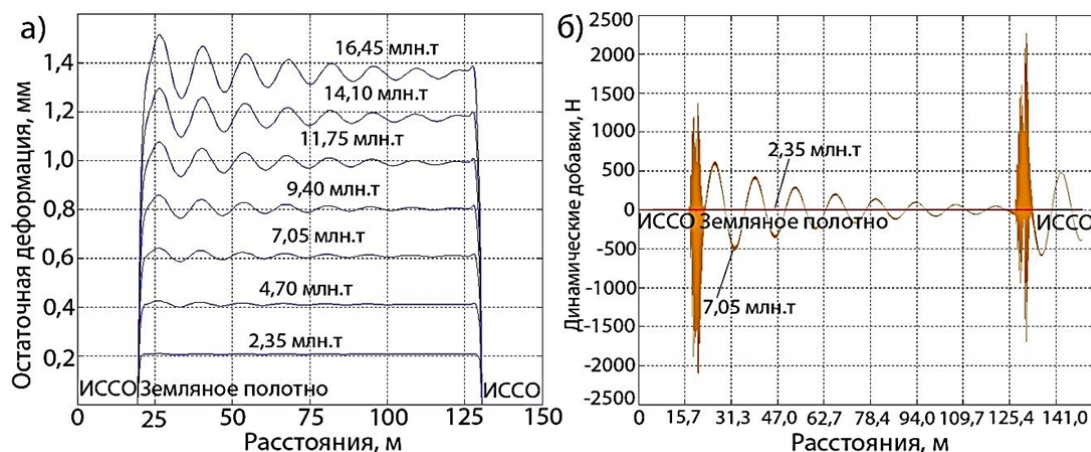


Рисунок 3 – Остаточные деформации пути и динамические добавки, возникающие на пути без перепада модуля его упругости

Из рисунка 3а видно, что на начальной стадии эксплуатации (2,35 млн. т бр.) остаточные деформации пути на земляном полотне развиваются равномерно. С накоплением пропущенного тоннажа увеличивается просадка пути, развивается неровность, которая становится причиной возбуждения колебаний подвижного состава, из-за чего интенсивность развития остаточных деформаций увеличивается.

На рисунке 4 приведен график развития остаточных деформаций пути при сопряжении земляного полотна и ИССО с модулями упругости 25 и

65 МПа соответственно (рисунок 4а) и ускорения неподрессоренных масс (рисунок 4б) после пропуска 2,35 млн.т.бр.

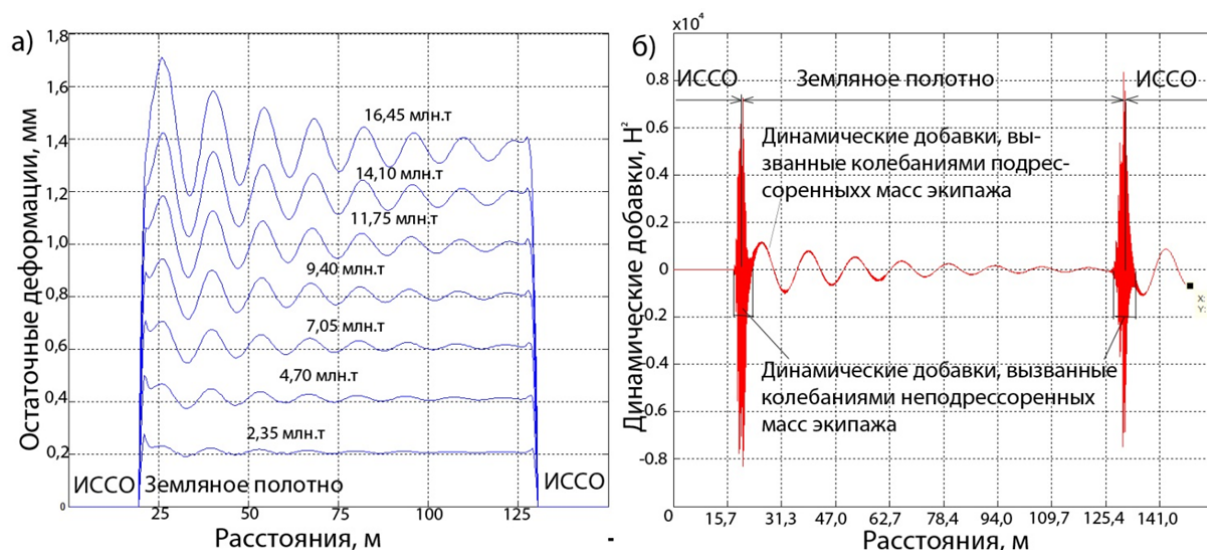


Рисунок 4 – Остаточные деформации (а) и динамические добавки действующие на путь (б) на неравножестком пути в зоне сопряжения

Как видно из рисунка 4б, при наличии перепада модуля упругости пути уже на начальной стадии эксплуатации возникают динамические добавки при прохождении подвижным составом зоны сопряжения. Наибольшие добавки сил действуют в зоне непосредственного сопряжения и вызваны высокочастотными колебаниями неподрессоренных масс экипажа, которые достаточно быстро затухают по длине. Расстояние от крайней подрельсовой опоры на ИССО, на котором происходят интенсивные колебания неподрессоренных масс, в дальнейшем будем называть зоной влияния. Длина этой зоны зависит от скорости движения, величины неподрессоренной массы и других параметров. В рамках приведенного численного эксперимента наибольшая длина зоны влияния составила около 3 м. Амплитуда колебаний неподрессоренных масс и, как следствие, величина динамических добавок зависят от скорости движения и величины силового уклона, который возникает при сопряжении пути с различными модулями упругости пути. Значения силового уклона, в свою очередь, зависят от амплитуды перепада модуля упругости пути и его начальных значений: при перепаде в 20 МПа силовой уклон будет больше при переходе с 25 на 45 МПа, чем с 50 на 70 МПа. Таким образом, величина перепада модуля упругости пути главным образом оказывает влияние на развитие предмостовых ям только в зоне колебаний неподрессоренных масс,

т.е. на расстоянии около 3 м от места сопряжения.

На начальной стадии эксплуатации остаточные деформации наиболее интенсивно развиваются в зоне влияния колебаний неподрессоренных масс (см. рисунок 4а). С накоплением пропущенного тоннажа наибольшие просадки пути развиваются за указанной зоной, где возникают динамические добавки от низкочастотных колебаний поддрессоренных масс (см. рисунок 4а), т.е. влияние колебаний неподрессоренных масс снижается. Это происходит из-за того, что примыкающий к зоне влияния путь на ИССО не накапливает остаточных деформаций, что не позволяет развиваться остаточным деформациям. На рисунке 5 представлены силы, действующие на опоры, при сопряжении пути с перепадом модуля упругости 35 и 55 МПа, осевой нагрузке 23,5 т после пропуска 0,235 и 16,45 млн. т бр.

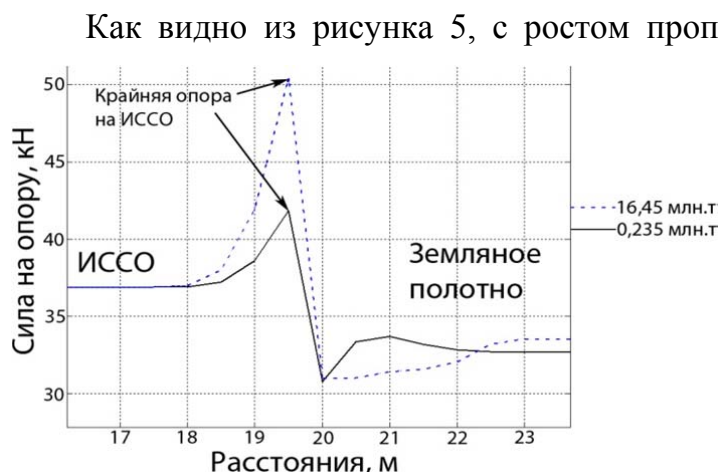


Рисунок 5 – Силы, действующие на опору, при сопряжении пути с модулем упругости 55 и 35 МПа

крайнюю опору увеличивается, а на земляном полотне, на расстоянии около 2,3 м от этой опоры, наоборот, снижается. С ростом пропущенного тоннажа эта тенденция сохраняется.

На начальной стадии эксплуатации Величина добавок, вызванных колебаниями поддрессоренных масс при прохождении подвижного состава зоны сопряжения, существенно меньше добавок, вызванных колебаниями неподрессоренных масс, (см. рисунок 4б), что связано с малостью силового уклона, вызванный перепадом модуля упругости пути, который в рамках численного моделирования не превысил 0,5 ‰.

Характер развития неровностей по длине при съезде с ИССО показывает, что наибольшие остаточные деформации развиваются в местах, где действуют наибольшие ускорения колебаний кузова подвижного состава. На рисунке 6 представлены графики остаточных деформаций пути и соответствующих им ускорений кузова: по горизонтальной оси отложены расстояния, по

вертикальной – остаточные деформации пути (шкала слева) и ускорения кузова подвижного состава (шкала справа). На графике наименьшее ускорение кузова вниз соответствует наибольшей просадке пути, отложенной вверх.

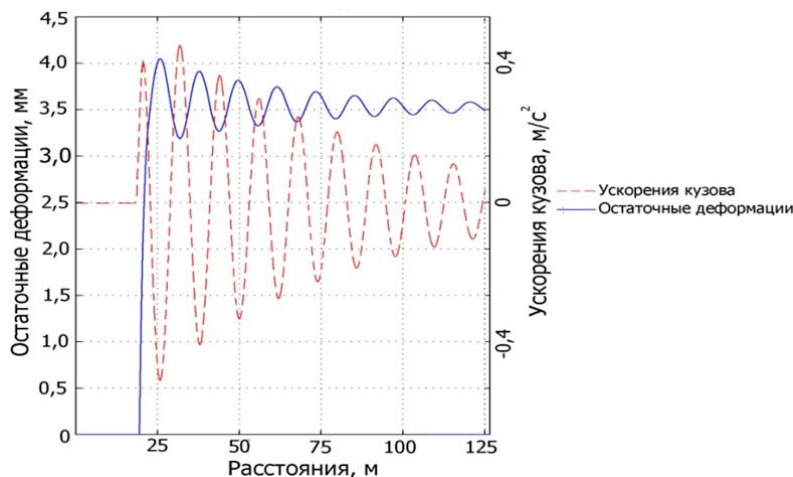


Рисунок 6 – Ускорения кузова подвижного состава и остаточные деформации пути

На основании полученных данных была выдвинута гипотеза о том, что периодические неровности пути на подходах к мостам, особенно при съезде, связаны с тем, что инициация колебаний подвижного состава происходит всегда в одном и том же месте –

сопряжении двух конструкций пути, поэтому путь испытывает динамическое воздействие от колебаний кузова на рессорах в одних и тех же местах, что и приводит к развитию периодической неровности пути.

Для проверки этой гипотезы было проведено сравнение силового профиля пути, полученного при помощи флексометров в ходе обследования участков переменной жесткости на Октябрьской железной дороге, с результатами математического моделирования. Измерения на различных подходах к мостам показали, что практически на всех встречается длина неровности около 18 м. Для сравнения результатов измерения с расчетами были смоделированы проходы пассажирских локомотивов ЧС2Т, ЧС7 и ЧС200 по участку сопряжения с установленными на тот момент скоростями. Рассчитанные длины неровностей составили $17,0 \div 19,7$ м, а расхождение между результатами моделирования и измерениями не превысило 10%.

Для подтверждения этой гипотезы также было проведено обследование моста через р. Клязьму (Московская железная дорога), в ходе которого проведена съемка микропрофиля рельса через 2,5 м (см. рисунок 7).

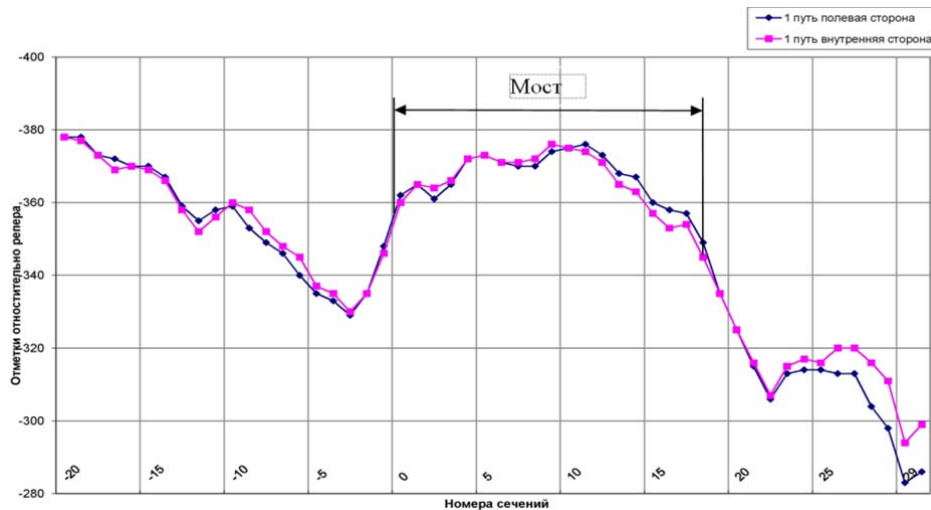


Рисунок 7 – Нивелировка микропрофиля пути на подходах к мосту через р. Клязьму

На рисунке 7 направление движения поездов – справа налево, участок расположен на уклоне, точка 0 – задняя грань отдающего устоя, границы моста – точки 0÷18. На графике отчетливо виден строительный подъем моста и неровности, развивающиеся за точками 0 и 18. Общий вид этих неровностей совпадает с изложенной гипотезой: между точками 0 и -7 видна предмостовая яма, между точками -10 и -14 видна вторая волна. Полученные результаты свидетельствуют об адекватности расчетной модели в рамках решаемой задачи.

Для определения длины УПЖ необходимо определить расстояние, которое проходит подвижной состав за половину полного колебания, T_K

$$L_{\text{УПЖ}} \geq \frac{T_K}{2} v \quad (2)$$

где T_K – период колебаний кузова подвижного состава, с; v – скорость движения, м/с.

Процесс развития и накопления остаточных деформаций при въезде на ИССО отличается от съезда (см. рисунок 8). При въезде, на начальной стадии эксплуатации, практически так же, как и на съезде, остаточные деформации развиваются равномерно, неровности возникают только за счет наличия перепада модуля упругости пути. С ростом просадок на земляном полотне неровность, вызванная перепадом модуля упругости пути, усугубляется геометрической неровностью пути, в результате чего увеличиваются динамические добавки вертикальных сил. При этом ближайшая шпала к ИССО начинает «зависать», т.к. безбалластный путь практически не накапливает остаточных деформаций, возрастают силы, действующие на опоры за устоем, в

результате чего наибольшие остаточные деформации начинают смещаться в сторону от ИССО.

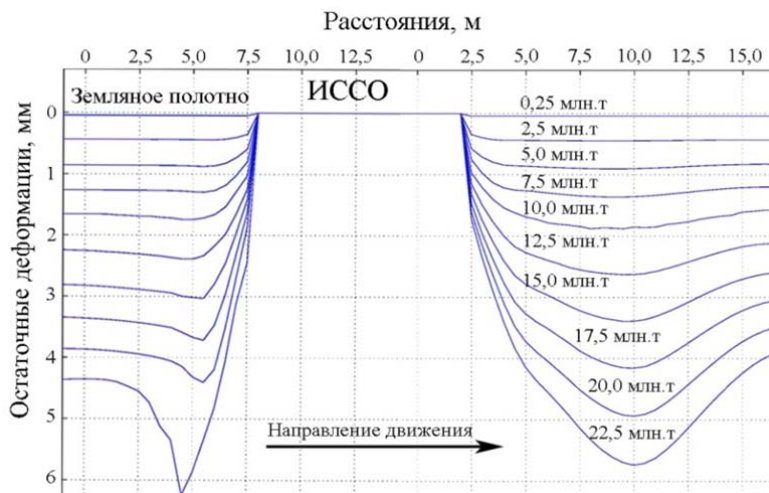


Рисунок 8 – Накопление остаточных деформаций на въезде и съезде с ИССО

В ходе проверки реакции модели определено, что наибольшее влияние на интенсивность развития остаточных деформаций на подходе к ИССО оказывают величина осевой нагрузки и величина модуля упругости пути на земляном полотне. В качестве примера на рисунке 9 приведена зависимость величины остаточных деформаций от пропущенного тоннажа при различной осевой нагрузке. Скорость движения составляла 100 км/ч, перепад модуля упругости 25÷65 МПа.

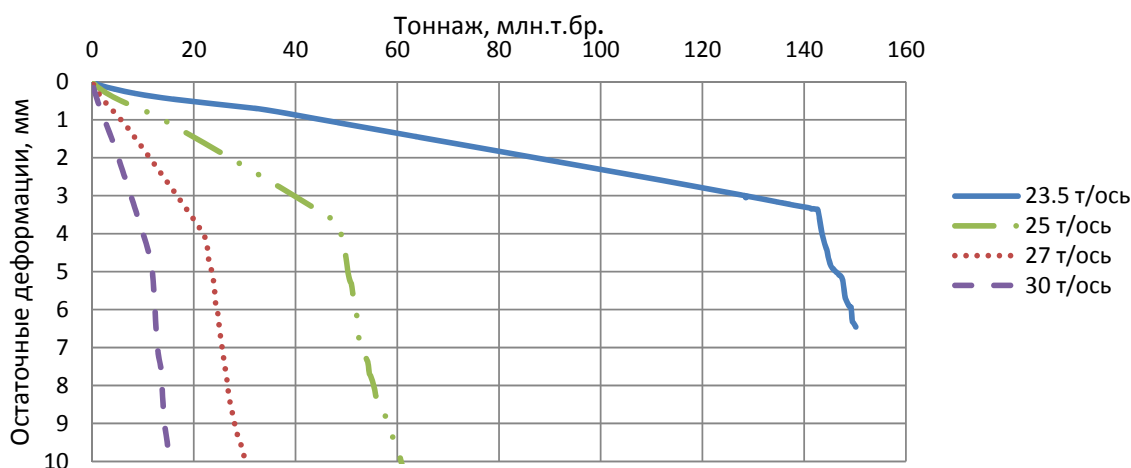


Рисунок 9 – Зависимость величины остаточных деформаций от пропущенного тоннажа при различных нагрузках на ось

Как видно из рисунка 9, при осевой нагрузке 23,5 т остаточные деформации пути развиваются с наименьшей скоростью и за 150 млн. т бр. не достигают 10 мм. При увеличении осевой нагрузки с 23,5 до 27 т скорость развития осадки увеличивается в 6,4 раза. Полученные данные говорят о том,

что при увеличении осевых нагрузок грузовых поездов необходимо особое внимание уделять участкам сопряжения.

На рисунке 9 отчетливо виден «перелом» графиков при накоплении остаточной деформации от 3 до 5 мм, связанный с тем, что в процессе развития периодической неровности на подходе к ИССО достигается такая ее величина, при которой начинают возбуждаться колебания неподрессоренных масс. Складывается ситуация, когда к динамическим добавкам от колебаний кузова на рессорах прибавляются динамические добавки, вызванные колебаниями неподрессоренных масс. На рисунке 10 показаны графики колебаний неподрессоренных масс при пропуске 21,6 и 22,7 млн. т бр. (остаточная деформация 3,9 и 4,4 мм соответственно).

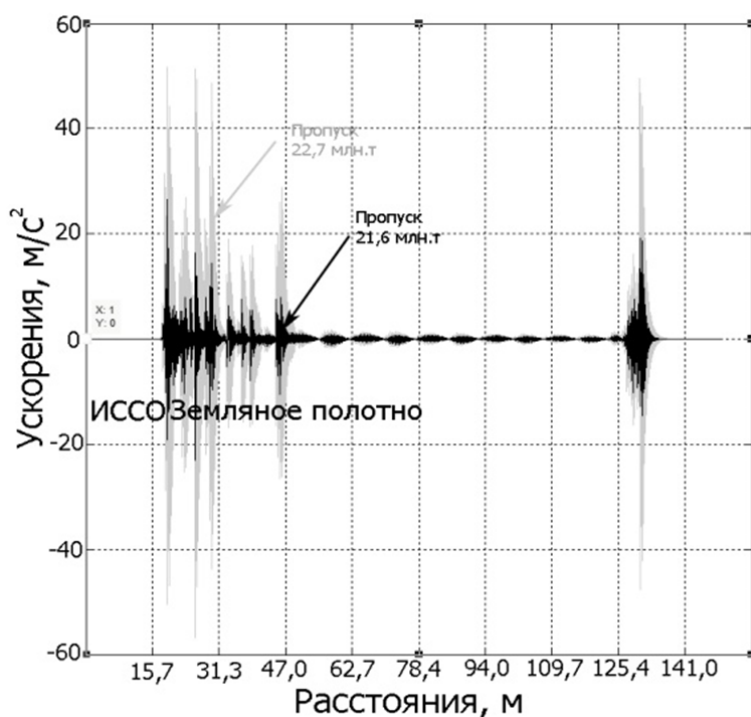


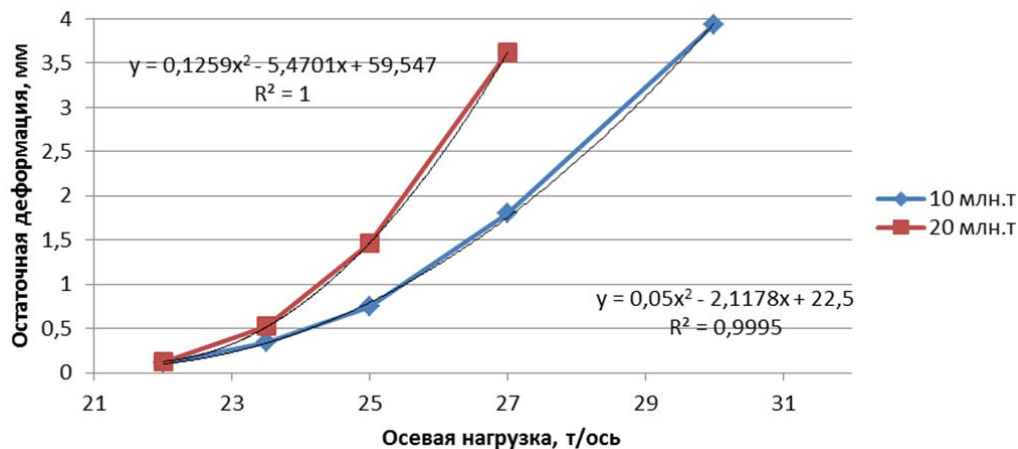
Рисунок 10 – Графики колебаний неподрессоренных масс при остаточных деформациях 3,9 и 4,4 мм

Величина неровности, при которой возникают колебания неподрессоренных масс, зависит от скорости движения, осевых нагрузок и параметров экипажа. В ходе проверки реакции модели не удалось установить точные корреляционные связи между значениями входных данных и конфигурацией остаточной деформации, при которой

происходит значительное возбуждение колебаний неподрессоренных масс, однако установлено, что оно происходит при неровности глубиной от 2,9 до 4,5 мм.

По результатам моделирования получена зависимость интенсивности накопления остаточных деформаций от осевой нагрузки, которая представлена на рисунке 11. Для определения интенсивности накопления остаточных деформаций были определены деформации, которые развиваются при пропуске

10 и 20 млн. т бр., т.к. при таких наработках зависимость накопления остаточных деформаций от пропущенного тоннажа линейна для всех осевых



нагрузок.

Рисунок 11 – Зависимость интенсивности остаточной деформации от осевой нагрузки

Аппроксимация зависимости интенсивности остаточной деформации от осевой нагрузки показала, что она наиболее близка к квадратической с достоверностью аппроксимации 0,9992.

По результатам моделирования установлено, что на скорость развития остаточных деформаций также существенно влияет величина модуля упругости на участке пути, подверженном накоплению остаточных деформаций. На рисунке 12 представлена зависимость остаточных деформаций от пропущенного тоннажа при различных модулях упругости пути на земляном полотне при осевой нагрузке 27 т, перепаде модуля упругости пути 20 МПа и скорости 100 км/ч.

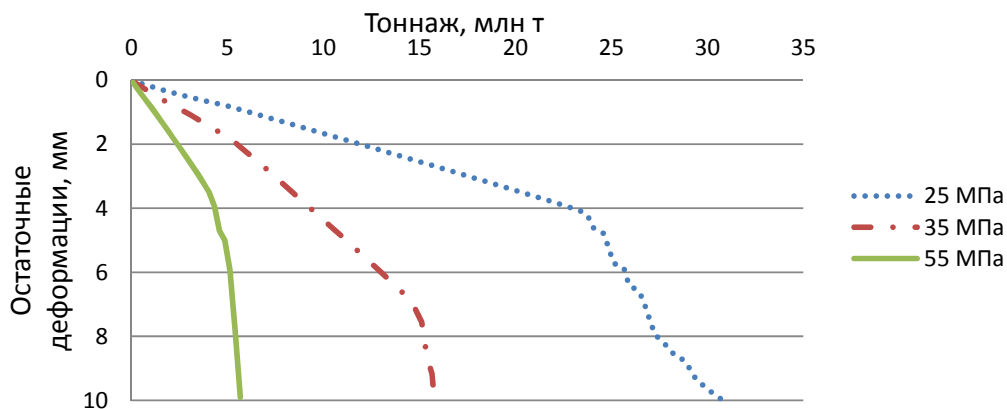


Рисунок 12 – Зависимость остаточных деформаций от пропущенного тоннажа при различных модулях упругости пути на земляном полотне

Полученные результаты хорошо согласуются с данными, полученными при внедрении железобетонных шпал, когда было установлено, что

интенсивность развития остаточных деформаций на железобетонных шпалах значительно выше, чем на деревянных из-за того, что модуль упругости пути на железобетонном подрельсовом основании в то время был существенно больше.

Влияние величины модуля упругости пути на земляном полотне обусловлено тем, что при увеличении модуля упругости пути силы, действующие на шпалу, увеличиваются и, как следствие, увеличиваются напряжения в балласте. Отметим также, что зависимости на рисунке 12 справедливы только в том случае, если прочность земляного полотна во всех случаях достаточна.

Скорость движения в исследованном диапазоне до 100 км/ч не оказывает существенного влияния на развитие остаточных деформаций.

В четвертой главе обоснованы параметры железнодорожного пути в зоне сопряжения, необходимые для наибольшей стабильности в этой зоне.

В современных условиях, при повышении осевых нагрузок, прочность основной площадки земляного полотна становится недостаточной, что может решаться устройством подбалластных защитных слоев. При этом верхняя часть земляного полотна заменяется более прочным грунтом, который характеризуется большими значениями модуля деформации. Это влечет за собой и увеличение модуля упругости пути и увеличение остаточных деформаций, образующихся за счет истирания и дробления балласта. Однако в 3 главе было установлено, что при меньших значениях модуля упругости остаточные деформации развиваются менее интенсивно. Поэтому целесообразно одновременно повышать прочность основной площадки земляного полотна и снижать модуль упругости пути за счет применения упругих материалов в различных элементах ВСП.

Из анализа многообразия безбалластных конструкций пути и опыта применения виброзащитного пути на балласте в тоннелях выделены три принципиальных конструктивных типа верхнего строения пути на ИССО и устоях мостов по расположению и типу упругого элемента:

прокладки повышенной упругости в узлах скреплений;

прокладки под подрельсовые опоры;

подбалластные маты или упругий слой под плитой безбалластного пути.

В исследованиях Каменского В.Б. отмечается, что ресурс снижения

жесткости упругих прокладок в узлах креплений практически исчерпан и дальнейшее уменьшение жесткости приведет к снижению ресурса всего узла крепления. Поэтому целесообразно снижать модуль упругости пути за счет применения упругих элементов под шпалой и/или в подшпальном основании.

На рисунке 13 показаны принципиальные конструктивные решения на подходах к мостам и тоннелям.

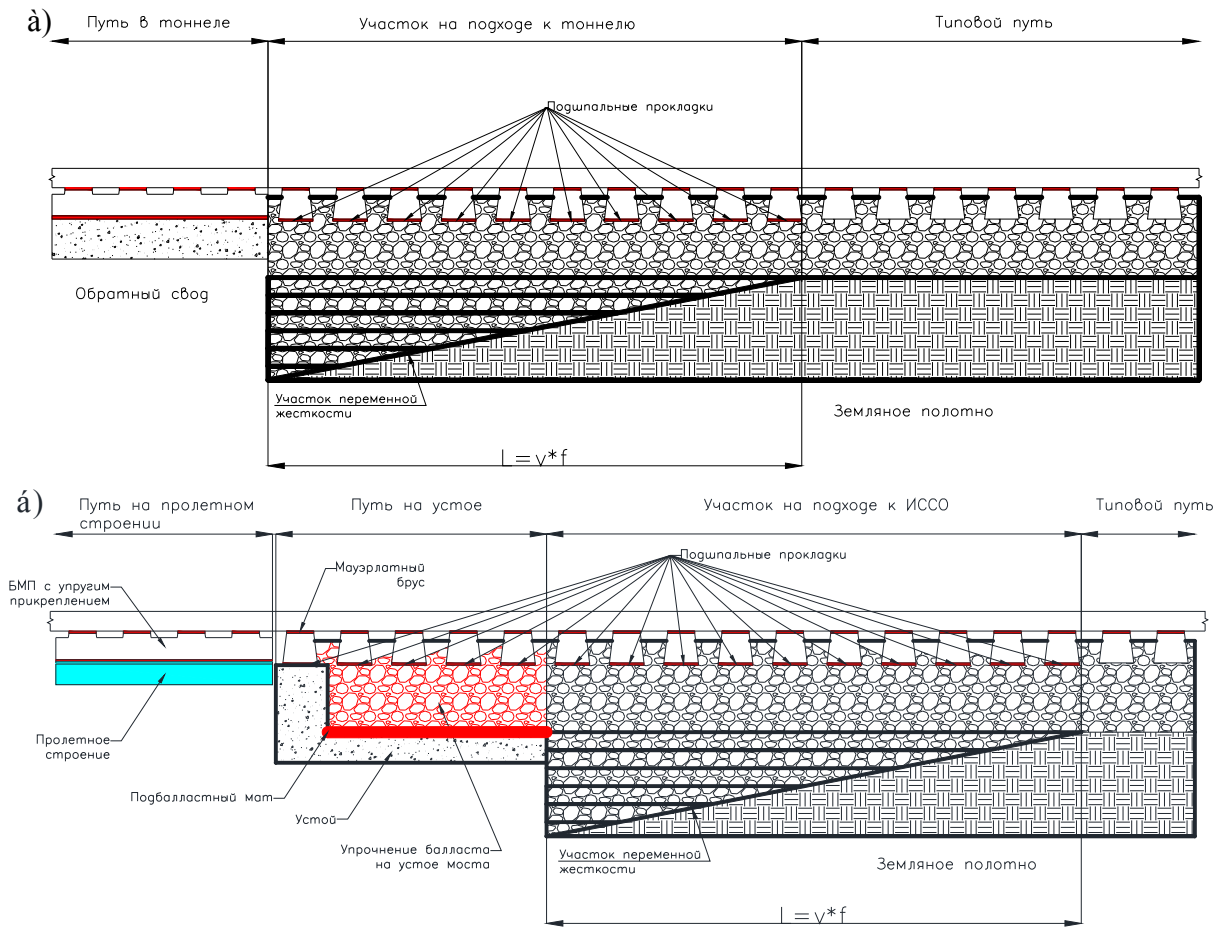


Рисунок 13 – Предлагаемые мероприятия по повышению стабильности пути в зоне сопряжения тоннелей (а), мостов (б) с земляным полотном

Основные предложения по совершенствованию пути на подходах:

- повышение прочности элементов, в которых накапливаются остаточные деформации;
- снижение модуля упругости пути применением различных упругих подшпальных прокладок на УПЖ, устое моста и мауэрлатном брус;
- снижение жесткости пути на ИССО, например, БМП с упругим креплением;
- укладка подбалластных матов на устоях мостов и на пролетных

строениях с ездой на балласте.

Проведена оценка эффективности предлагаемых мероприятий. Были рассмотрены два варианта конструкции пути в зоне сопряжения: укладка УПЖ на подходе к ИССО без снижения деформативности балласта, с перепадом модуля упругости пути 5 МПа и предлагаемая конструкция пути (см. рисунок 13).

По

каждому варианту конструкции пропускали поездную нагрузку до тех пор, пока в пути не образуется предмостовая яма глубиной 10 мм. После этого сравнивали пропущенный тоннаж по каждому варианту. Для осевых нагрузок 23,5 т при применении разработанных мероприятий увеличение пропущенного тоннажа для развития предмостовой ямы глубиной 10 мм составило 2,2 раза, а для 25 т – 2,6 раза.

Заключение

1. На основании анализа современных экспериментальных исследований установлено, что уложенные в настоящее время УПЖ полностью не устраняют перепад модуля упругости пути, и даже при их устройстве в пути возникают остаточные деформации на подходах к ИССО в виде предмостовых ям, которые становятся барьерными местами при повышении осевых нагрузок и создании малообслуживаемой конструкции пути.

2. По результатам выполненных автором экспериментальных исследований установлено, что математическая модель прогнозирования остаточных деформаций железнодорожного пути позволяет рассчитывать параметры напряженно-деформированного состояния пути, соответствующие действительным осадкам пути, и её можно применять при расчетах с переменным модулем упругости пути.

3. Выполненное математическое моделирование взаимодействия пути и подвижного состава в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО позволило раскрыть генезис предмостовых ям. Установлено, что на ранней стадии эксплуатации пути в зоне сопряжения наибольшее воздействие на путь оказывают колебания неподрессоренных масс экипажа. С накоплением пропущенного тоннажа их влияние снижается из-за образования пустот под шпалами, и возрастает роль колебаний поддрессоренных масс экипажа.

4. Установлено, что даже полное исключение перепада модуля упругости

пути при сопряжении земляного полотна и ИССО не позволяет исключить появление и развитие предмостовых ям, поэтому при устройстве УПЖ необходимо проводить дополнительные мероприятия по снижению деформативности железнодорожного пути на земляном полотне.

5. Определены параметры эксплуатации пути и его упругие характеристики, при которых интенсивность развития предмостовых ям наибольшая. Главным условием эксплуатации, влияющим на скорость развития характерных неровностей, являются осевые нагрузки. Установлено, что зависимость интенсивности развития предмостовых ям от величины нагрузок на ось не линейна и близка к квадратической.

6. По результатам исследования установлено, что с точки зрения снижения интенсивности накопления остаточных деформаций на подходах к ИССО целесообразнее снижать модуль упругости пути на нем и на УПЖ до значений, близких к значениям на земляном полотне. Повышение модуля упругости пути приводит к увеличению сил, действующих на подрельсовые опоры, и повышает интенсивность накопления остаточных деформаций пути, уложенного на земляном полотне.

7. Амплитуда перепада модуля упругости пути в пределах 40 МПа не оказывает существенного влияния на интенсивность развития предмостовых ям, но оказывает динамическое воздействие в зоне непосредственной близости от ИССО – около 3 м.

8. Проведенное математическое моделирование позволило установить критерий определения длины УПЖ с точки зрения воздействия подвижного состава на путь. Длину УПЖ следует назначать с учетом периода собственных колебаний кузова подвижного состава на рессорах и скорости его движения.

9. Разработан ряд мероприятий по повышению стабильности железнодорожного пути в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО. Проведенная оценка эффективности этих мероприятий показала, что при их применении существенно повышается стабильность железнодорожного пути на подходах к ИССО.

10. Таким образом, проведенное исследование позволило определить факторы, в наибольшей степени влияющие на интенсивность развития предмостовых ям, разработать мероприятия по их предупреждению, что позволит существенно снизить затраты на текущее содержание пути в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО.

11. Дальнейшими направлениями исследований являются определение условий, при которых остаточные деформации пути в зоне сопряжения при въезде или съезде будут развиваться более интенсивно; определение рациональных сфер применения разработанных мероприятий, в зависимости от условий эксплуатации пути.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих работах автора:

а) публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. Замуховский, А. В. Экспериментальное обследование участков переменной жесткости [Текст] // А.В. Замуховский, К.В. Меренченко // Мир транспорта. – 2013. – № 3. – С. 74–82.

2. Меренченко, К. В. Разработка критериев определения допускаемой неравножесткости пути для зоны сопряжения земляного полотна и искусственного сооружения [Текст]. // К.В. Меренченко // Транспорт Урала. – 2014, – №1. – С. 26-31

3. Меренченко, К. В. Новые подходы к проектированию пути в зоне сопряжения земляного полотна и искусственного сооружения [Текст] // К.В. Меренченко // Транспортное строительство, – 2014, – № 6 – С. 7–9.

б) публикации в других изданиях:

4. Замуховский, А. В., Применение жидких композитных материалов для закрепления балластной призмы, земляного полотна и грунтовых сооружений [Текст]. // Замуховский А.В., Меренченко К.В., Гусев А.М., Шмаков А.П. Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации земляного полотна железных дорог: труды VIII научно-технической конференции с международным участием, 2 июня 2011 г., г. Москва: чтения, посвященные 107-летию профессора Г.М. Шахунянца. – М.: МИИТ, 2011. С. 207-208

5. Замуховский, А. В., Оценка влияния неравножесткости бесстыкового пути в зоне сопряжения земляного полотна и искусственного сооружения на состояние ГРК / [Текст] / Замуховский А.В., Меренченко К.В., Гречаник А.В. Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. : труды IX научно-технической конференции с международным участием, 4-5 апреля 2012 г., г. Москва: чтения, посвященные 108-летию профессора Г.М. Шахунянца. – М.: МИИТ, 2012. С. 213-215

6. Меренченко, К. В. Генезис остаточных деформаций, возникающих при сопряжении земляного полотна и искусственного сооружения. Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути [текст] // труды XIII научно-технической конференции с международным участием, 31 марта – 1 апреля 2016 г., г. Москва: чтения, посвященные 112-летию профессора Г.М. Шахунянца. – М.: МИИТ, 2016. С. 200-204

7. Меренченко, К. В., Взаимосвязь упругих и деформативных параметров пути с нагрузками на ось свыше 23,5 т. Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути.: труды XIV научно-технической конференции с международным участием, 31 марта – 1 апреля 2017 г., г. Москва: чтения, посвященные 113-летию профессора Г.М. Шахунянца. – М.: МИИТ, 2017. С. 212–214.

Меренченко Константин Вячеславович

**ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ПУТИ В ЗОНЕ СОПРЯЖЕНИЯ
ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА И ИСКУССТВЕННОГО СООРУЖЕНИЯ**

05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскания и проектирование железных дорог

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать

Заказ

Формат 60×90/16

Усл.печ.л. 1,5.

Тираж 80 экз.

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