

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет транспорта»
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи

Меренченко Константин Вячеславович

Повышение стабильности пути в зоне сопряжения
земляного полотна и искусственного сооружения

05.22.06 Железнодорожный путь, изыскания и проектирование железных дорог

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Замуховский Александр Владимирович

Москва – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИЗ РАБОТЫ ПУТИ В ЗОНЕ СОПРЯЖЕНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА И ИСКУССТВЕННОГО СООРУЖЕНИЯ	9
1.1 Неровности пути на подходах к ИССО	9
1.2 Конструкции железнодорожного пути по предупреждению предмостовых ям.....	13
1.2.1 УПЖ с постепенным увеличением жесткости пути по мере приближения к ИССО.....	13
1.2.2 Снижение модуля упругости пути на ИССО	26
1.3 Анализ опыта работы различных УПЖ, уложенных в нашей стране .	27
1.4 Существующие критерии оценки зоны сопряжения, цель настоящей работы и определение методов исследования	35
1.5 Выводы по главе 1.....	39
2 ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУТИ И ПОДВИЖНОГО СОСТАВА В ЗОНЕ СОПРЯЖЕНИЯ	41
2.1 Анализ существующих математических моделей взаимодействия пути и подвижного состава в зоне сопряжения	41
2.2 Методика проверки адекватности математической модели.....	55
2.3 Экспериментальные исследования упругих характеристик пути в зоне сопряжения.....	58
2.4 Проверка адекватности данных, получаемых расчетным путем при помощи выбранной модели.....	63
2.5 Выводы по главе 2.....	64
3 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПУТИ НА РАЗВИТИЕ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ЗОНЕ СОПРЯЖЕНИЯ	65
3.1 Методика проверки чувствительности модели.....	65
3.2 Генезис предмостовых ям	68

3.3	Определение критерия длины УПЖ	76
3.4	Определение параметров эксплуатации пути, в наибольшей степени влияющих на интенсивность развития остаточных деформаций в зоне сопряжения.....	84
3.5	Выводы по главе 3.....	88
4	РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ КОНСТРУКЦИИ ПУТИ В ЗОНЕ СОПРЯЖЕНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА И ИСКУССТВЕННОГО СООРУЖЕНИЯ	90
4.1	Выбор параметров пути в зоне сопряжения на основе проведенного математического моделирования	90
4.2	Разработка мероприятий по совершенствованию конструкции пути в зоне сопряжения	95
4.3	Взаимосвязь различных параметров, характеризующих упругие характеристики элементов пути	106
4.4	Оценка эффективности предлагаемых мероприятий.....	110
4.5	Выводы по главе 4.....	112
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	115

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Одним из стратегических направлений развития железнодорожного транспорта общего пользования является организация тяжеловесного движения, в том числе с повышенными осевыми нагрузками. В рамках этой стратегии предполагается внедрение вагонов с осевой нагрузкой до 30 т [1], при этом предполагается, что масса грузовых поездов повысится до 9100 т и более. Очевидно, что для повышения осевых нагрузок и веса поезда необходимо усиление всей железнодорожной инфраструктуры. В 2010 году был принят стандарт ОАО «РЖД», содержащий требования к конструкции пути и нормам его устройства, при обращении поездов повышенного веса и длины [2], среди них:

- расчетный коэффициент устойчивости откосов насыпей должен быть не менее 1,25;

- должны быть созданы участки переходного пути с переменной жесткостью на подходах к искусственным сооружениям (далее – ИССО);

- должен быть уложен бесстыковой путь на железобетонных шпалах;

- выплески и неравномерное пучение должны быть исключены;

- водоотводные сооружения должны быть исправны;

- земляное полотно должно быть усилено защитными слоями.

Другой приоритетной задачей, стоящей перед ОАО «РЖД», является разработка малообслуживаемой конструкции верхнего строения пути [3]. Создание такой конструкции позволит существенно снизить затраты на текущее содержание пути, уменьшить потери, вызванные ограничениями скоростей движения и необходимостью предоставления «окон» для ремонтов пути.

Решение указанных задач может быть выполнено за счет увеличения мощности верхнего строения пути либо за счет снижения нагрузок на элементы пути, подверженные накоплению остаточных деформаций. Увеличение мощности верхнего строения пути не всегда целесообразный и выгодный с экономической точки зрения шаг. Поскольку, с одной стороны, требует значительных капитальных вложений, с другой стороны, некоторые элементы верхнего строения пути

обладают достаточным запасом прочности (например, рельсы). Расстройства пути в некоторых случаях носят закономерный характер и проявляются, как правило, в одних и тех же местах. Например, это происходит на подходах к ИССО, где образуются характерные неровности, которые получили название – предмостовые ямы. Участки с предмостовыми ямами при повышении осевых нагрузок и скоростей движения становятся «барьерными» местами [4–13].

Для выполнения поставленных задач по повышению осевых нагрузок и созданию малообслуживаемого верхнего строения пути необходимо либо исключить возможность появления предмостовых ям, либо снизить интенсивность их развития, чтобы не возникало необходимости в выполнении работ по их исправлению между плановыми ремонтами.

Степень разработанности темы исследования. Для обеспечения стабильности пути на подходах к ИССО существует требование по созданию в этой зоне участков переменной жесткости (далее – УПЖ) [14–18]. Принцип реализации таких участков заключается в постепенном увеличении модуля упругости пути по мере приближения к ИССО для исключения его перепада в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО за счет изменения конструкции верхнего строения пути (далее – ВСП) и/или рабочей зоны земляного полотна. Другим направлением является уменьшение модуля упругости пути на самом ИССО за счет применения в безбалластной конструкции мостового полотна (далее – БМП) упругих прокладных слоев [19]. Исследования, выполненные ранее, были направлены в основном на разработку конструкций пути на подходах, и в качестве основной причины возникновения и развития остаточных деформаций на подходах к ИССО в этих исследованиях принимали перепад модуля упругости пути при сопряжении двух конструкций [4].

Однако ряд экспериментальных исследований показывает [11, 20], что даже при устройстве УПЖ не удастся исключить появление предмостовых ям, а в зоне сопряжения имеется перепад модуля упругости пути, что нежелательно. В то же время, до сих пор не в полной мере раскрыт генезис остаточных деформаций на подходах к мостам. Недостаточно изученными остаются вопросы о том, какие из эксплуатационных параметров в большей степени влияют на величину

остаточных деформаций и интенсивность их развития в зоне сопряжения, различаются ли процессы развития предмостовых ям на въезде и съезде с ИССО, какие динамические процессы в большей степени оказывают влияние на формирование этих неровностей, и чем должна определяться длина УПЖ.

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

Для выполнения поставленной цели исследования были поставлены и решены следующие задачи:

1. Выбрана математическая модель, которая позволяет определять напряженно-деформированное состояние железнодорожного пути в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО, а также прогнозировать развитие остаточных деформаций пути.

2. Выполнена экспериментальная проверка адекватности выбранной математической модели.

3. Определен генезис остаточных деформаций на въезде и съезде.

4. Определены эксплуатационные параметры, которые больше остальных влияют на величину остаточных деформаций и интенсивность их накопления.

5. Разработаны рекомендации по совершенствованию конструкции УПЖ в зависимости от эксплуатационных параметров.

Объектом исследования является зона сопряжения¹ 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:

1. На основе результатов экспериментальных исследований расширена сфера применения математической модели прогнозирования остаточных деформаций пути.

¹ Здесь и далее зона сопряжения – часть железнодорожного пути на подходе к ИССО, где может быть уложен УПЖ и часть железнодорожного пути уложенного на самом ИССО.

2. Определены основные причины возникновения характерных 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. Выявлено отличие 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 параметрах, при которых предмостовые ямы развиваются наиболее интенсивно, а также разработанный критерий определения длины УПЖ позволяют принимать обоснованные проектные 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 России и за рубежом, проведения натурных экспериментов на действующем пути, а также математического моделирования.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся:

1. Расширение сферы применения существующей математической модели прогнозирования остаточных деформаций для определения напряженно-деформированного состояния пути в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО.

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 земляного полотна и ИССО. Также полученные результаты согласуются с результатами исследований других ученых.

Основные положения диссертационной работы докладывались, 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», М., МГУПС (МИИТ), 2011, 2012, 2016 и 2017 гг.; на научно-технической конференции «Транспорт XXI века», посвященной 55-летию УрГУПС, в 2011 г.

Внедрение результатов исследований. Результаты работы были использованы 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.

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.

1 АНАЛИЗ РАБОТЫ ПУТИ В ЗОНЕ СОПРЯЖЕНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА И ИСКУССТВЕННОГО СООРУЖЕНИЯ

1.1 Неровности пути на подходах к ИССО

Опыт эксплуатации железнодорожного пути в нашей стране и за рубежом показал [4–13], что при сопряжении земляного полотна и ИССО возникают характерные неровности в виде так называемых предмостовых ям. Общий вид пути с предмостовой ямой представлен на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Общий вид пути с предмостовой ямой

Одним из первых, кто обратил внимание на работу пути в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО был Ю.Г. Козьмин В своих работах [21–23] он рассматривал вопрос о динамических силах, возникающих от этих неровностей. В своей работе он не рассматривал неравножесткость пути, причины возникновения и развития этих неровностей, и им не было предложено специальных конструкций для предупреждения их возникновения и развития.

Более детально предостовые ямы стали изучать В.Ю. Поляков и С.И. Клинов [4, 24]. При обследовании пути с такими неровностями С.И. Клиновым [4] было установлено, что в зоне непосредственного сопряжения земляного полотна и ИССО резко изменяются просадки рельса, силы, действующие на опоры, напряжения в рельсах, а «постоянная перегрузка первой опоры безбалластного пути приводит к ее разрушению и росту просадок рельсов» [4]. Результаты инструментального обследования, на основании которых были сделаны эти выводы, приведены на рисунке 1.2.

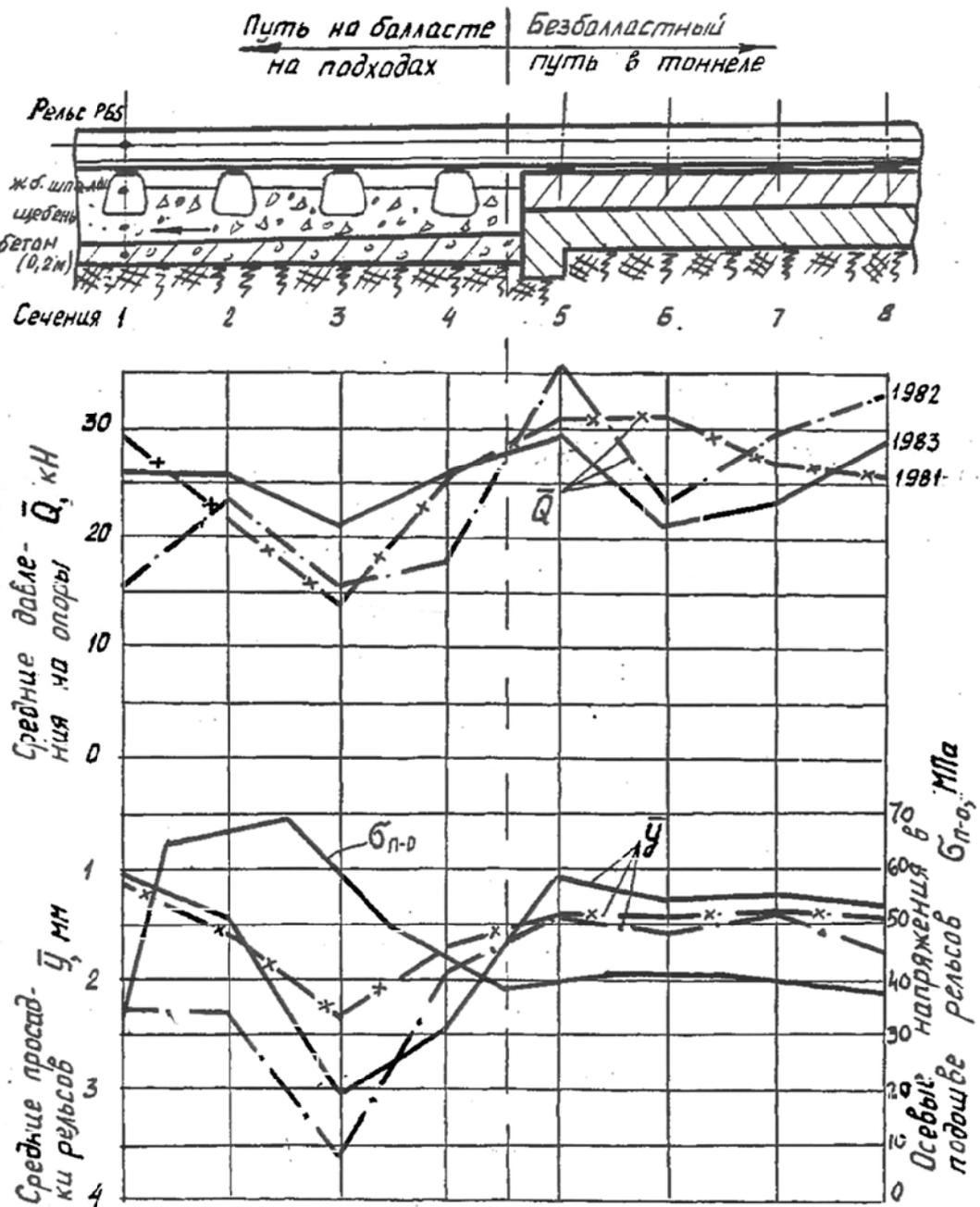


Рисунок 1.2 – Давление на опоры и напряжения в рельсах в зоне непосредственного сопряжения пути в тоннеле и на земляном полотне

С.И. Клиновым также было установлено, что предмостовые ямы после исправления их при помощи электрошпалоподбоек достаточно быстро могут появляться вновь, причем практически в том же виде, как и до исправления [4]. На рисунке 1.3 показан продольный профиль, пути, измеренный до исправления предмостовой ямы и после пропуска 100 тыс. т бр. по этому участку.

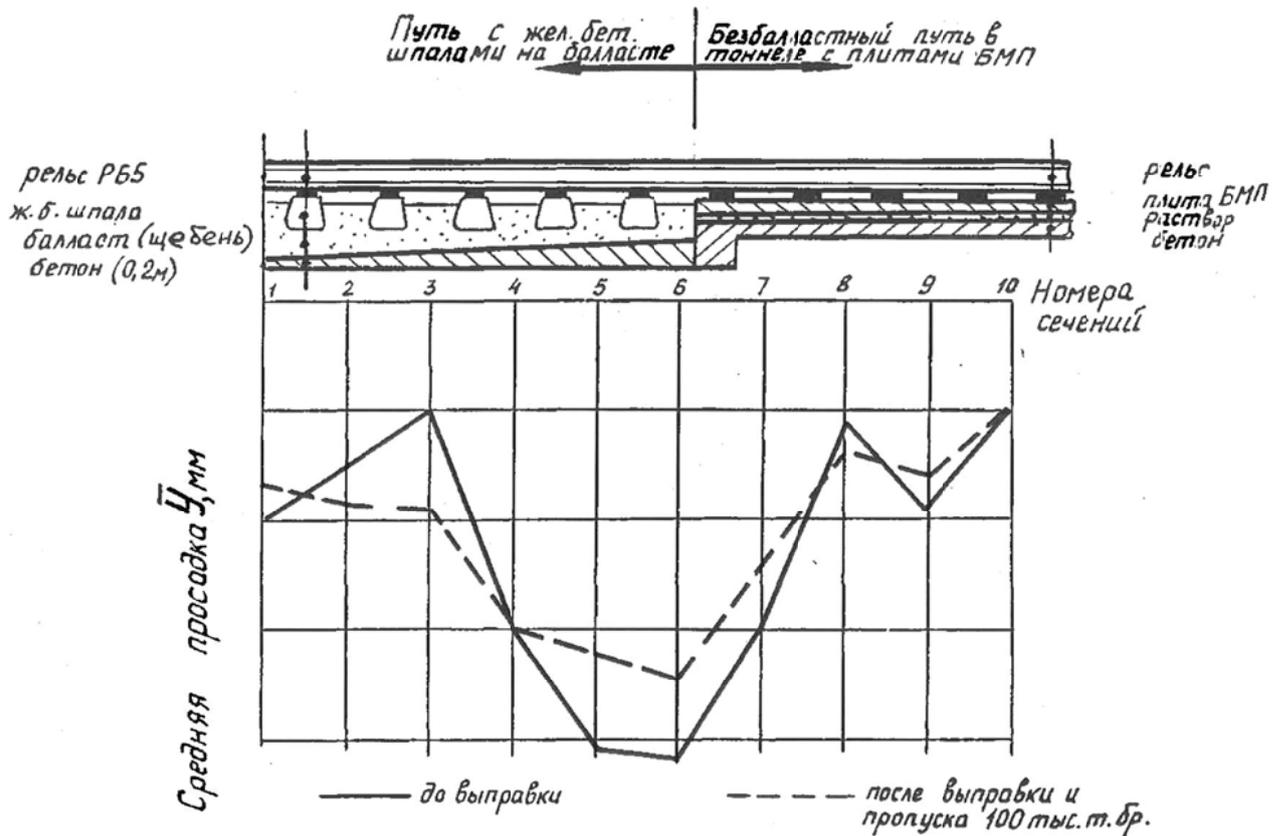


Рисунок 1.3 – Просадки рельсов под поездной нагрузкой в зоне перехода на безбалластный путь

Постоянное развитие неровностей на подходах к ИССО приводит к тому, что места сопряжения пути, уложенного на разных конструкциях нижнего строения, становятся «барьерными» при повышении осевых нагрузок и скоростей движения поездов [4–11]. В настоящее время в отечественной и зарубежной практике рассматривают две основные причины возникновения и развития предмостовых ям:

1. *Неравномерная осадочность железнодорожного пути, уложенного на земляном полотне и ИССО.* Как известно, железнодорожный путь, уложенный на

земляном полотне, накапливает остаточные деформации из-за того, что балласт подвержен истиранию, дроблению, переупаковке и другим воздействиям. Рабочая зона земляного полотна также накапливает остаточные деформации под действием поездной нагрузки. Конструкция верхнего строения пути на ИССО практически не накапливает остаточных деформаций. Из-за этого при непосредственном сопряжении земляного полотна и ИССО развиваются осадки пути на подходах. Эти положения изложены А.И. Гасановым в [25].

2. Перепад модуля упругости пути. Вследствие конструктивных различий пути, уложенного на земляном полотне и на ИССО, модуль упругости пути на этих конструкциях существенно отличается [4].

В 70-х и 80-х годах прошлого века сотрудниками Путьеиспытательной лаборатории кафедры «Путь и путевое хозяйство» МИИТа под руководством С.И. Клинова были выполнены обширные исследования, в которых определены параметры пути, уложенного на земляном полотне и различных искусственных сооружениях [26, 27]. При экспериментальных исследованиях были определены: величины модуля упругости на земляном полотне и ИССО, величины неровностей пути в зоне сопряжения. Было выявлено, что модуль упругости пути на ИССО практически в два раза больше, чем на земляном полотне.

С.И. Клиновым был проведен обширный анализ отечественного и зарубежного опыта по устранению предмостовых ям, в результате которого он показал, что устранить их появление незначительными изменениями традиционной конструкции пути не удастся, и в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО необходимо устраивать УПЖ [4]. При их создании исходили из того, что модули упругости пути на земляном полотне и на ИССО отличаются на некоторую величину. Эта разница может достигать больших значений (до 2 раз), но на протяжении одной конструкции значения модуля остаются неизменными [26, 27]. Ниже приведен обзор наиболее распространенных конструкций УПЖ, их особенности и принципы усиления пути на подходах.

1.2 Конструкции железнодорожного пути по предупреждению предмостовых ям

За годы исследований работы пути на подходах к ИССО было разработано большое количество конструкций УПЖ как в нашей стране, так и за рубежом. Примечательно то, что все эти конструкции объединяют одинаковые принципы их работы, так как в большинстве конструкций реализован принцип увеличения модуля упругости пути по мере приближения к ИССО.

1.2.1 УПЖ с постепенным увеличением жесткости пути по мере приближения к ИССО

Первый УПЖ, который был разработан и уложен в нашей стране, имеет конструкцию, состоящую из железобетонных плит, площадь опирания которых постепенно уменьшается по мере удаления от искусственного сооружения, за счет чего обеспечивается плавное изменение модуля упругости пути по мере приближения к ИССО [4,26]. Конструкция переходного участка из железобетонных плит представлена на рисунке 1.4.

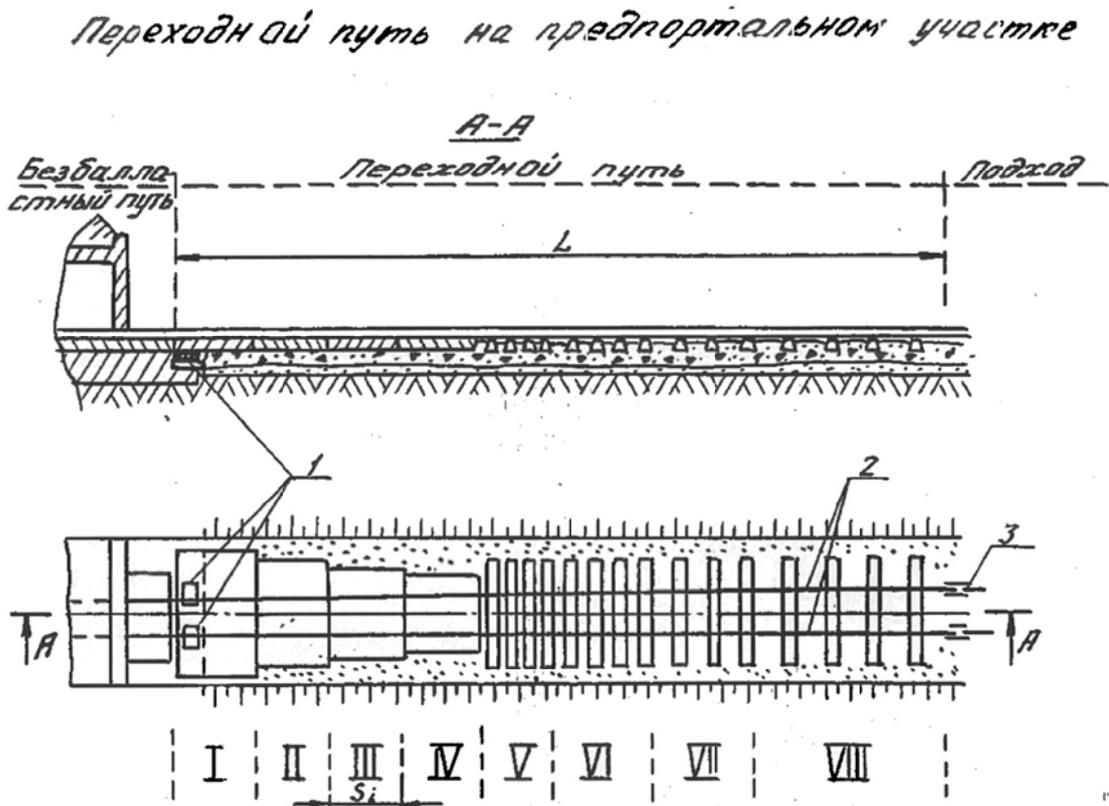
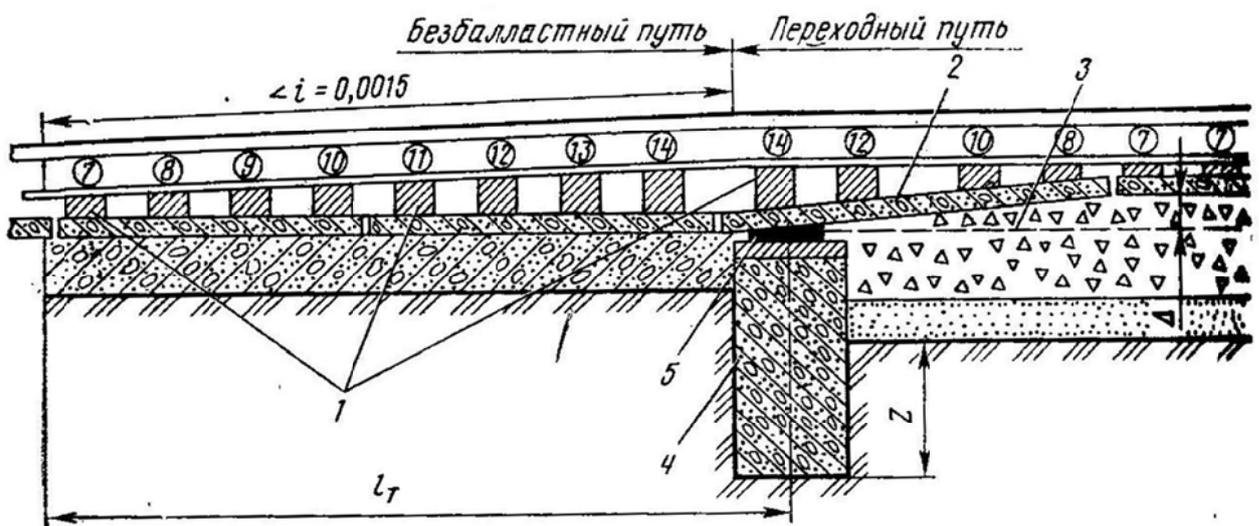


Рисунок 1.4 – Конструкция УПЖ с применением железобетонных плит переменной ширины

Конструкция железобетонных плит была разработана на основе плит БМП, ширина которых уменьшалась от стандартной 3,2 м до 2,4 м с шагом 0,2 м. Укладывали по две плиты каждой ширины. После плит укладывали звенья рельсошпальной решетки с различной эпюрой: от 2400 шт./км у плит и далее с эпюрой 2200, 2000 и 1840 шт./км с шагом 25 м.

Особенностью конструкции является то, что первая от портала плита со стороны тоннеля опирается на резинометаллические опоры, применяемые в мостостроении, и на балласт. Продольный профиль участка изображен на рисунке 1.5.



- 1- регулировочные прокладки; 2 – плита БМП шириной 3,2 м; 3 – проектный уровень подошвы плит; 4 – бетонная опора; 5 – резинометаллическая опорная часть; цифры в кружочках обозначают толщину прокладок в мм

Рисунок 1.5 – Продольный профиль в зоне сопряжения УПЖ из железобетонных плит и тоннеля

При проектировании УПЖ из железобетонных плит С.И. Клинов задавал величины силовых уклонов при переходе с одной плиты на другую, а также силы, действующие на подрельсовые опоры, таким образом, чтобы они не превышали определенных значений [5]. Однако он не рассматривал подробно процесс зарождения и развития неровностей, какие из эксплуатационных факторов больше остальных влияют на интенсивность их развития, а также не давал подробных рекомендаций по длине УПЖ в зависимости от скорости движения.

Следует заметить, что при таком подходе к проектированию УПЖ модуль упругости пути изменяется при переходе с одной плиты на другую «ступенчато», т.е., несмотря на применение специальной конструкции, имеются перепады модуля упругости пути, которые при движении поездов могут стать причиной появления дополнительных динамических сил, вызванных колебаниями подрессоренных и неподрессоренных масс.

При визуальном обследовании УПЖ с плитами переменной ширины после 26 лет эксплуатации было обнаружено, что в зоне сопряжения подрельсового основания из плит и шпал возникла предмостовая яма, которая представлена на рисунке 1.6 [28].



Рисунок 1.6 – Предмостовая яма в зоне сопряжения железобетонных плит и шпал (фото автора)

УПЖ из железобетонных плит изменяет только конструкцию ВСП. Таким образом, на подходах к ИССО возникает конструкция с плитным подрельсовым основанием. Как известно, путь с такой конструкцией верхнего строения требует тщательной подготовки основания для исключения остаточных деформаций основной площадки земляного полотна. Кроме того, в случае возникновения просадок пути с плитами БМП их выправка в профиле возможна только за счет регулировок в узлах скрепления.

В настоящее время УПЖ из плит уложен только на подходах к тоннелю 4А Горьковской железной дороги. В отечественной практике гораздо большее распространение получили конструкции, в которых изменения претерпевает рабочая зона земляного полотна за счет усиления основной площадки.

УПЖ из подбалластных железобетонных плит. На подходах к мосту через реку Амур у города Хабаровск был устроен УПЖ с подбалластными железобетонными плитами [29], конструкция приведена на рисунке 1.7.

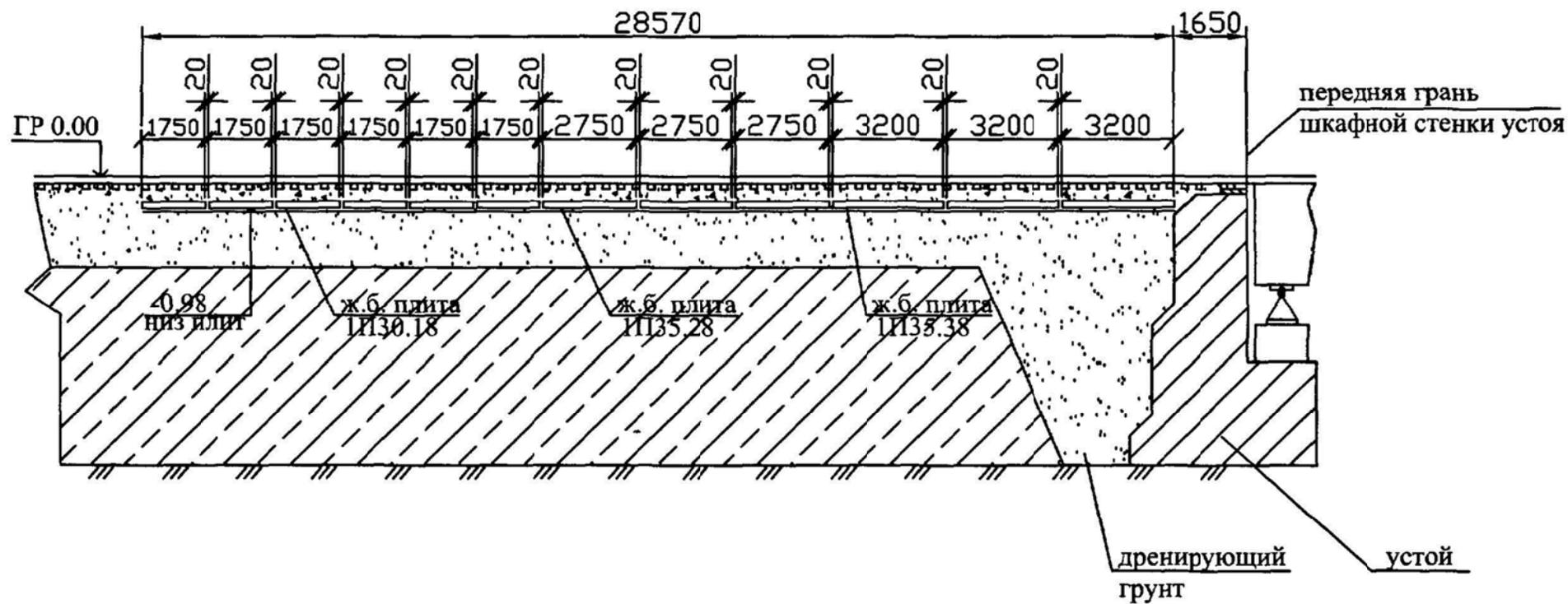


Рисунок 1.7 – УПЖ из подбалластных железобетонных плит (продольный профиль)

Как видно из рисунка 1.7, на основную площадку укладывают железобетонные плиты, которые распределяют поездную нагрузку. Для плавного увеличения жесткости пути применяют плоские железобетонные плиты переменной ширины (в поперечном к оси пути направлении). Набор плит, начиная от задней грани устоя, состоит из комплекта плит трехступенчатого переходного УПЖ. Для исключения боковых деформаций балласта со стороны обочин устанавливают габионы, заполненные сортированным камнем.

Железобетонные плиты, уложенные на основной площадке земляного полотна, обладают достаточно большой изгибной жесткостью, благодаря чему нагрузка на грунт значительно снижается за счет ее распределения на большую площадь, и можно ожидать практически полного исключения остаточных деформаций грунтов насыпи.

В современной научно-технической литературе нет единых требований к выбору конструкции УПЖ из железобетонных плит, уложенных на основную площадку земляного полотна в зависимости от условий эксплуатации пути.

Основным недостатком конструкции УПЖ с подбалластными железобетонными плитами является жесткий контакт между щебнем и плитой, вследствие чего повышается доля остаточных деформаций, вызванных истиранием и дроблением балласта [11].

УПЖ из плоских георешеток. В МИИТе, под руководством Е.С. Ашпиза, разработан вариант переходного участка пути из георешеток [18], основанный на замене грунтов верхней части насыпи на щебень, в котором для исключения боковых деформаций балласта слои щебня армируются георешетками. Конструкция УПЖ с применением георешеток представлена на рисунке 1.8.

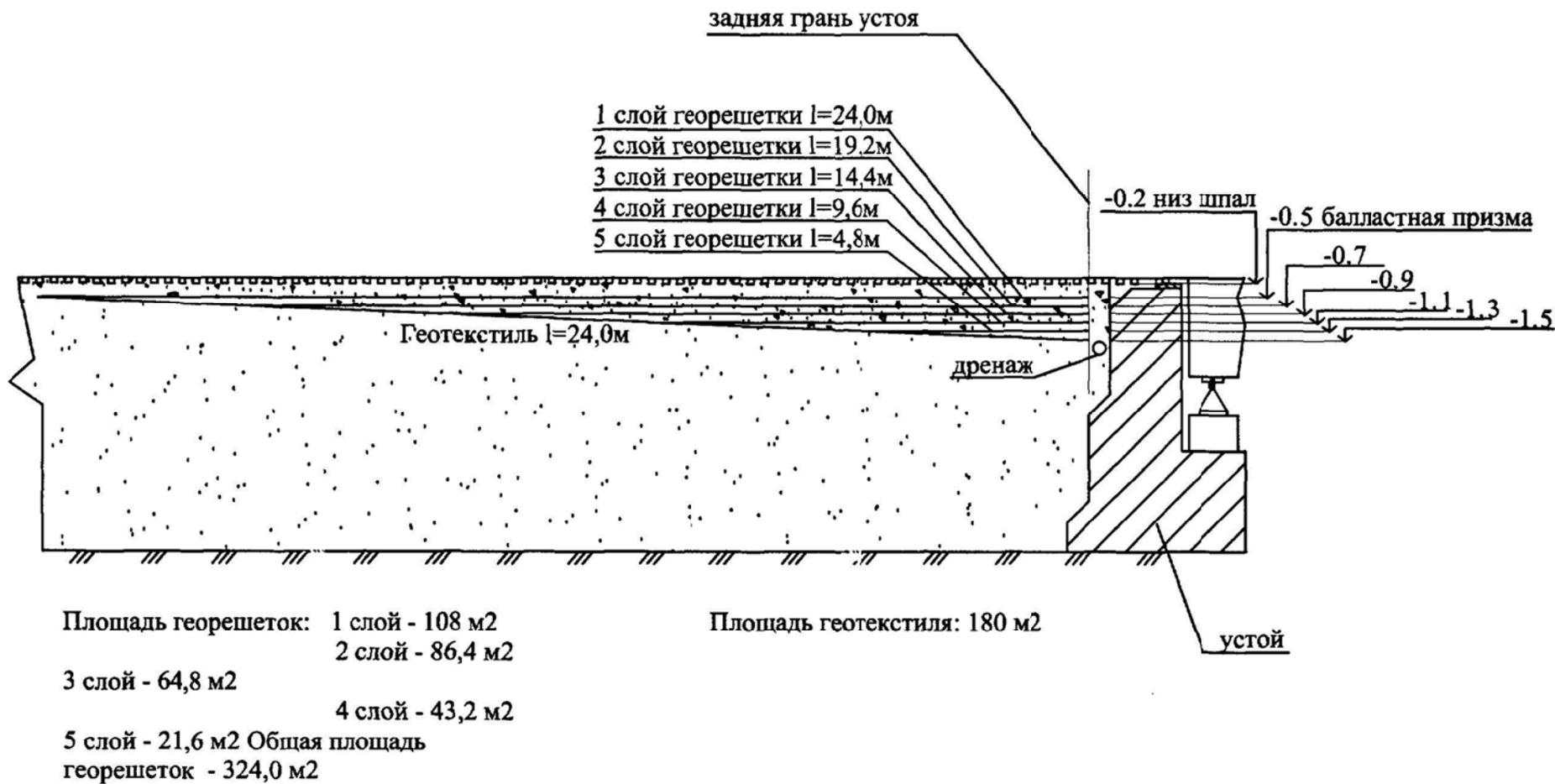


Рисунок 1.8 – УПЖ из плоских георешеток (продольный профиль)

Плавность изменения модуля упругости пути и постепенное снижение деформативности земляного полотна обеспечиваются за счет постепенного увеличения толщины щебня и заклинки его в слоях георешеток. В ранее рассмотренных УПЖ предполагалось снижение деформативности за счет снижения давления на балласт или земляное полотно. При использовании плоских георешеток происходит заклинка частиц щебня, что снижает его деформативность и перераспределяет нагрузки от подвижного состава. Силы, возникающие при заклинивании частиц щебня, представлены на рисунке 1.9 [30].

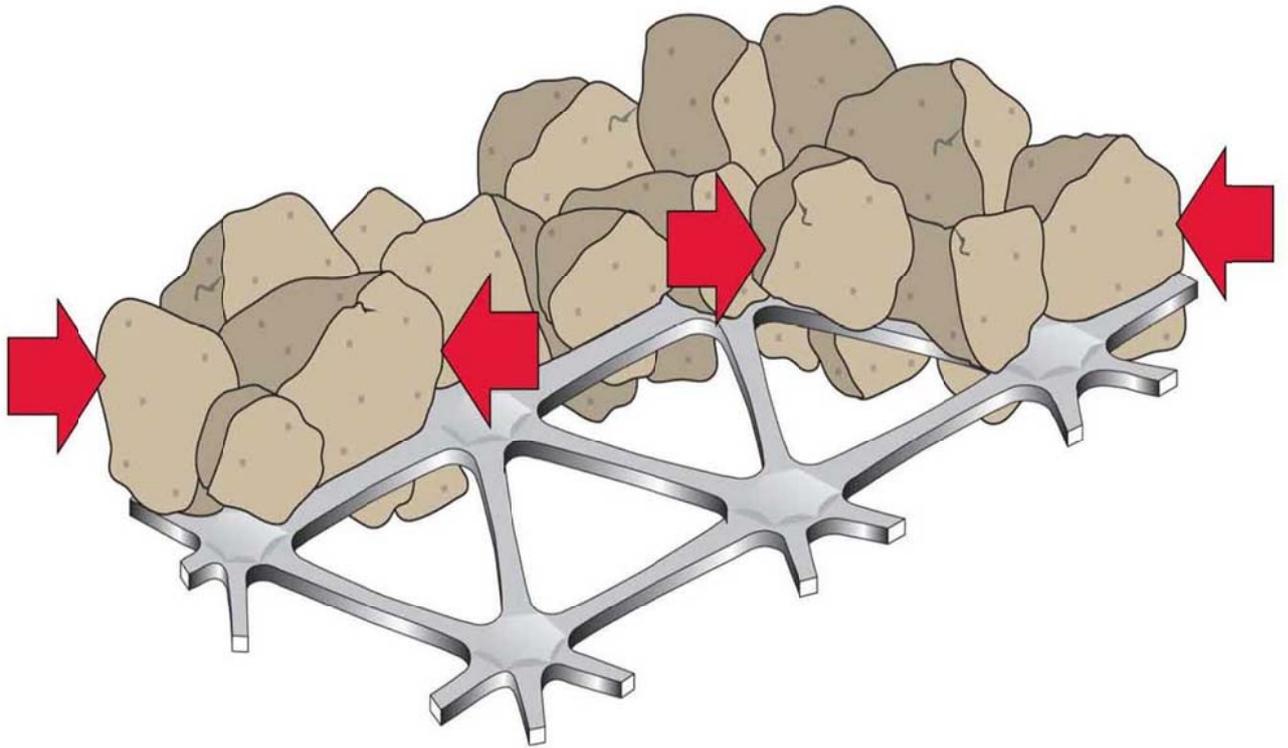


Рисунок 1.9 – Удерживающие силы, возникающие при заклинке частиц щебня

Заклинивание частиц щебня можно разделить на три зоны: зона полной заклинки, переходная зона и несвязанная зона. Общий вид этих зон представлен на рисунке 1.10 [30]. Наиболее прочная – зона полной заклинки, в ней механические характеристики грунта очень близки к породе, из которого был получен щебень. Для увеличения толщины этой зоны необходимо применять несколько георешеток.

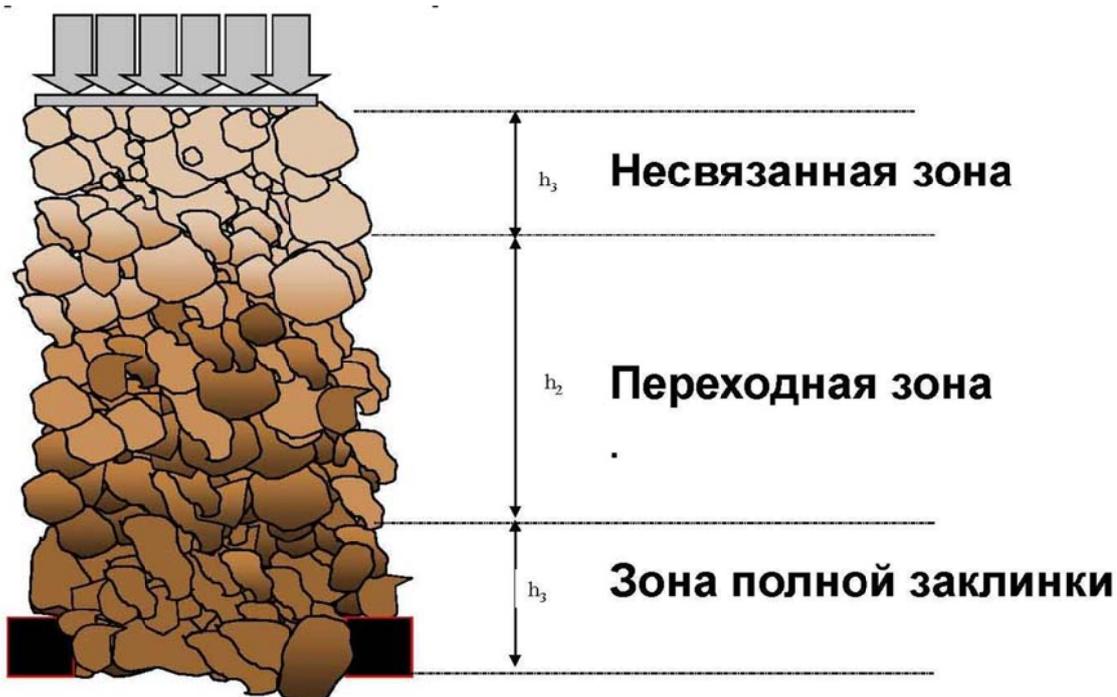


Рисунок 1.10 – Схема заклинивания щебня по высоте

Применение нескольких георешеток приводит к распределению нагрузок на бóльшую площадь, по сравнению с одним слоем. В 2006 году был проведен эксперимент, в ходе которого на слабый илистый грунт были уложены две плоские георешетки и засыпаны прочным грунтом, после чего была приложена нагрузка в 115 т на площадь 4 м². Таким образом, напряжения на поверхности грунта составили 282 кПа, в то же время допустимые напряжения на основную площадку земляного полотна от воздействия поездной нагрузки составляют лишь 80 кПа. Результат эксперимента показал, что основание выдержало такую нагрузку [31]. Схема распределения нагрузок приведена на рисунке 1.11.

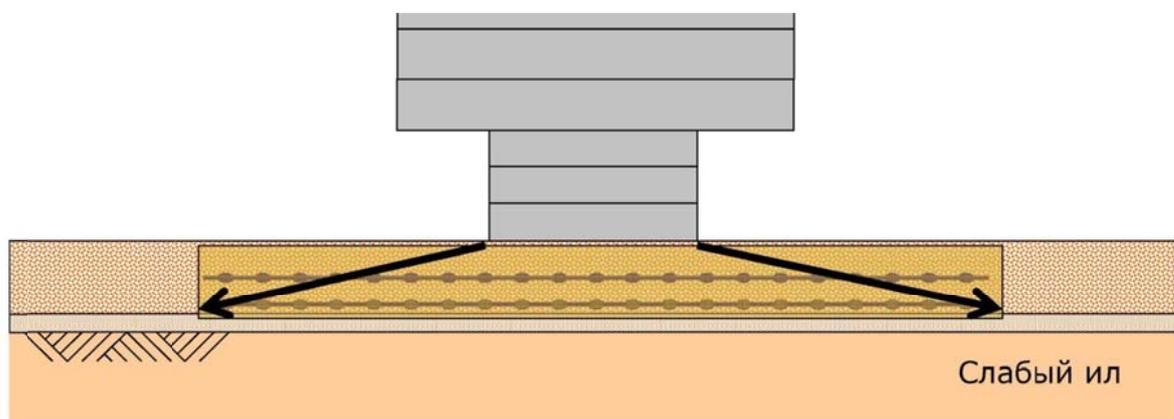


Рисунок 1.11 – Распределение нагрузок при применении двух георешеток

Благодаря указанным механическим свойствам плоских георешеток, УПЖ с их применением позволяет распределить нагрузки от подвижного состава на бóльшую площадь и тем самым значительно повысить стабильность земляного полотна. Технология сооружения подобных конструкций практически не задействует тяжелую строительную технику (автокраны, плитовозы) и не требует устройства стройплощадок вблизи объекта.

С другой стороны, УПЖ с использованием георешеток практически не затрагивает работу другого элемента пути, подверженного накоплению остаточных деформаций, – балластного слоя. При разработке этой конструкции УПЖ исходили из того, что основная причина зарождения и развития предмостовых ям – перепад модуля упругости пути в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО [32]. Таким образом, основная задача такой конструкции – исключить перепад модуля упругости пути. Также при разработке этой конструкции УПЖ не полностью был изучен вопрос о причине зарождения и развития предмостовых ям и факторов, влияющих на интенсивность их развития.

Омоноличивание балластной призмы вяжущим материалом. На железных дорогах Германии проблема сопряжения ВСП традиционной конструкции с безбалластной решается за счет усиления балластной призмы [34]. Такой УПЖ представлен на рисунке 1.12. Усиление балластной призмы происходит за счет ее пропитки вяжущим материалом и применения дополнительных рельсов, увеличивающих жесткость пути. В результате проливки частицы балласта становятся связанными. По мере приближения к безбалластной конструкции пути глубина проливки балластного материала и ее площадь увеличиваются, за счет чего плавно увеличивается жесткость верхнего строения пути и модуль его упругости. Применение дополнительных рельсов призвано снизить деформативность пути традиционной конструкции и повысить модуль его упругости по мере приближения к безбалластному ВСП. Помимо проливки вяжущим материалом для укрепления основной площадки земляного полотна применяются защитные слои из щебеночно-гравийно-песчаной смеси и подбалластные маты. Благодаря этим мероприятиям, происходит перераспределение нагрузок на земляное полотно.

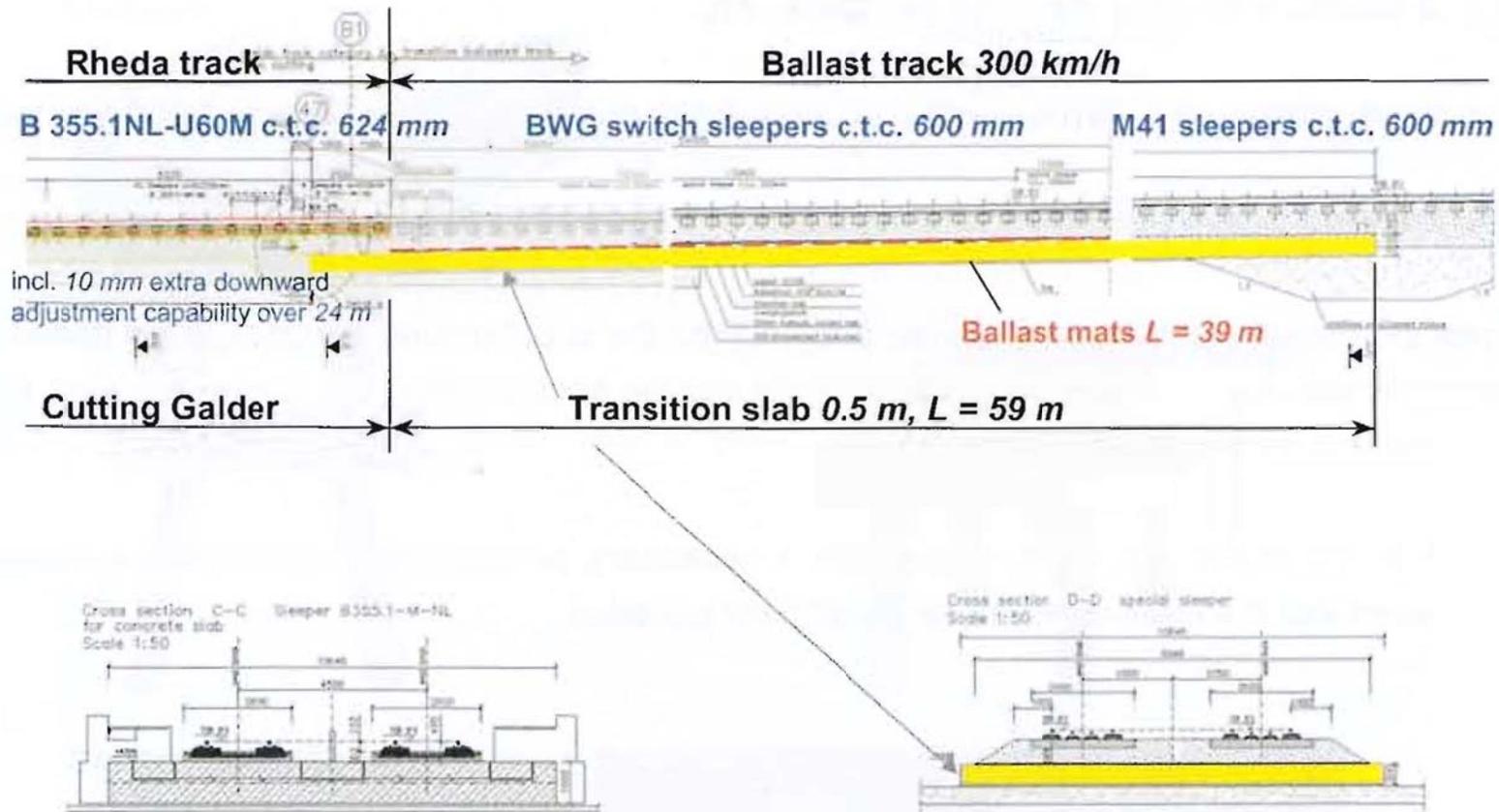


Рисунок 1.12 – УПЖ с типовой конструкции на безбалластную типа Rheda 2000

Проливка балластного слоя вяжущим материалом не требует больших затрат, применения тяжелой строительной техники и, соответственно, площадок для нее, а балластный слой становится намного прочнее. Общий вид безбалластного пути и площадки для сооружения УПЖ представлен на рисунке 1.13 [34]. Как видно из рисунка, устройство такой конструкции можно производить даже в стесненных условиях.

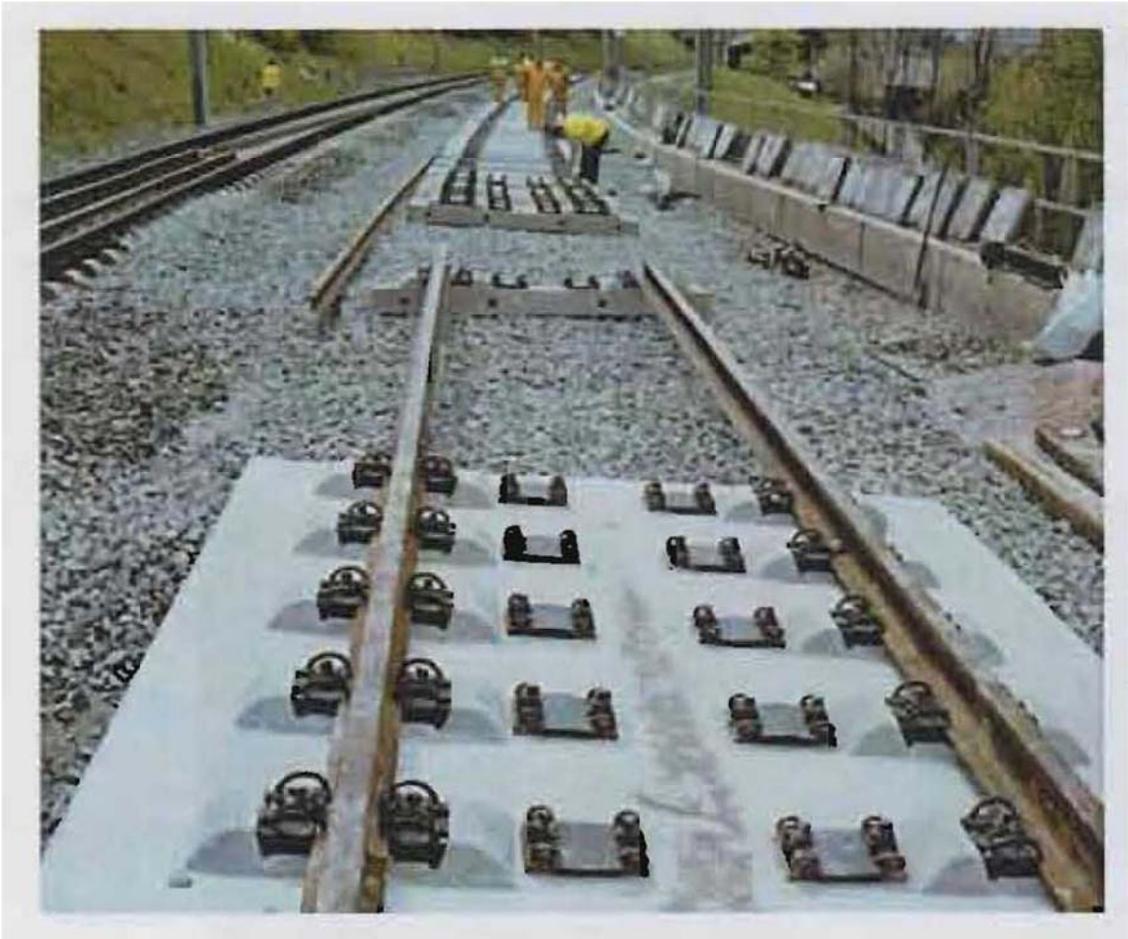


Рисунок 1.13 – Сооружение конструкции УПЖ с проливкой балластной призмы вяжущим материалом

УПЖ, сооружаемые при строительстве высокоскоростных дорог. В зарубежной практике при строительстве новых железных дорог, особенно высокоскоростных, предъявляются особые требования к конструкции земляного полотна на подходах к ИССО. Цель таких мероприятий – практически полностью исключить осадки земляного полотна на подходе. Схематический вид вариантов конструкции земляного полотна на подходах представлен на рисунках 1.14 и 1.15 [35, 36].

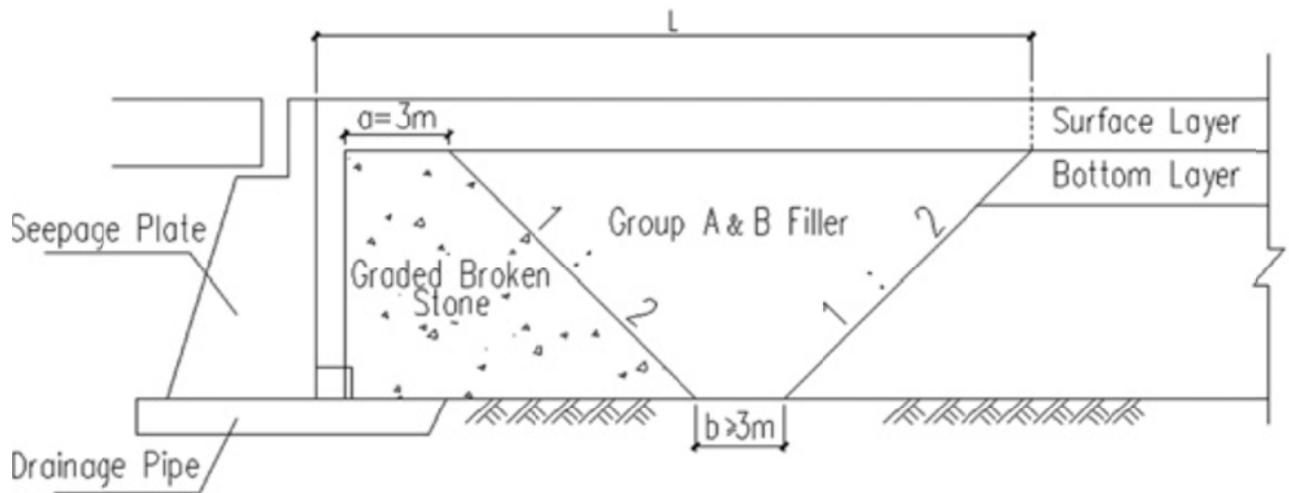


Рисунок 1.14 – Общий вид конструкции пути на подходе к искусственным сооружениям, применяемой на ВСМ Китая (вариант 1)

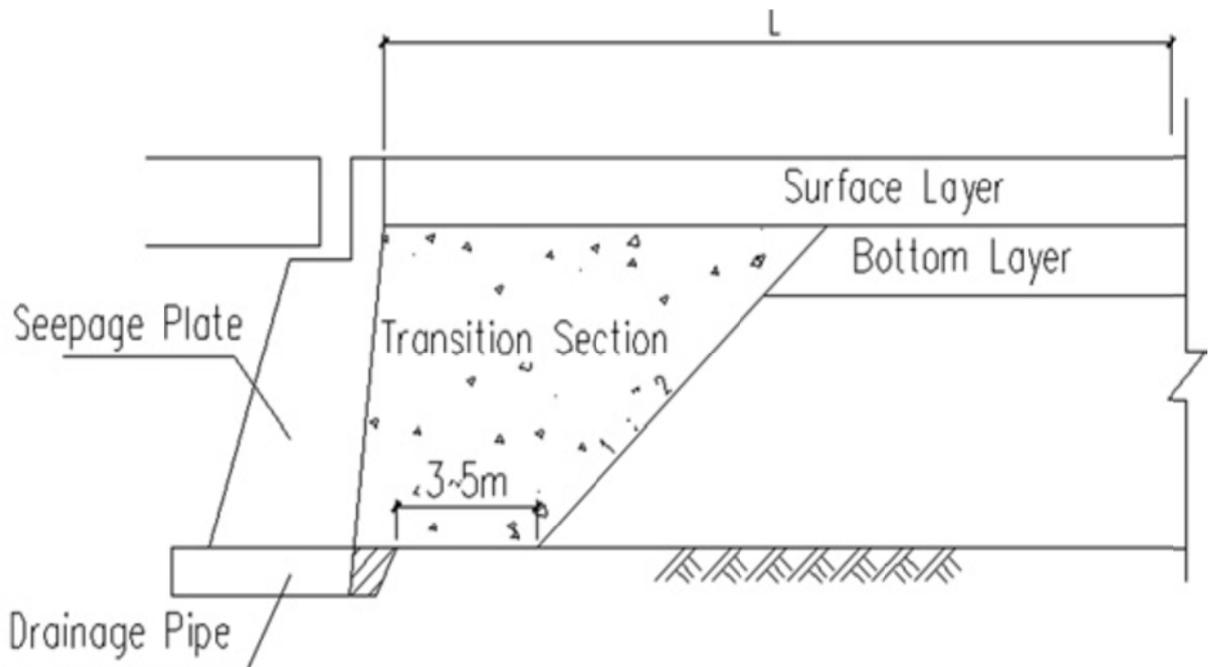


Рисунок 1.15 – Общий вид конструкции пути на подходе к искусственным сооружениям, применяемой на ВСМ Китая (вариант 2)

Сооружение таких участков происходит на этапе строительства и в дальнейшем практически не требуют ремонта и текущего содержания.

1.2.2 Снижение модуля упругости пути на ИССО

В рассмотренных ранее конструкциях УПЖ для исключения перепада модуля упругости пути устраивают увеличение жесткости земляного полотна и/или ВСП, благодаря чему модуль упругости на земляном полотне постепенно повышается до значений на ИССО. Другим, не менее эффективным методом, может быть снижения модуля упругости пути на ИССО до значений на земляном полотне. Сложность данного вопроса заключается в ограниченном количестве элементов верхнего строения пути, в которых можно изменять величину модуля упругости пути.

В МИИТе на кафедре «Путь и путевое хозяйство» была разработана конструкция мостового полотна из плит БМП, в которой реализован принцип снижения модуля упругости на ИССО [19]. Общий вид конструкции представлен на рисунке 1.16.

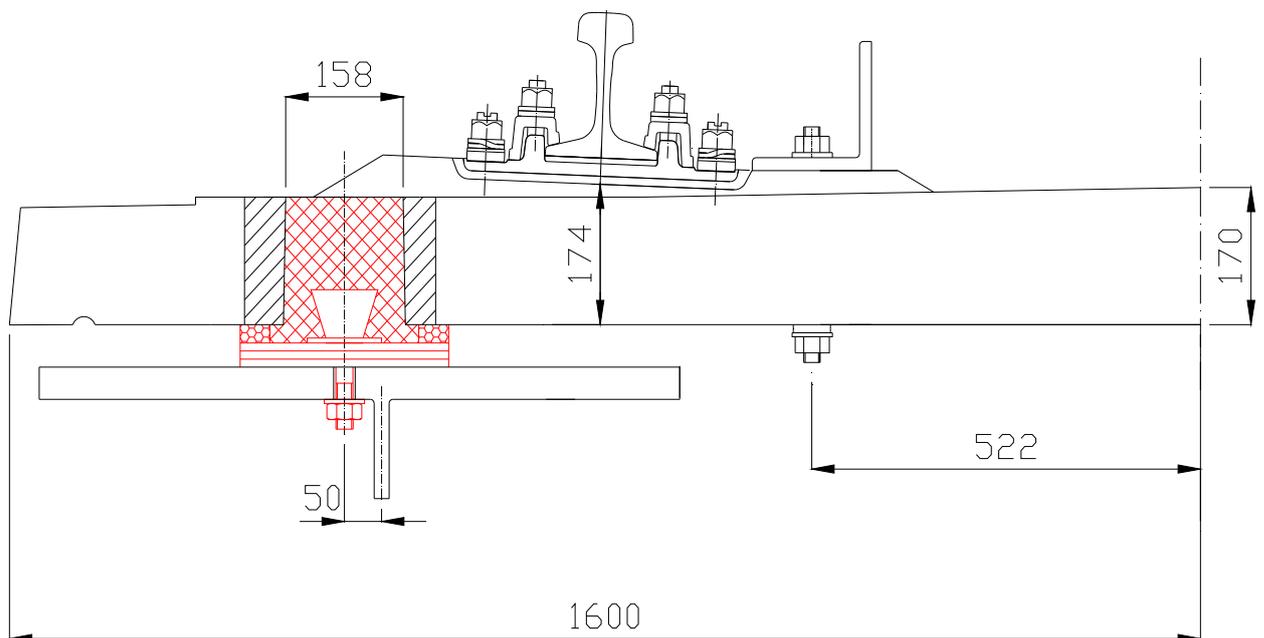


Рисунок 1.16 – Плита БМП с упругим креплением

Конструкция мостового полотна из плит БМП с упругим креплением, представленная на рисунке 1.16, позволяет изменять жесткость пути в больших диапазонах за счет применения различных упругих материалов и их геометрических размеров [19], причем можно добиться снижения модуля упругости пути

на мосту до значений на земляном полотне на подходах. Как показали многочисленные исследования [37, 38], снижение модуля упругости пути ведет к значительному снижению динамических сил, вызванных неровностями пути.

При создании такой конструкции основной целью было исключение перепада модуля упругости пути в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО. Однако не был рассмотрен вопрос об уменьшении осадочности пути на подходах к ИССО. Также не были изучены вопросы о том, какие из условий эксплуатации больше остальных влияют на интенсивность зарождения и развития предмостовых ям.

Подводя итоги сделанного обзора конструкций УПЖ, можно сделать вывод о том, что при их разработке не было уделено должного внимания вопросу о причинах зарождения и развития предмостовых ям, а также тому, какие факторы больше остальных влияют на интенсивность их развития. Таким образом, в современной научно-технической литературе отсутствует общепринятое описание процесса возникновения и развития предмостовых ям, а также не установлено какие из эксплуатационных параметров в большей степени влияют на интенсивность их развития, какая из указанных причин в большей степени определяет появление характерных неровностей на подходах к ИССО.

В рассмотренных отечественных и зарубежных конструкциях УПЖ уделено большое внимание безосадочной работе земляного полотна на подходах к ИССО. При их сооружении можно считать, что земляное полотно на подходах к ИССО будет обладать достаточной прочностью и безосадочностью. Однако в большинстве отечественных УПЖ практически не уделяется внимания работе ВСП, в частности, балластной призме, в которой также развиваются остаточные деформации, и практически никак не усиливается и не снижается нагрузка на нее. Рассмотрим результаты наблюдений работы различных УПЖ, уложенных в нашей стране.

1.3 Анализ опыта работы различных УПЖ, уложенных в нашей стране

За годы эксплуатации различных конструкций УПЖ был накоплен немалый опыт их работы. Рассмотрим, как работают эти конструкции под поездной нагрузкой.

Наблюдение за работой УПЖ из бездонных железобетонных коробов и плоских геосеток. В 2000 и 2005 годах было проведено обследование УПЖ из бездонных железобетонных коробов и плоских геосеток, уложенных на подходах к мостам Октябрьской железной дороги, с целью определения их эффективности [20].

В ходе обследования выполнялись следующие работы:

- нивелирование микропрофиля УПЖ;
- измерение силового профиля УПЖ;
- определение доли элементов ВСП в вертикальном перемещении рельса.
- оценка деформационных свойств подрельсового основания с помощью нагрузочного устройства СМ-460.

Съемка продольного микропрофиля УПЖ производилась нивелировкой обеих рельсовых нитей по головке рельса через 2,5 м. Нивелировка проводилась от постоянного репера, а в случае его отсутствия – от временного. По результатам нивелировки определены разницы статических уклонов смежных участков длиной 2,5 м. Результаты нивелировки участков переменной жесткости показали, что разница уклонов двух соседних элементов длиной 2,5 м достигает:

- на типовом пути – 8,8‰;
- на УПЖ – 4,4‰;
- на устоях – 5,6‰;
- на пролетном строении – 4,8‰.

Определение силового профиля пути на УПЖ производилось измерением вертикального перемещения рельса в шпальном ящике с помощью флексометров, устанавливаемых по одной рельсовой нити через один шпальный ящик. По результатам измерений были построены силовые профили пути. Среднее значение вертикального перемещения рельса, измеренного при помощи флексометров, по всем участкам находится в интервале 1,64÷2,94 мм, минимальное зафиксированное перемещение составило 0,35 мм, а максимальное – 7,3 мм.

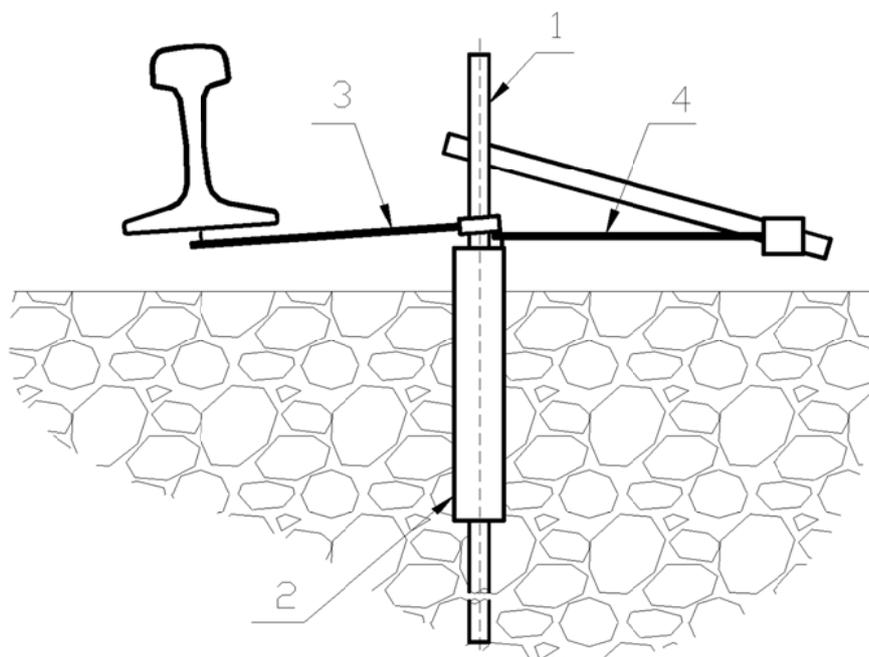
Анализ полученных силовых уклонов показал, что в целом силовые уклоны на УПЖ меньше, чем на типовом пути на подходах. Исключение составляют участки, на которых был уложен звеньевой путь. Среднее значение силового уклона

на УПЖ лежит в пределах от 0,52 до 0,98‰, при этом СКО находится в пределах от 0,32 до 0,74‰. На типовом пути на подходах силовые уклоны имеют больший разброс как по среднему значению (от 0,43 до 1,46‰), так и по СКО (от 0,38 до 1,00‰).

Для определения доли элементов верхнего строения пути в вертикальном перемещении рельса были проведены измерения перемещений элементов ВСП (рельса, шпалы, балласта) от неподвижного репера.

В качестве неподвижного репера применялся штырь длиной 2 м из трубы диаметром 20 мм. Такой репер является условно неподвижным, поскольку он перемещается вместе с рабочей зоной земляного полотна, которая по данным профессора Г.Г. Коншина составляет порядка 2,5 м [39]. Однако эти перемещения незначительны по сравнению с измеряемыми параметрами.

Для определения перемещения верхней части балластной призмы вокруг штыря на глубину $0,5 \div 0,3$ м от верха щебня устанавливался отрезок трубы диаметром 50 мм. На верхнюю часть штыря были закреплены три прогибомера, штоки которых связаны с подошвой рельса, верхней пластью шпалы и торцом отрезка трубы. Схема установки датчиков показана на рисунке 1.17.



1 – штырь; 2 – отрезок обсадной трубы; 3 – прогибомер рельса;
4 – прогибомер балласта

Рисунок 1.17. – Схема установки датчиков в измерительном сечении (прогибомер для шпалы не показан)

Данные, полученные при измерениях доли элементов ВСП в вертикальном перемещении рельса, показывают, что перемещения рельса, как правило, имеют наибольшие значения на устое. Деформации в балласте, измеренные в пределах устоев трёх мостов в 1,5 раза выше, чем на подходах. Величины деформаций земляного полотна (перемещения балласта) в пределах УПЖ изменяются от 0,08 до 0,26 мм, а на прилегающих участках насыпей – от 0,07 до 0,53 мм.

Анализ долей перемещений элементов ВСП показал, что практически все перемещения реализуются в узле скрепления и балластном слое, а доля земляного полотна (перемещение низа балластного слоя) в общем перемещении минимальна.

В таблице 1.1 приведены средние значения прогибов, модулей упругости пути, полученные для характерных элементов на участках переменной жесткости по результатам испытаний нагрузочным комплексом.

Таблица 1.1 – Параметры жесткости на опытных участках

Конструкция УПЖ	Элемент участка	у, мм	U, МПа
	Типовой путь	1,6	32
УПЖ из железобетонных коробов	Начало	1,4	35
	У устоя	1,5	31
УПЖ из плоских геосеток	Начало	1,8	27
	У устоя	1,3	38
	Устой	1,0	54
	Пролет моста	1,9	23

Данные проходов нагрузочных устройств показывают наличие неравножесткости в зоне сопряжения земляного полотна и искусственного сооружения даже при устройстве УПЖ на подходах к мостам. Наибольшие перепады модуля упругости пути наблюдаются при переходе с УПЖ на устой и с устоя на пролетное строение.

Анализ проведенных наблюдений за работой УПЖ на подходах к мостам позволил сделать следующие оценки работы УПЖ из геосеток и бездонных железобетонных коробов:

– продольный микропрофиль пути на участках характеризуется значительной неравномерностью, соседние элементы микропрофиля имеют большие разности уклонов;

– наибольшие остаточные деформации размером до 1,5 мм (по точечным замерам) совпадают с местами наибольших статических уклонов микропрофиля, достигающих 5,6‰ (шаг 2,5 м), и местами наибольших уклонов силового профиля, достигающих 3,5‰ (шаг 1,1 м);

– наиболее тяжелые условия работы балластного слоя возникают на устоях в связи с резким изменением жесткости подбалластного основания. Силовые уклоны достигают 5,6‰. Среднее значение силового уклона на УПЖ лежит в пределах от 0,52 до 0,98‰. На типовом пути на подходах силовые уклоны имеют большой разброс как по среднему значению от 0,43 до 1,46‰, так и по СКО от 0,38 до 1,00‰. На устоях доля деформации, приходящейся на балласт, доходит до 70%.

По результатам нагрузочных испытаний на конструкции переменной жесткости с применением геосеток зафиксировано изменение жесткости по длине участка с уменьшением ее в сторону пути, уложенного на земляном полотне. На варианте конструкции с коробами заметного изменения жесткости по длине участка укладки коробов не отмечается. Наибольшая жесткость пути получена в зоне опорной части пролета и на устое.

Для более детального изучения зоны устоя моста и опорной части пролета, где отмечалась наибольшая жесткость пути, были проведены эксперименты на устое моста через реку Вязьму. Мостовое полотно на пролетном строении было представлено плитами БМП с прокладным слоем из транспортной ленты и древесины, на устое моста уложен бесстыковой путь с рельсами Р65 на железобетонных шпалах. На шкафной стенке устоя был уложен мауэрлатный брус в виде сдвоенных мостовых брусьев со скреплениями Д0. УПЖ отсутствуют.

Эксперимент проводился на двух участках:

- на мауэрлатном бруске с установленной подкладкой скрепления Д0, т.е. при «бытовой» жесткости в данной зоне;
- на мауэрлатном бруске со снятыми подкладками (таким образом, была снижена жесткость пути в зоне опирания пролетного строения).

Эксперимент был приурочен к плановому проходу нагрузочного комплекса СПМ-18, который произвел нагрузочные испытания экспериментального участка. Поскольку подкладка с мауэрлатного бруса снималась только на одном устое, нагрузочный комплекс при прохождении моста записал состояние пути с бытовой и сниженной жесткостью в зоне опирания пролетного строения на устой, разницу между которыми можно увидеть по результатам нагрузочных испытаний, приведенным на рисунке 1.18.

По графикам прохода нагрузочного устройства видно, что в зоне проведения экспериментальных работ со снятыми с мауэрлатного бруса подкладками резкого перепада жесткости пути не возникает, а наоборот, имеется некоторый «провал» даже по сравнению с путем на подходе к мосту. Это объясняется тем, что рельс в данном месте имел большой пролет между соседними опорами – 1 м, за счет исключения из работы мауэрлатного бруса. Модуль упругости пути на рассматриваемом участке характеризуется значениями: на мауэрлатном бруске со снятыми подкладками – 17 МПа, на устой моста – 40 МПа, на пролетном строении – порядка 90 МПа. Однако надо заметить, что на пролетном строении имеется большая неоднородность модуля упругости, и указанное значение модуля принято по графику осреднения вычисления модуля упругости по 25 м. В месте расположения мауэрлатного бруса с установленными подкладками имеется резкий скачок модуля упругости пути, и величина модуля достигает 150 МПа. Такие большие значения модуля возникают из-за того, что в данной зоне жесткость пути формируется лишь сжатием упругих прокладок в узле скрепления.

Послойные составляющие осадки пути
Участок: Москва-Смоленск Перегон: Семлево-Вязьма Путь: 2 14.08.2012

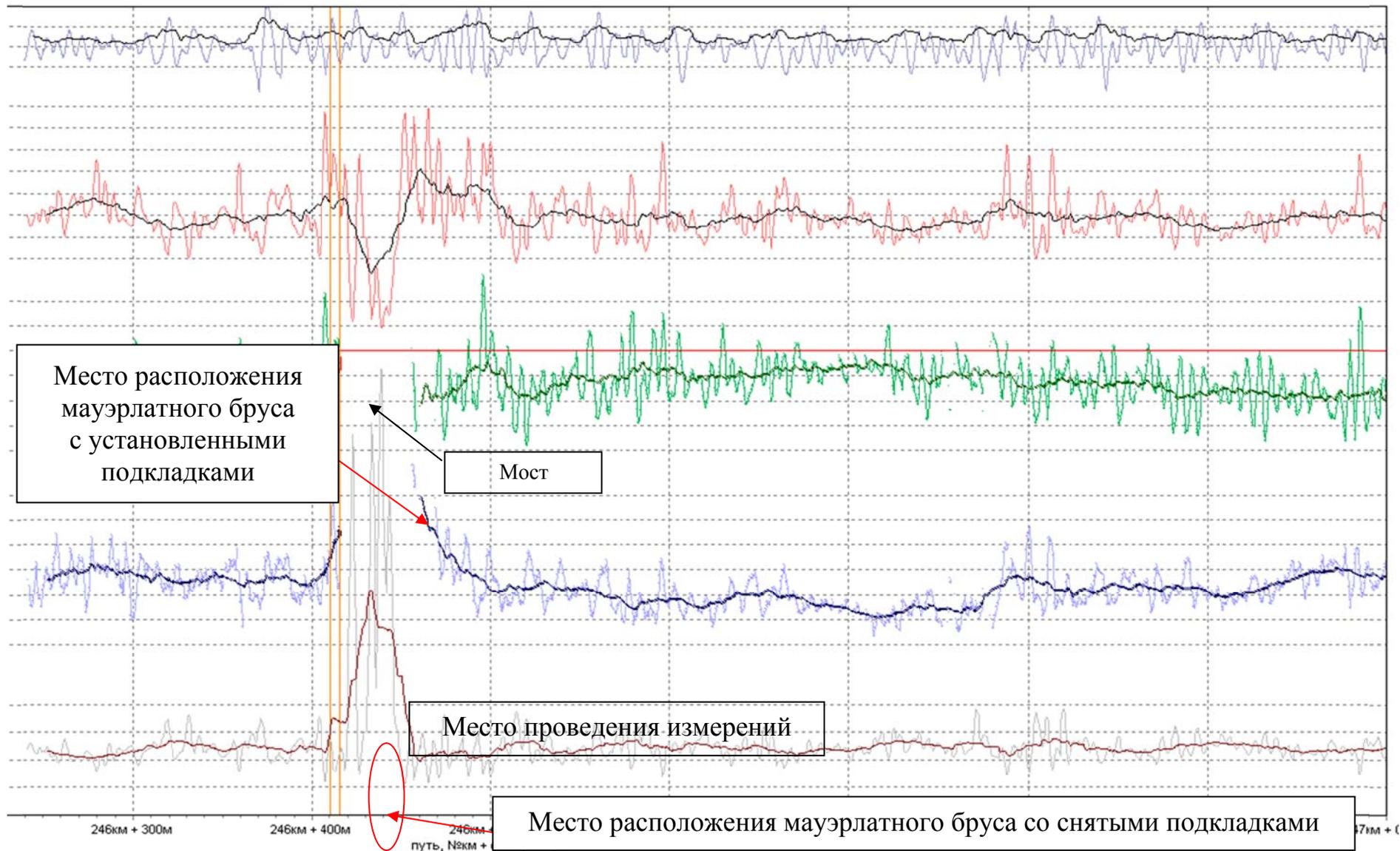


Рисунок 1.18 – Графики прохода нагрузочного устройства по экспериментальному участку

Также специалистами кафедры с участием автора были проведены эксперименты на опытном участке безбалластного пути конструкции Rheda 2000 и УПЖ к нему, уложенного на Октябрьской железной дороге на 46 км перегона Саблино – Тосно [11]. В ходе экспериментальных работ были определены перемещения крайней шпалы пути традиционной конструкции относительно условно неподвижной плиты под поездной нагрузкой.

Результаты измерений показали, что перемещения шпалы в омоноличенной балластной призме лежат в диапазоне $1,24 \div 1,91$ мм под нагрузкой от электропоезда ЭТ2М с осевой нагрузкой $12,78 \div 17,38$ т. В то же время, упругие прогибы рельса на самой плите, под такой же нагрузкой, лежат в пределах от 0,4 до 1,1 мм. Инструкция по оценке деформативности пути нагрузочным поездом [40] допускает осадку шпалы под подобным комплексом 1,1 мм после ремонта для групп пути А, Б. Измеренные перемещения первой шпалы относительно плиты и рельса относительно плиты говорят о том, что под шпалой имеется значительный люфт.

Как отмечалось выше, перемещения рельса, в основном, реализуются за счет узлов промежуточных скреплений и балластного слоя. Поскольку на опытном участке балластная призма была пролита вяжущим материалом [41] и фактически омоноличена, доля ее деформации в общей деформации пути незначительна.

Следует отметить, что эксперименты на указанном участке пути проводились спустя 10 месяцев после открытия движения по нему, а поездная нагрузка была представлена преимущественно пригородными и пассажирскими поездами. Однако, даже при такой малой наработке эффективность омоноличивания балластной призмы уже была снижена. Следует ожидать, что при увеличении грузонапряженности и осевых нагрузок величины деформаций пути будут только увеличиваться.

Проведенный анализ работы различных конструкций УПЖ показывает, что достичь полного исключения перепада модуля упругости пути не удастся, а при их эксплуатации возникают различные неровности. Полученные результаты говорят о необходимости дальнейшего совершенствования конструкции УПЖ.

1.4 Существующие критерии оценки зоны сопряжения, цель настоящей работы и определение методов исследования

При разработке конструкций УПЖ в качестве эталонных или нормативных параметров допускаемого перепада жесткости пути были приняты параметры пути перехода с деревянных шпал на железобетонные [4]. Данные нормативы неравножесткости были приняты исходя из того, что *«многолетний опыт эксплуатации подобных участков не выявил возникновение характерных неровностей при сопряжении различного типа шпал»*. Эти нормативы приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Допускаемые параметры неравножесткости по С.И. Клинову [4]

Характеристики пути в зоне перехода				Абсолютные величины параметров		
Рельсы	Шпалы	Скрепления	Балласт	$i_y, ‰$	$\Delta i_y, ‰$	$\Delta Q, \text{кН}$
Р 65 сварные плети	Ж.б. (ШС-1у)	КБ-65	Щебень 30÷25 см, песок 20 см	0,54	0,20	12
	Деревянные	ДО				

Однако, зона сопряжения ИССО и земляного полотна существенно отличается от зоны сопряжения пути на деревянных и железобетонных шпалах прежде всего тем, что в зоне перехода от одной конструкции нижнего строения к другой имеется существенно больший перепад жесткости пути, чем при переходе с одного типа шпал на другой, а путь на искусственном сооружении практически не накапливает остаточных деформаций в отличие от пути на земляном полотне и балласте.

Также указанные нормативы не учитывают абсолютную величину силового воздействия на путь в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО, а лишь ограничивают силовые неровности пути и перепад сил, действующих на опоры. Кроме того, указанные «эталонные» значения допускаемого перепада жесткости пути не в полной мере учитывают все многообразие эксплуатационных условий, которые в настоящий момент существуют на отечественных железных дорогах.

Следует отметить опыт д-ра техн. наук О.П. Ершкова [42], под руководством которого во ВНИИЖТ решалась задача о нормировании неравножесткости обычного пути. В этой работе приводится попытка нормирования неравножесткости пути исходя из разности давлений на балласт. Необходимость нормирования неравножесткости пути в работе диктуется многоопорностью железнодорожного пути, при которой не удается достичь одинаковых параметров пути на всем его протяжении, даже при использовании блочного подрельсового основания. Полученные в работе нормы неравножесткости пути самим автором называются «временными» и требующими дальнейшего уточнения на эксплуатируемом пути. Сами нормы несколько мягче, чем предложенные С.И. Клиновым

В приведенных работах приводятся попытки нормирования величины перепада модуля упругости пути, а вопросы о влиянии параметров эксплуатации – скорости движения и осевых нагрузок не получили должного рассмотрения. Помимо этого в отечественной нормативной литературе по устройству УПЖ нет обоснованных критериев по выбору их длины. Это говорит о том, что устраиваемые переходные участки не всегда могут полностью удовлетворять условиям эксплуатации конкретного участка пути, таким как максимальные скорости движения, нагрузки на ось и тип подвижного состава. Критерии, по которым оценивается необходимость устройства УПЖ, учитывают только динамические уклоны пути и разность давлений на смежные опоры. Данные критерии характеризуют некоторые динамические качества участка перехода, однако четкого понимания о том, какой перепад модуля упругости пути при сопряжении различных конструкций пути допустим, в настоящее время нет.

При эксплуатации пути в зоне сопряжения воспользоваться практически этими критериями не представляется возможным, поскольку для измерения сил, действующих на опору, динамических уклонов в таком узком месте, потребуется сложная высокоточная аппаратура и высококвалифицированные специалисты, способные корректно ею пользоваться.

Как показал обзор, приведенный в параграфе 1.3, для устранения характерных неровностей пути на подходах к ИССО необходимо дальнейшее совершенствование

конструкций УПЖ для полного предотвращения появления предмостовых ям. В параграфе 1.2 было показано, что при устройстве УПЖ можно добиться достаточной прочности земляного полотна и его практически безосадочной работы на подходах к ИССО. В [32] показано, что при достаточно уплотненной насыпи остаточные деформации пути на 90 % формируются за счет балласта, а конструкции УПЖ мало влияют на его работу. Следовательно, необходимо рассмотреть работу балластного слоя на подходах к ИССО для дальнейшего совершенствования конструкции пути на подходах.

Исходя из вышесказанного, цель диссертационной работы заключается в разработке и обосновании рекомендаций и мероприятий по повышению стабильности пути в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО.

Одним из шагов, которые необходимо сделать для повышения стабильности пути в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО является определение причин зарождения и развития характерных неровностей на подходах к ИССО, влияние на этот процесс тех или иных факторов, т.е. раскрыть генезис появления предмостовых ям.

Рассмотрим, какими методами исследований можно достичь указанной цели.

Эмпирический метод исследования предполагает постоянные наблюдения за работой эксплуатируемых объектов одинаковой или близкой конструкции при различных условиях эксплуатации. При применении этого метода необходимо определить четкий алгоритм проведения наблюдений. При этом необходимо составить методику наблюдений, в которой должны быть отражены следующие вопросы:

– параметры пути, которые будут наблюдаться (величина остаточной деформации, напряжения в элементах верхнего строения, величины модуля упругости пути);

– условия проведения наблюдения (осевые нагрузки, скорости движения, величины модуля упругости пути, состояние земляного полотна на подходах к ИССО и т.п.);

– технические средства выполнения и фиксации наблюдений.

Наблюдения за работой пути в зоне сопряжения должны отражать достаточно длительный период его работы, чтобы определить, как из исправного состояния, например, после капитального ремонта, он приходит в состояние, когда необходимо выполнять ремонтные работы.

В настоящее время не представляется возможным найти участки сопряжения с одинаковыми характеристиками конструкции пути и разными условиями эксплуатации. Например, для исследования поведения зоны сопряжения при воздействии подвижного состава с осевыми нагрузками 27 т необходимо регулярное обращение таких поездов. Однако в нашей стране такие осевые нагрузки только вводятся, и на линиях осуществляется движение поездов с различными осевыми нагрузками и скоростями движения. Так, на полигоне Ковдор – Мурманск доля поездов с осевыми нагрузками до 27 т не превышала 6% [43]. Соответственно, даже при регулярных наблюдениях выявить точное влияние высоких осевых нагрузок не представляется возможным. Также не представляется возможным достаточно точно выявить влияние скорости движения, поскольку на разных участках пути установлены различные скорости движения, а скоростной режим не всегда выдерживается. По разным участкам прошла разная поездная нагрузка, что в свою очередь существенно осложняет оценку результатов их работы с учетом их фактического состояния. При этом время исследований будет достаточно продолжительным, Например, если необходимо провести наблюдение за поведением зоны сопряжения во время пропуска по ней 150 млн. т. бр., потребуется три года при грузонапряженности 50 млн. т бр., и 7,5 лет при грузонапряженности 20 млн. т бр.

Метод физического моделирования заключается в создании уменьшенной модели исследуемой системы, например, земляного полотна, приложении к ней соответствующих нагрузок и наблюдением за ее работой. Метод позволяет задавать определенные нагрузки на объект исследования и моделировать различные конструкции. Подобный метод хорошо зарекомендовал себя при испытаниях различных конструкций земляного полотна на установке центробежного моделирования в Путьиспытательной лаборатории кафедры «Путь и путевое хозяйство» МИИТа [44].

Метод физического моделирования требует точного воспроизведения условий работы системы и соответствия уменьшенной модели реальной системе, а также адекватного масштабирования всех нагрузок, действующих на исследуемую систему. В рамках настоящего исследования метод физического моделирования неприменим, т.к. необходимо моделировать проход подвижного состава по длине, что требует точного воспроизведения ходовых частей экипажа с установленными скоростями. Также не представляется возможным воссоздать адекватные жесткостные параметры модели, которые отражали бы реальную работу системы.

Метод математического моделирования заключается в создании математической модели исследуемой системы, всё исследование проходит без длительных наблюдений за её работой, при этом этот метод позволяет задавать любые условия эксплуатации, тем самым выявить влияние тех или иных параметров (условий эксплуатации, особенностей конструкции) на работу всей системы.

С другой стороны, математическая модель должна быть проверена на адекватность ее расчетных данных, в противном случае результаты моделирования могут не соответствовать реальной работе системы.

Исходя из краткого анализа методов исследования, можно констатировать, что наиболее подходящим для выполнения цели исследования является метод математического моделирования. Для его использования необходимо провести анализ существующих математических моделей, характеризующих работу пути в зоне сопряжения с целью выбора удовлетворяющей цели исследования и провести проверку ее адекватности.

1.5 Выводы по главе 1

На основе вышеизложенного обзора можно сделать следующие выводы:

1. Места сопряжения земляного полотна и ИССО становятся барьерными при повышении скоростей движения и осевых нагрузок. Необходимо устройство специальных переходных конструкций пути для повышения стабильности пути в указанной зоне.

2. В нашей стране и за рубежом разработан ряд УПЖ различных конструкций, однако они не позволяют полностью исключить перепад модуля упругости пути и обеспечить стабильность пути на подходах к ИССО и требуют дальнейшего совершенствования.

3. В настоящее время нет подробного и обоснованного описания генезиса развития предмостовых ям.

4. Для дальнейшего совершенствования конструкций УПЖ необходимо определить факторы, влияющие на интенсивность развития остаточных деформаций на подходах к ИССО, разработать критерий определения длины переходных участков.

Цель работы заключается в разработке рекомендаций и мероприятий по повышению стабильности пути в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Анализ существующих математических моделей, характеризующих взаимодействие пути и подвижного состава в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО.

2. Выполнить экспериментальную проверку адекватности выбранной математической модели.

3. На основе выбранной модели определить причины возникновения и развития остаточных деформаций на въезде и съезде с ИССО, определить эксплуатационные параметры, которые в наибольшей степени влияют на величину остаточных деформаций и интенсивность их накопления.

4. Разработать рекомендации по совершенствованию конструкции УПЖ в зависимости от условий эксплуатации пути

5. Провести оценку эффективности предлагаемых решений.

2 ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУТИ И ПОДВИЖНОГО СОСТАВА В ЗОНЕ СОПРЯЖЕНИЯ

2.1 Анализ существующих математических моделей взаимодействия пути и подвижного состава в зоне сопряжения

За годы исследований вопроса сопряжения конструкций пути, уложенных на земляном полотне и ИССО, был разработан ряд математических моделей, описывающих взаимодействие пути и подвижного состава при перепаде модуля упругости пути. Рассмотрим модели, получившие наибольшее распространение, с целью выбора подходящей.

Математическая модель должна отвечать следующим требованиям:

- определять напряженно-деформированное состояние железнодорожного пути в зоне сопряжения, где имеется перепад модуля упругости пути, при взаимодействии пути и подвижного состава;
- определять динамические добавки сил, действующих на путь;
- прогнозировать остаточные деформации пути.

Динамическая модель пути переменной жесткости. С.И. Клиновым была разработана динамическая модель [4] пути переменной жесткости, которая позволяла учитывать изменение вертикальной силы, действующей на путь, при переменном модуле упругости подрельсового основания.

Расчетная схема, представлена на рисунке 2.1. В математической модели предполагается, что рельс представляет собой балку, описываемую уравнением Эйлера – Бернулли [45, 46], лежащую на упругом основании с переменным модулем упругости подрельсового основания, меняющемся по ступенчатому закону. На балку действует подвижная нагрузка в виде постоянной силы с гармонической добавкой, имеющей частоту ω_0 :

$$q(x, t) = P\delta(X - Vt)(1 + \gamma e^{i\omega_0 t}) , \quad (2.1)$$

где $\delta(X - Vt)$ – дельта функции Дирака;

V – скорость движения нагрузки;

γ – доля динамической составляющей силы от статической (здесь и далее обозначения приняты согласно источнику).

Упругая характеристика основания принята в виде:

$$U(x) = U_1 \left[1 + \sum_{i=1}^m \alpha_i \theta(x - l_i) \right], \quad (2.2)$$

где U_1 – модуль упругости подрельсового основания первого участка;

$\alpha_i = \frac{U_1}{U_2}$ – отношение модуля упругости i -го участка к первому;

$\theta(x - l_i)$ – функция единичного скачка (функция Хевисайда):

$$\theta(x - l_i) = \begin{cases} 0, & x \leq l_i \\ 1, & x > l_i \end{cases}$$

l_i – значение координаты, в которой происходит скачкообразное изменение модуля упругости;

m – число координат, в которых происходит указанное скачкообразное изменение модуля.

Дифференциальное уравнение колебаний рельса принято в следующем виде:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho F \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + U_1 \left[1 + \sum_{i=1}^m \alpha_i \theta(x - l_i) \right] y = P \delta(x - Vt) [1 + \gamma^{i \omega_0 t}], \quad (2.3)$$

где y – вертикальные перемещения рельса при вынужденных колебаниях;

EI – изгибная жесткость рельса;

ρF – погонная масса.

В расчетах рельс принимается балкой конечной, но достаточно большой длины z . Граничные условия приняты в виде шарнирного закрепления. При больших значениях l_i граничные условия не оказывают влияния на прогиб y , начиная с некоторого расстояния от опор.

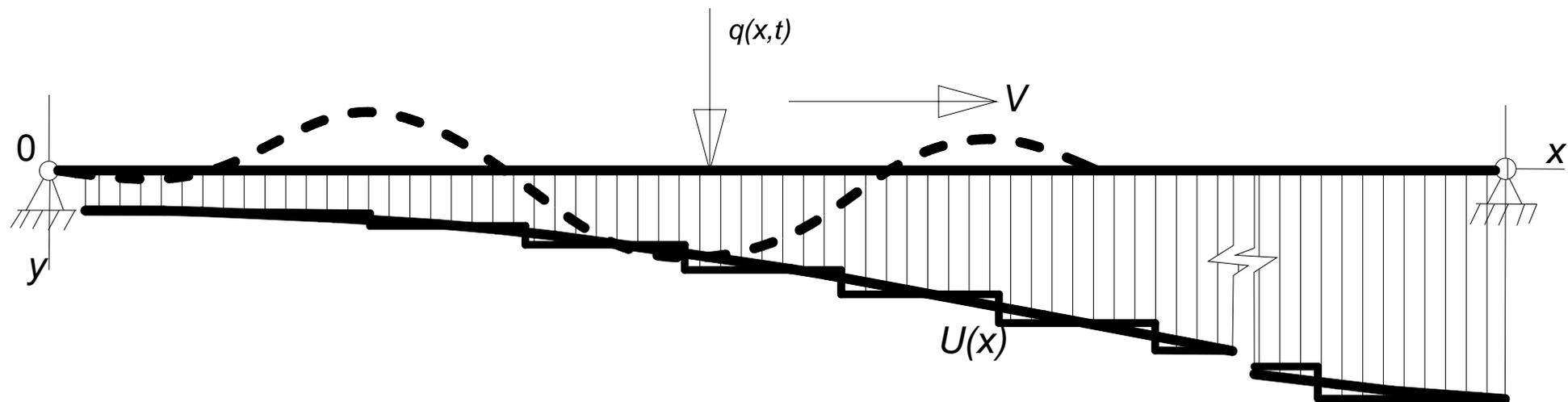


Рисунок 2.1 – Расчетная схема динамической модели переходного пути

Для решения задачи был использован метод, применявшийся в классических работах С.П. Тимошенко для рельса, лежащего на упругом основании с постоянным модулем упругости [45,47].

Уравнение прогибов представлено в виде

$$y = (\xi, \tau) = \sum_{n=1}^N f_n(\tau) \sin \frac{\pi n \xi}{S_0}, \quad (2.4)$$

где $f_n(\tau)$ – функция времени, соответствующая некоторому конечному числу степеней свободы.

Составлено N уравнений Лагранжа II рода, соответствующих этим N обобщенным координатам.

Потенциальная энергия рельса в безразмерных координатах определяется по формуле

$$\Pi_1 = \frac{EI}{2} \int_0^z \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right)^2 dx = \frac{EI \pi^4 \alpha^3}{4S^3} \sum_{n=1}^N f_n^2 \pi^4 = \frac{\Delta S_0}{4\alpha} \sum_{n=1}^N f_n \left(\frac{\pi n}{S_0} \right)^2 \quad (2.5)$$

Энергия деформации основания определяется по формуле

$$\Pi_2 = \int_0^z \frac{U(x) y^2}{2} dx \quad (2.6)$$

Кинетическая энергия рельса (аналогично [45]) определяется по формуле

$$T = \frac{\rho F \cdot \beta^2 S_0}{4\alpha} \sum_{n=1}^N \dot{f}_n^2 = \frac{\Delta S_0}{4\alpha} \sum_{n=1}^N \dot{f}_n^2, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{f}_n} \right) = \frac{\Delta S_0}{2\alpha} \cdot \ddot{f}_n \quad (2.7)$$

После преобразований (2.7), деления всех его членов на коэффициент при старшей производной в матричной форме становится следующим:

$$\frac{d}{d\tau^2} \{ F \} + \left\{ \frac{\pi^4}{S_0^4} / N + / C \right\} \overline{IF} = \frac{\alpha^2 \gamma}{\Delta^2 S_0} / P \quad (2.8)$$

Данная система уравнений решается при помощи разработанной программы по следующей схеме, с последовательной организацией:

1. Приведение переменных к безразмерному виду.
2. Расчет матриц $/N$ и $/C$.
3. Расчет в цикле коэффициентов A_n и B_n при фиксированном ω_1 .

4. Расчет прогибов рельса y , мм, под движущейся постоянной или гармонической силой как суперпозиция найденных частных решений.

Среди преимуществ этой модели следует отметить следующие достоинства:

– возможность задания различных параметров жесткости пути по амплитуде и протяженности;

– расчет динамических процессов взаимодействия пути и подвижного состава при прохождении им участка с перепадом модуля упругости пути и, таким образом, возможность определить динамические силы, действующие на путь, и напряжения в элементах ВСП.

Среди недостатков этой модели следует отметить, что данная модель не позволяет учитывать люфты под шпалами в зоне неравножесткости, а также не позволяет делать прогноз накопления остаточных деформаций пути при многократном пропуске поездной нагрузки.

Модель «мост – путь – экипаж». В работе [48] В.Ю. Поляковым была разработана модель «мост – путь – экипаж» (МПЭ), которая позволяет определять совместные колебания пути, подвижного состава и пролетных строений при пропуске поездной нагрузки. Данная модель была разработана с целью оптимизации жесткости пролетных строений мостов и параметров взаимодействия пути и подвижного состава на пролетных строениях при высокоскоростном движении. Таковую оптимизацию позволила выполнить однотипность нагрузки подвижного состава и небольшой диапазон изменения скоростей его движения.

В зависимости от постановки задачи оптимизации были сделаны несколько моделей различной степени детализации. Так, для исследования чувствительности системы МПЭ к вариациям проектных параметров разработана подробная модель исследования продольных и поперечных колебаний рельса в составе МПЭ с учетом начальной кривизны рельса и продольных усилий. Расчетная схема модели МПЭ представлена на рисунке 2.2.

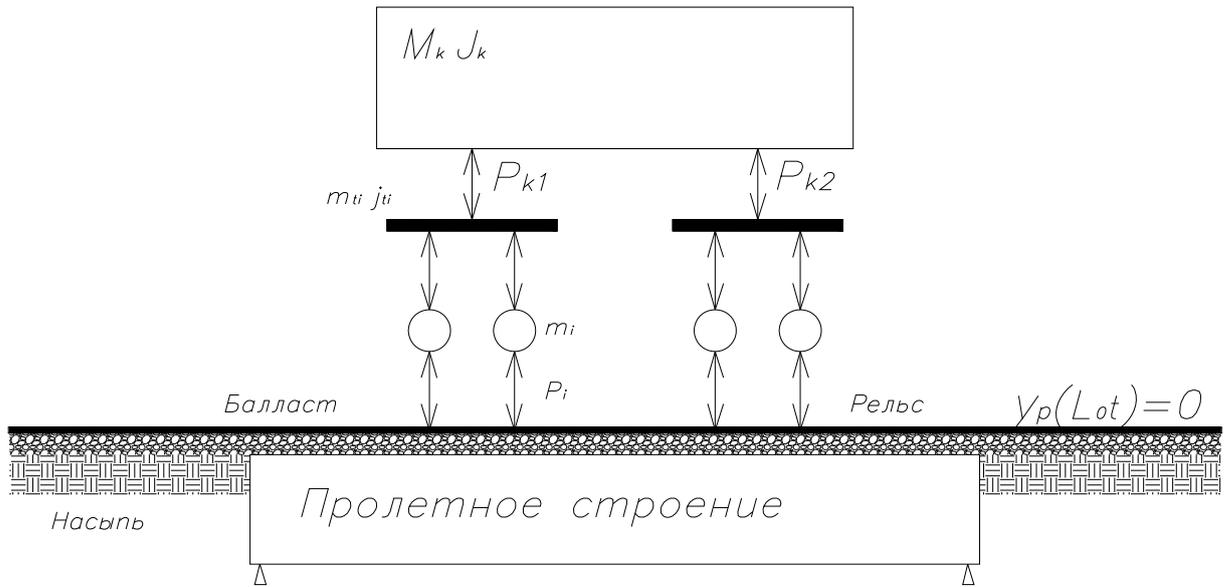


Рисунок 2.2 – Расчетная схема модели МПЭ

Колебания системы описаны следующими уравнениями:

– k -го балочного пролетного строения из N пролетов

$$E_b I_0 \frac{\partial^2}{\partial x_k^2} \left(\alpha^4(x_k) \frac{\partial^2 y_k}{\partial x_k^2} \right) + \alpha^2(x_k) \rho F_0 \frac{\partial^2 y_k}{\partial t^2} + c \frac{\partial y_k}{\partial t} = c_p \left(\frac{\partial y_p}{\partial t} - \frac{\partial y_\Delta}{\partial t} \right) + \gamma(x) \delta(x) S'(y_p - y_0) ;$$

– верхнего строения пути

$$E_p I_p \frac{\partial^4 y_p}{\partial x^4} + E_p I_k \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\alpha_k^4(x) \frac{\partial^2 y_p}{\partial x^2} \right) + (k_b \delta(x) \rho_p F_p + \rho_p F_k \alpha_k^2(x)) \frac{\partial^2 y_p}{\partial t^2} +$$

$$+ C_p \left(\frac{\partial y_p}{\partial t} - \frac{\partial y_b}{\partial t} \right) + \gamma(x) \delta(x) S'(y_p - y_b) = P(x, t)$$

– экипажа (кузова и тележки):

тележки

$$m_T \frac{d^2 y_{T,\omega}}{dt^2} = P_{T,2\omega} + P_{T,2\omega-1} - P_{k,\omega} - m_T g$$

$$I_T \frac{d^2 \varphi_{T,\omega}}{dt^2} = 0,51_T (P_{T,2\omega-1} - P_{T,2\omega}) \omega = 2x - \nu ;$$

кузова

$$m_k \frac{d^2 y_k}{dt^2} = P_{k,2x} + P_{k,2x-1} - m_k g$$

$$I_k \frac{d^2 \varphi_{k,x}}{dt^2} = 0,51_k (P_{k,2x-1} - P_{k,2x}) ,$$

где m – число экипажей;

P – усилия в рессорных комплектах центрального буксового узла подвески;

$P(x, t)$ – вертикальное усилие между колесом и рельсом;

– подсистема «колесо – рельс»

$$P_i = m_i \left(V^2 \frac{\partial^2 y_{p,i}}{\partial x^2} + 2V \frac{\partial^2 y_{p,i}}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 y_{p,i}}{\partial t^2} + g \right) + P_{T,i},$$

где P_i – вертикальное усилие в контакте i -го колеса и рельса;

y_p – функция вертикального перемещения рельса $y_p(x, t)$ и значения частных производных этой функции в точке контакта i -го колеса и рельса;

m_i – масса i -го колеса;

g – ускорение свободного падения.

Достоинство рассматриваемой модели заключается в возможности учета совместных колебаний пути, подвижного состава и пролетных строений, что позволяет определять влияние изменения одного входного элемента на всю систему в целом.

К недостаткам этой модели, с точки зрения рассматриваемых критериев, следует отнести невозможность прогнозирования накопления остаточных деформаций и люфтов под шпалами.

На кафедре «Путь и путевое хозяйство» МИИТа разработана модель взаимодействия подвижного состава и пути с учетом накопления остаточных деформаций пути [49, 50]. Расчет остаточной деформации пути разделен на две части: динамическую и квазистатическую.

В динамической части определяется динамическая сила P , возникающая при проходе колеса экипажа по геометрической неровности пути. Для этого определяются совместные вертикальные колебания приведенных к колесу масс кузова, тележки, пути и масса колеса с полуосью и буксой. Также учитываются характеристики рессорного подвешивания кузова, демпфирующие свойства балласта и жесткость пути, при этом остаточная деформация пути не определяется.

Для определения динамической силы используется известная в теории линейчатая модель экипажа, представленная на рисунке 2.3.

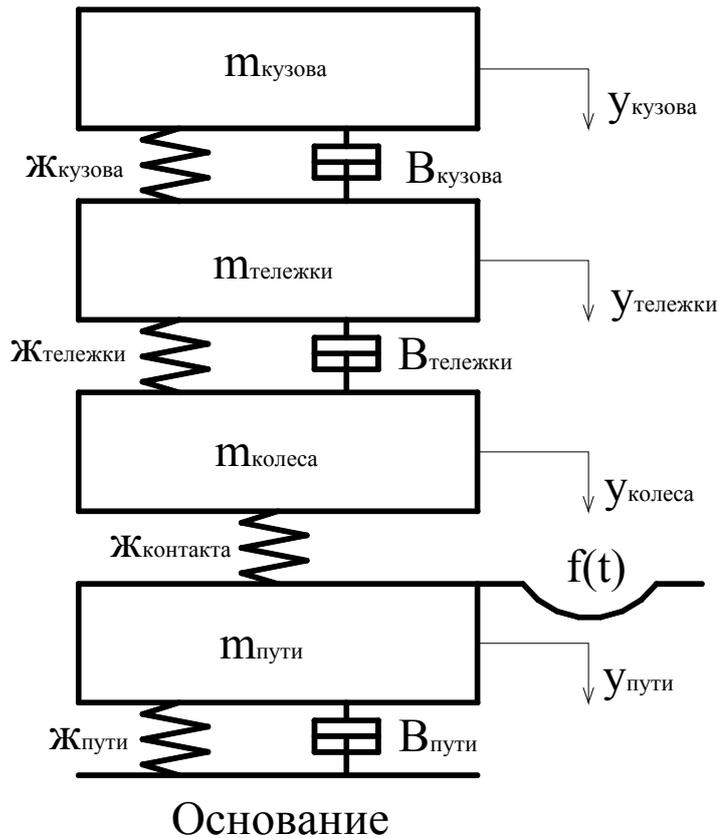


Рисунок 2.3 – Линейчатая модель системы «экипаж – путь»

На рисунке 2.3 приняты следующие обозначения:

$U_{кузова}$, $U_{тележки}$, $U_{колеса}$, $U_{пути}$ – соответственно перемещение кузова экипажа, тележки, колеса и пути; $m_{кузова}$, $m_{тележки}$, $m_{колеса}$, $m_{пути}$ – соответственно масса кузова экипажа, тележки, колеса и пути; $J_{кузова}$, $J_{тележки}$, $J_{контакта}$, $J_{пути}$ – соответственно жесткость рессорного комплекта между кузовом и тележкой, между тележкой и колесом, контактная жесткость колеса и рельса и жесткость железнодорожного пути; $B_{кузова}$, $B_{тележки}$, $B_{пути}$ – соответственно коэффициент демпфирования кузова экипажа, тележки и коэффициент, учитывающий потерю энергии в балластной призме; $f(t)$ – функция, описывающая исходную геометрическую неровность пути.

Начальная неровность пути $f(t)$ описывается известным в теории уравнением [51]

$$f(t) = \frac{a}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{l} t \right), \quad (2.9)$$

где $f(t)$ – текущая ордината неровности;
 a – глубина неровности;
 l – длина неровности;
 t – время.

Математическое описание модели, приведенной на рисунке 2.3, в матричной форме имеет вид

$$|M|\{\ddot{y}\} + |B|\{\dot{y}\} + |Ж|\{y\} = 0, \quad (2.10)$$

где $|M|$ – диагональная матрица масс;
 $|Ж|$ – диагональная матрица жесткостей;
 $|B|$ – диагональная матрица коэффициентов демпфирования;
 $\{y\}$ – вектор-столбец, состоящий из обобщенных координат механической модели, а $\{\dot{y}\}$ и $\{\ddot{y}\}$ из скоростей и ускорений соответственно.

Решая систему уравнений (2.10), определяют динамическую силу P :

$$P = Ж_{конт} (y_{колёса} - y_{пути} - f(t)). \quad (2.11)$$

Во второй части проводится расчет напряжений в элементах ВСП, упругих и остаточных деформаций пути от воздействия динамической силы. В ней железнодорожный путь описан континуальной моделью, т.е. путь представлен в виде геометрически ровной балки Эйлера бесконечно большой длины, неизменного поперечного и продольного сечений, лежащей на сплошном неравноупругом основании, принятом в соответствии с гипотезой Фусса – Винклера [52, 53]. К балке последовательно в каждое сечение прикладывают динамическую силу, полученную из динамической части задачи, от воздействия которой определяется упругая деформация балки методом конечных разностей.

В модели принято допущение, что остаточная деформация пути $y_{ост}$ задается в виде люфта, а балка в зоне люфтов опирается на фиктивное основание, имеющее эквивалентный модуль упругости пути $U_{экр}$. При этом вертикальный упругий прогиб рельса будет складываться из величины люфта $y_{ост}$ и упругой деформации основания $y_{упр}$:

$$y = y_{ост} + y_{упр} .$$

Поскольку вертикальные колебания приведенной к колесу массы пути и их затухание рассчитываются в динамической части задачи, уравнение вертикальных колебаний балки будет иметь вид

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + Uy = 0 ,$$

где E – модуль упругости рельсовой стали;

I – момент инерции балки (рельса);

y – упругий прогиб рельса;

z – абсцисса текущего сечения балки, отсчитываемая от некоторого подвижного начала координат;

U – эквивалентный модуль упругости подрельсового основания.

Расчет эквивалентного модуля упругости пути в каждом сечении балки проводится с использованием линейной аппроксимации зависимости упругого отпора основания от прогиба рельса под динамической силой методом итераций, представленной на рисунке 2.4.

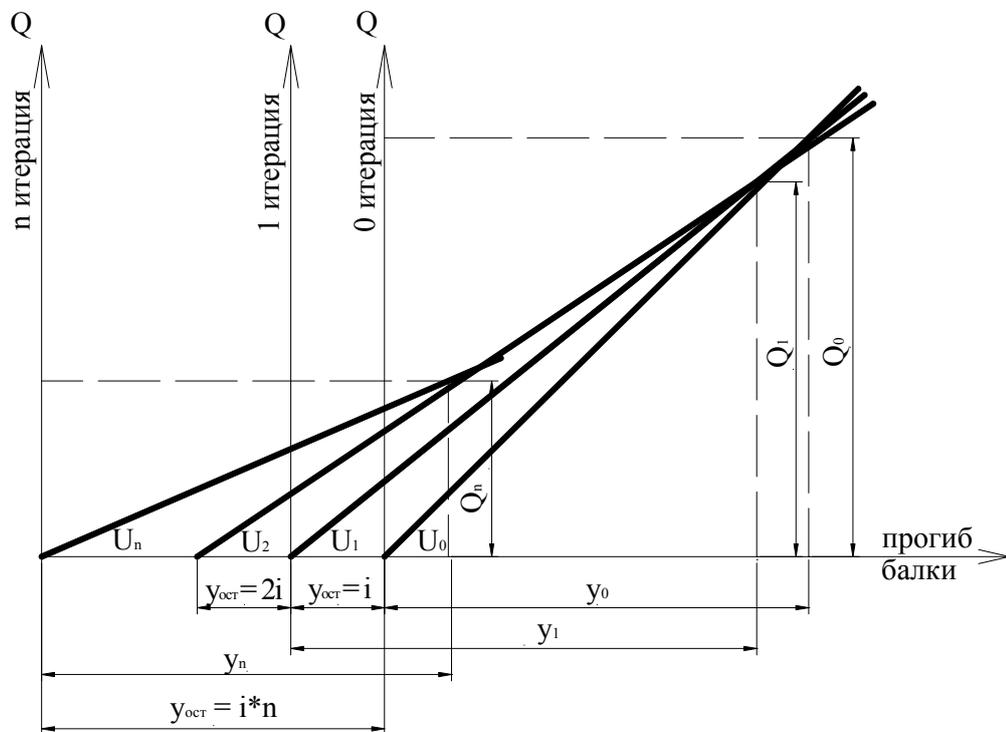


Рисунок 2.4 – Линейная аппроксимация зависимости упругого отпора основания от упругого прогиба рельса под динамической силой

Количество итераций n определялось эмпирически. Для определения шага итерации i величина заданной остаточной деформации пути $y_{ост}$ делится на количество итераций n :

$$i = y_{ост} / n .$$

На нулевой итерации (рисунок 2.4) величина остаточной деформации пути принимается равной нулю $y_{ост} = 0$, после чего при заданном начальном модуле упругости U_0 проводится расчет упругого прогиба пути y_0 и упругого отпора основания $Q_0 = U_0 \cdot y_0$.

Полученный упругий прогиб пути y_0 сравнивается с остаточной деформацией пути $y_{ост}$, равной одному шагу итерации $y_{ост} = i$.

При определении эквивалентного модуля упругости пути рассматриваются два случая:

- прогиб рельса меньше или равен люфту $y_{ост}$;
- прогиб рельса больше люфта.

В первом случае рельсошпальная решетка не опирается на подшпальное основание (рисунок 2.5а), при этом эквивалентный модуль упругости пути U и эквивалентный упругий отпор основания Q равны нулю.

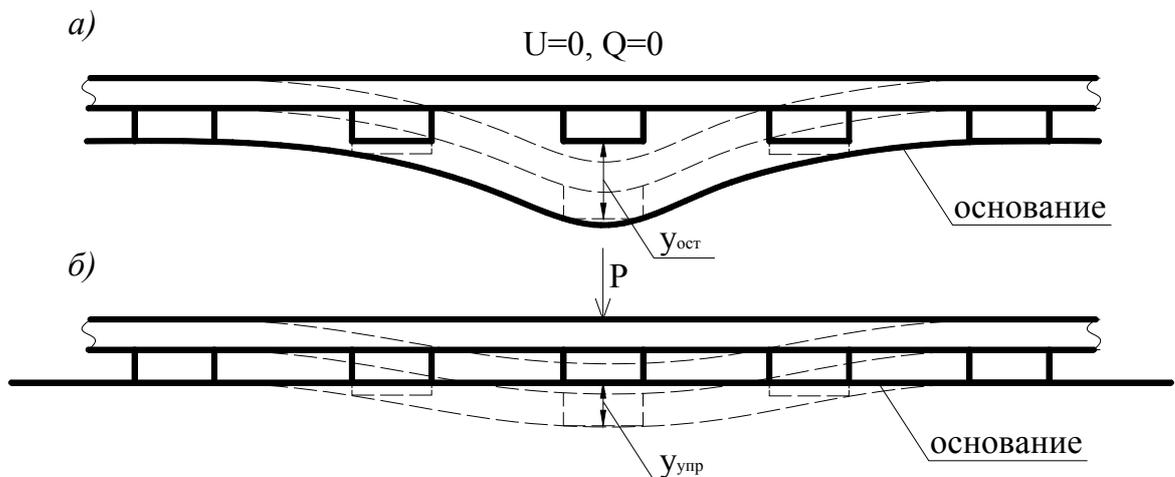


Рисунок 2.5 – Два случая для определения эквивалентного модуля упругости пути U

Во втором случае возникает упругая деформация подшпального основания $y_{упр}$ (рисунок 2.5б) под динамической силой P .

Если $y_0 \leq y_{ост}$, то в этом расчетном сечении балки упругий отпор равен нулю, а следовательно, и модуль упругости пути равен нулю $U_1 = 0$. Если $y_0 > y_{ост}$, то в этом расчетном сечении балки модуль упругости пути определяется по формуле

$$U_1 = \frac{Q_0}{y_0 + y_{ост}}.$$

На следующей – первой – итерации (рисунок 2.8) определяется упругий прогиб пути y_1 и упругий отпор основания Q_1 уже при модуле упругости основания U_1 . После чего полученный упругий прогиб y_1 сравнивается с остаточной деформацией пути $y_{ост}$, уже равной двум шагам итерации $y_{ост} = 2 \cdot i$.

Если $y_1 \leq y_{ост}$, то в этом расчетном сечении балки модуль упругости пути равен нулю $U_2 = 0$. Если $y_1 > y_{ост}$, то в этом расчетном сечении балки модуль упругости пути определяется по формуле

$$U_2 = \frac{Q_1}{y_1 + y_{ост}}.$$

Окончательное значение модуля упругости пути рассчитывается на n -ой последней итерации по формуле

$$U_n = \frac{Q_{n-1}}{y_{n-1} + y_{ост}},$$

где $y_{ост}$ – заданная остаточная деформация пути, равная $(n \cdot i)$.

После определения эквивалентного модуля упругости пути U_n рассчитывается эквивалентный упругий прогиб рельса y_n и эквивалентный упругий отпор Q_n .

После определения эквивалентного модуля упругости пути и упругого прогиба рельса в каждом сечении балки проводится расчет напряженного состояния пути аналогично нормативной методике.

В рассматриваемой модели под остаточной деформацией пути понимается остаточная осадка балласта, а основная площадка земляного полотна считается стабильной и исправной.

Для определения остаточной деформации балласта был проведен анализ различных исследований, в результате которого выбрана зависимость осадки щебня под шпалой в подрельсовой зоне от силы, действующей на железобетонную полушпалу, полученная А.И. Гасановым [49]:

$$y_{ост} = a \cdot ((P_{ш} - P_0) \cdot 10^{-3})^2, \quad (2.12)$$

где $y_{ост}$ – остаточная деформация пути, см;

a – коэффициент аппроксимации, равный 2,45;

$P_{ш}$ – сила, действующая на полушпалу, кг/см²;

P_0 – сила, действующая на полушпалу, при которой не возникает осадки балласта, равная 2800 кг.

Уравнение (2.12) получено в результате обработки лабораторных испытаний балласта, проведенных С.Н. Поповым [54], и применимо для чистого воздушно-сухого щебня. Поскольку С.Н. Попов определял интенсивность развития остаточных деформаций балласта после 10 000 пульсаций силы, предполагается, что остаточная деформация балласта, рассчитанная по формуле (2.12), развивается после 10 000 пульсаций динамической нагрузки от колеса подвижного состава.

Укрупненный алгоритм расчета взаимодействия подвижного состава и пути представлен на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Укрупненный алгоритм расчета воздействия подвижного состава на путь по разработанной методике

Для проведения расчетов была написана программа в среде MatLab, реализующая расчет по указанной методике.

Рассматриваемая математическая модель из всех приведенных позволяет наиболее полно определять выбранные ранее параметры взаимодействия пути и подвижного состава, а также учитывать наличие люфтов под шпалами и прогнозировать остаточные деформации пути. Для дальнейших расчетов воспользуемся этой моделью.

При разработке выбранной модели авторы в качестве исходных данных задавали начальную неровность пути и принимали в расчетах равноупругое основание, выбранная математическая модель прошла проверку адекватности [50].

При этом проверены следующие параметры расчета: 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 каких-либо геометрических неровностей, но имеется перепад модуля упругости. Эти предпосылки отличаются от тех, при которых проверяли адекватность выбранной модели, поэтому возникла необходимость обоснования достоверности расчета упругих прогибов рельса при скачкообразном изменении модуля упругости пути.

2.2 Методика проверки адекватности математической модели

Для проверки адекватности модели в части расчета упругих прогибов рельса при скачкообразном изменении модуля упругости пути необходимо сравнить данные, полученные экспериментальным и теоретическим путем, измеренные в зоне сопряжения конструкций пути с различными модулями его упругости. При расхождении результатов не более чем на 15 % можно говорить о достоверности получаемых данных.

Сложность рассматриваемой задачи заключается в определении упругих характеристик пути в зоне сопряжения. В [55] М.Ф. Вериго и А.Я. Коган привели зависимость упругих деформаций рельсов под поездной нагрузкой от величины этой нагрузки, она носит сложный нелинейный характер. Отмечается, что *«прогиб рельса при небольших нагрузках (до 40÷50 кН), при котором происходит сжатие зазоров между рельсами и креплениями и шпалами в балласте и т.п., называют первоначальным скачком прогиба рельса. За пределами этого скачка зависимость прогиба рельса от силы, действующей на него практически линейна»*. В дальнейших расчетах обозначим первоначальный скачок прогиба рельса величиной y_{nc} .

При нагрузочных испытаниях комплексами СПМ-18 и СМ-460 проводят измерения под двумя эталонными, квазистатическими нагрузками [56–58]. Благодаря этому возникает возможность исключить первоначальный скачок прогиба рельса y_{nc} и определить модуль упругости пути. На рисунке 2.7 представлен график зависимости прогиба рельса от приложенной нагрузки при измерении под двумя нагрузками.

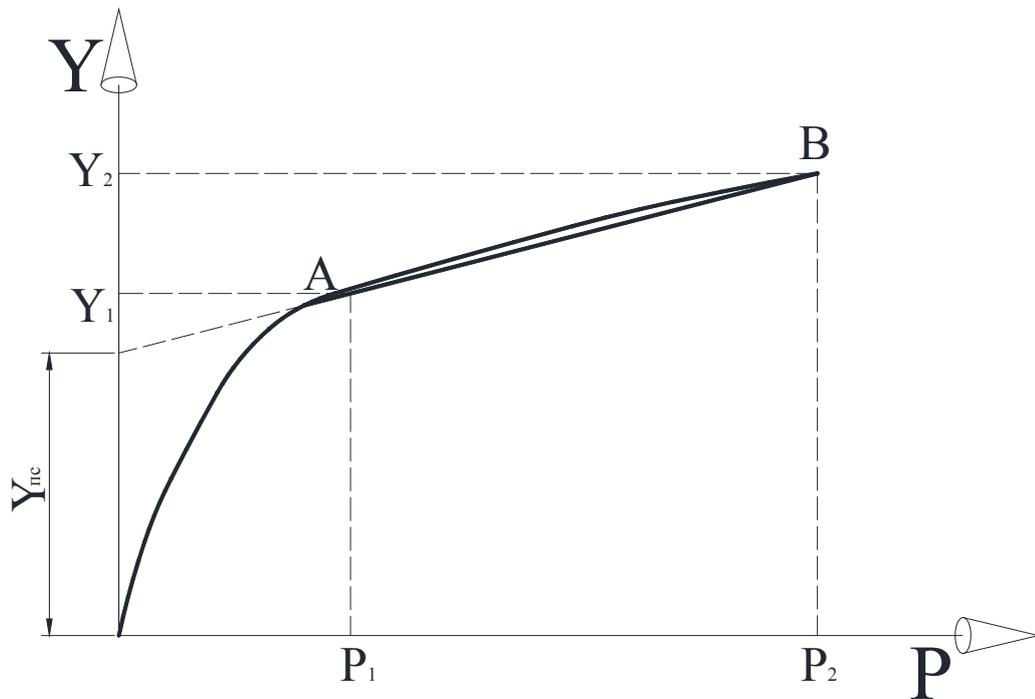


Рисунок 2.7 – График зависимости прогиба рельса от приложенной нагрузки

Таким образом, для определения модуля упругости пути необходимо провести измерения прогибов рельсов под двумя эталонными нагрузками. Удобнее всего это будет сделать под нагрузочным комплексом, т.к. он движется со скоростью не более 10 км/ч, что исключает появление динамических сил при известной нагрузке на ось.

После получения результатов измерений прогибов рельсов под эталонной нагрузкой модуль упругости пути можно определить по формуле

$$U = \frac{1}{\sqrt[3]{64EI}} \sqrt[3]{\left(\frac{\Delta P}{\Delta y}\right)^4},$$

где $E = 2,1 \times 10^6$ кг/см² – модуль упругости рельсовой стали;

$I = 3548$ см⁴ – момент инерции рельса относительно горизонтальной оси (на участке с контруголком $I = 4823$ см⁴);

ΔP – разность нагрузок на путь;

Δy – разность измеренных прогибов.

Помимо определения модуля упругости эксплуатируемого пути необходимо учесть первый скачок прогиба рельса y_{nc} . В рамках решаемой задачи можно сделать допущение о том, что прогиб рельса складывается из двух величин: первого скачка прогиба рельса y_{nc} и прогиба рельса, линейно зависящего от

нагрузки. Вычисление величины y_{nc} производили аналитическим путем. Прежде всего, находили аналитическое выражение уравнения линии AB (рисунок 2.7) вида $y=kx+b$, исходя из того, что известны координаты двух точек, лежащих на этой прямой $A(Y_1P_1)$ и $B(Y_2P_2)$. После определения всех коэффициентов уравнения определяли y_{nc} в рассматриваемом сечении, принимая $P=0$. Такое определение первого скачка прогиба рельса носит условный характер, поскольку при нулевой нагрузке на путь в нем никаких упругих деформаций рельсошпальной решетки не возникает. Однако величина такой погрешности невелика, так как до выборки пустот жесткость пути определяется лишь изгибной жесткостью рельсов.

Структурная схема проверки адекватности данных полученных расчетным путем представлена на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 – Структурная схема проверки адекватности модели

2.3 Экспериментальные исследования упругих характеристик пути в зоне сопряжения

Для определения упругих характеристик пути в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО были проведены экспериментальные работы на действующем участке пути Московской железной дороги.

Участок сопряжения земляного полотна с ИССО расположен на 246 км перегона Семлево – Вязьма Московской железной дороги. Мост однопролетный, балочный, с ездой поверху, длиной 27 м, мостовое полотно представлено плитами БМП с прокладным слоем из транспортерной ленты и древесины. Конструкция ВСП представлена рельсами Р65, промежуточными рельсовыми скреплениями типа КБ-65, уложенными как на подходе к мосту, так и на нем. Устои моста обсыпные, длина устоя по верху 7,5 м, на шкафной стенке устоя расположен мауэрлатный брус в виде сдвоенных мостовых деревянных брусьев, на подходе уложен путь на железобетонных шпалах с эпюрой 2000 шп/км. Общий вид участка представлен на рисунке 2.9.



Рисунок 2.9 – Общий вид экспериментального участка в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО

Выбор участка, на котором производились экспериментальные работы, обусловлен следующими факторами:

- на земляном полотне отсутствовали просадки и деформации;
- во время испытаний проходили нагрузочные устройства, что позволяло определить деформации пути под эталонными нагрузками и, таким образом, – величину y_{nc} ;
- имелся ярко выраженный перепад модуля упругости пути из-за наличия мауэрлатного бруса;
- на участке имеется место – устой моста для установки датчиков таким образом, чтобы можно было определить общую осадку рельса, сформированную сжатием упругих прокладок, балласта и земляного полотна.

Методика испытаний. Для определения прогибов рельса под поездной нагрузкой измеряли вертикальное перемещение (осадку) по оси его подошвы. Измерения осуществляли электропрогибомерами (далее – прогибомер, рисунок 2.10).

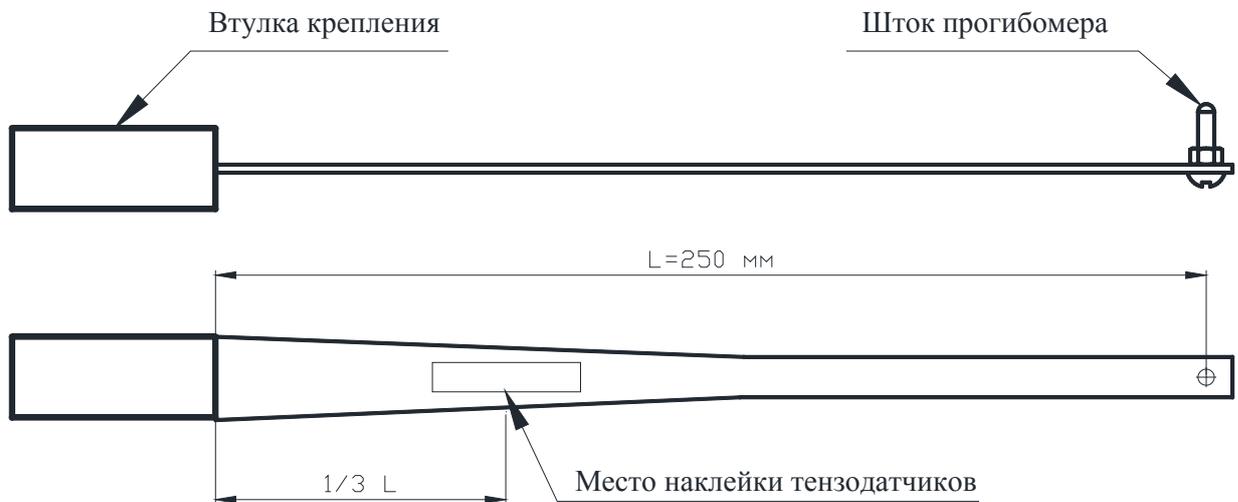
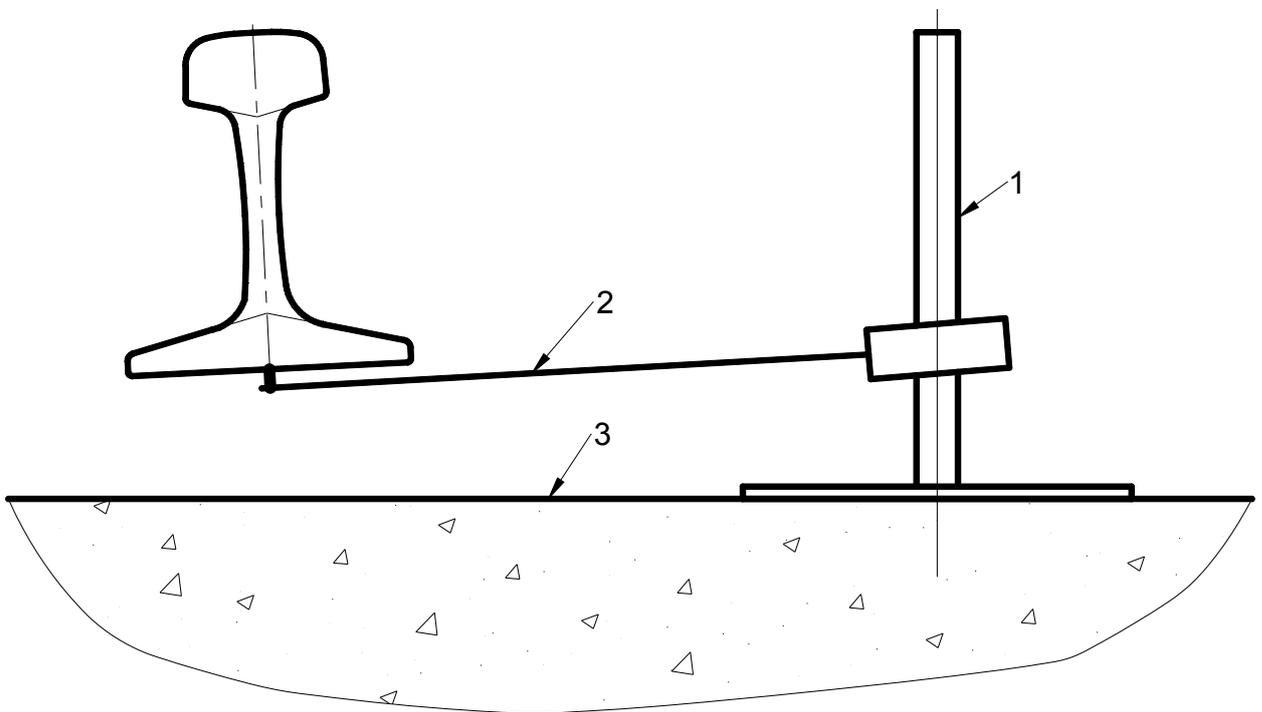


Рисунок 2.10 – Конструкция прогибомера

Прогибомер представляет собой пластину длиной 250 мм из фольгированного стеклотекстолита толщиной 1,6 мм. В плане пластина трапециевидная. На пересечении наклонных сторон трапеции установлен шток прогибомера, выполненный из винта М4. Для обеспечения точечного контакта с объектом кончику штока придана полусферическая форма. Таким образом, форма прогибомера в средней части его длины представляет собой «балку равного сопротивления» [59].

При изгибе такой балки в каждой точке её длины возникают одинаковые напряжения и, соответственно, одинаковые относительные деформации. Вторым концом пластины соосно закреплен в цилиндрической втулке для установки на объекте. На поверхностях пластины друг напротив друга параллельно её оси наклеены два тензорезистора с базой 10 мм, соединенные в полумостовую схему. Измерительные сечения располагали в пути по одной рельсовой нити.

Расположение измерительных сечений и установка прогибомеров в сечении показана на рисунках 2.11 и 2.12.



1 – стойка для крепления прогибомеров; 2 – прогибомер, измеряющий вертикальные перемещения рельса; 3 – прогибомер, измеряющий боковые перемещения головки рельса;
4 – путевой бетон; соединительные трубки и хомуты не показаны

Рисунок 2.11 – Схема установки прогибомеров на устое моста

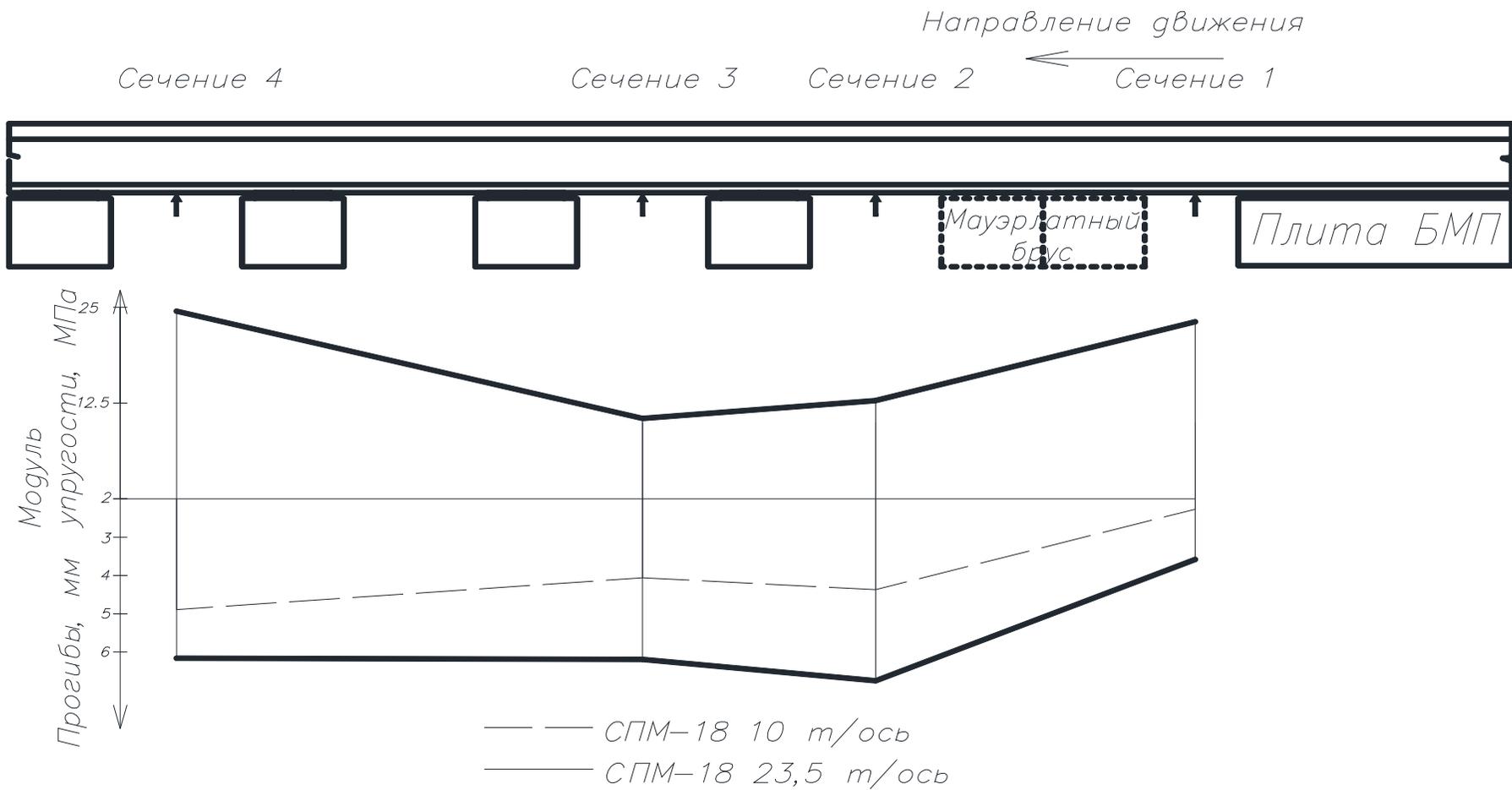


Рисунок 2.12 – Схема установки датчиков по длине пути

Оборудование измерительных сечений производилось в перерывах движения поездов. Стойки устанавливали на безосадочное основание, которое не деформируется под действием поездной нагрузки – на шкафной стенке и бортах балластного корыта устоя моста. Стойки закрепляли пластиковыми дюбелями и саморезами. Затем на стойки закрепляли прогибомеры при помощи удлинительных труб и хомутов.

После установки прогибомеров и сборки измерительной схемы производили калибровку каждого измерительного канала установкой под шток прогибомера калиброванной пластинки толщиной 2 мм.

В качестве регистратора сигналов была применена тензостанция МІС-026 с пятью четырехканальными модулями МС-212 для подключения тензодатчиков. Тензостанция работает под управлением программы Recorder [60], установленной в ноутбуке. Связь ноутбука с тензостанцией осуществлялась по линии Ethernet.

Запись сигналов от прогибомеров производили при прохождении графиковых поездов, а также под эталонной квазистатической нагрузкой – нагрузочными устройствами.

Обработка результатов испытаний. Обработка сигналов была выполнена с применением пакета обработки сигналов WinPOS [60].

Для определения вертикальных перемещений рельса в абсолютных величинах цифровой сигнал умножали на калибровочный коэффициент, который определяли по формуле

$$K = \frac{b}{a}$$

где b – толщина калибровочной пластины, 2 мм;

a – амплитуда записи, соответствующая калибровочной пластине, измеренная в милливольтгах.

Фактические значения сигналов в каждом канале получали умножением записанной амплитуды на калибровочный коэффициент.

2.4 Проверка адекватности данных, получаемых расчетным путем при помощи выбранной модели

Как уже отмечалось, измерения просадок пути производили не только под графиковыми поездами, но и под «эталонной» нагрузкой – нагрузочным комплексом СПМ-18 (эталонные нагрузки 10 и 23,3 т/ось). Проходы нагрузочных устройств осуществлялись с постоянной скоростью не более 10 км/ч. Целью измерений под этими комплексами являлась калибровка измерительной аппаратуры, определение величины y_{nc} и модуля упругости пути в зоне расположения датчиков.

Подсчитав для каждого сечения пути, в котором производились измерения, значения модуля упругости пути и величины y_{nc} , подставляли их в математическую модель.

Результаты вычислений модуля упругости и люфтов в каждом сечении на определенном участке пути представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты вычислений модуля упругости пути по проходам нагрузочных устройств на участке сопряжения земляного полотна и моста

Номер сечения	y_1	y_2	Δy	k , т/мм	b	y_{nc}	Модуль упругости пути кг/см ²
1	2,27	3,58	1,31	5,152672	-6,69656	1,29963	245,4232
2	4,37	6,75	2,48	2,721774	-6,89415	2,532963	104,7953
3	4,06	6,19	2,13	3,169014	-7,8662	2,482222	128,3624
4	4,89	6,16	1,37	4,927007	-19,0931	3,875185	231,1976

Поскольку измерения производили через один шпальный ящик, исходные данные для определенного сечения, в котором были установлены прогибомеры, подставляли для двух соседних опор.

После моделирования железнодорожного пути в зоне сопряжения рассчитывали прогибы рельса под графиковыми поездами. Поскольку по участку проходили с установленными скоростями как пассажирские, так и грузовые поезда, у которых затруднительно определить осевую нагрузку, в математической модели были определены прогибы под локомотивами – подвижными единицами с известной поездной нагрузкой.

Таким образом, решается обратная задача: по прогибам рельсов, измеренным под эталонной нагрузкой, определяют характеристики пути (модуль упругости

пути и величина y_{nc}), эти характеристики подставляют в качестве исходных данных в математическую модель, моделируют проход подвижного состава по участку пути с рассчитанными характеристиками, со скоростями, измеренными в ходе эксперимента, рассчитывают просадки согласно алгоритму математической модели прогнозирования остаточных деформаций, сравнивают расчетные и экспериментальные значения прогибов. Результаты сравнения в относительных величинах расчетных и экспериментальных данных представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных, полученных в зоне сопряжения земляного полотна и искусственного сооружения

Подвижной состав	Сечения											
	Сечение 1			Сечение 2			Сечение 3			Сечение 4		
	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

Расчетные осадки пути и осадки, полученные экспериментально, не отличаются более чем на 11%, что свидетельствует об адекватности данных, полученных расчетным путем.

2.5 Выводы по главе 2

1. Проведен анализ существующих математических моделей, которые характеризуют взаимодействие пути и подвижного состава при перепаде модуля упругости пути. На основе анализа была выбрана модель, разработанная на кафедре «Путь и путевое хозяйство» МИИТа, которая позволяет учитывать неравножесткость пути, пустоты под шпалами, а также прогнозировать накопление остаточных деформаций пути.

2. По экспериментальным данным была проверена адекватность получаемых расчетных данных для условий в выбранной зоне. Проверка показала, что расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 11%.

3 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПУТИ НА РАЗВИТИЕ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ЗОНЕ СОПРЯЖЕНИЯ

3.1 Методика проверки чувствительности модели

Для выполнения поставленной цели исследования необходимо определить причины и процесс возникновения и развития характерных неровностей в виде предмостовых ям. Для этого проведем математическое моделирование, в ходе которого детально изучим этот процесс. Также определим, при каких скоростях движения, осевых нагрузках, модулях упругости пути на земляном полотне и ИССО остаточные деформации в зоне сопряжения будут накапливаться с наибольшей интенсивностью.

При расчетах на модели взаимодействия пути и подвижного состава в зоне неравножесткости вводится 4 изменяемых параметра, выводится – 7. Предварительно необходимо выявить наиболее существенные из них по влиянию на те или иные результаты, для чего необходимо предварительно установить чувствительность модели, которая характеризуется степенью соответствия относительных изменений выходных параметров модели её заданным входным параметрам [61].

Целью проверки является определение влияния изменения входных параметров модели (скорость движения, нагрузка на ось, величина неравножесткости и жесткость пути на земляном полотне) на изменение выходных параметров модели (напряжения в элементах ВСП, силы, действующие на путь, и остаточные деформации). Для проверки чувствительности модели был смоделирован участок сопряжения земляного полотна и ИССО аналогично [25, 62], по которому пропусклась поездная нагрузка. В ходе математического моделирования принято, что путь на ИССО характеризуется бóльшими значениями модуля упругости пути, чем на земляном полотне, а также не накапливает остаточные деформации в процессе пропуска поездной нагрузки [62]. Конструкция ВСП на земляном полотне принята согласно [63, 64] и представляет собой рельсы Р65, уложенные

на железобетонных шпалах, эюра укладки 2000 шт./км, балласт из твердых пород камня толщиной под шпалой 40 см. Земляное полотно не имеет дефектов и повреждений. Как отмечалось в главе 1, при устройстве УПЖ можно добиться практически безосадочной работы земляного полотна, поэтому в расчетах также примем, что земляное полотно не накапливает остаточных деформаций под поездной нагрузкой.

В качестве исходных данных приняты:

– нагрузки на ось: 23,5 т – установленные в настоящее время, 25 т – реализуемые, 27 и 30 т – перспективные;

– скорость движения от 60 до 100 км/ч с шагом 20 км/ч;

– значения начального модуля упругости пути приняты 25 и 35 МПа – как типовые значения модуля упругости пути на земляном полотне, полученные при анализе проходов нагрузочных устройств СПМ-18 и СМ-460;

– 50 МПа – значение модуля упругости пути в зоне расположения устоев мостов, полученное в работе [20]. Значения модуля упругости пути на земляном полотне и ИССО представлены в таблице 3.1.

– перепад модуля упругости задавали в сторону увеличения 0; 20 и 40 МПа.

Смоделированный участок пути не имеет каких-либо геометрических неровностей, т.е. подразумевается, что он находится в отличном состоянии после проведения ремонта. Исследуется только силовая неровность, вызванная перепадом модуля упругости пути, и неравномерная осадочность пути на земляном полотне и ИССО [62].

Таблица 3.1 – Значения модуля упругости на земляном полотне и ИССО, принятые в расчетах на модели

Модуль упругости на земляном полотне	Значения модуля упругости на ИССО при перепаде		
	0 МПа	20 МПа	40 МПа
25	25	45	65
35	35	35	75
50	50	70	90

По результатам расчетов фиксировали значения выходных параметров после каждого цикла расчета (10 тыс. пульсаций силы в каждом сечении). Получены зависимости, позволяющие сделать выводы о влиянии каждого входного параметра модели на изменение ее выходных параметров [62].

Для построения графиков зависимостей по горизонтальной оси откладывали значения входных параметров, которые изменяли в ходе моделирования, а по вертикальной – изменения выходных параметров модели. Принципиальный вид этих зависимостей и исходные данные, при которых они были получены, представлены в таблице 3.2, где ε – исследуемый выходной параметр.

Таблица 3.2 – Общий вид зависимостей выходных параметров от входных, полученный в ходе моделирования

Исследуемый параметр в виде функции	Входные параметры		
	Скорость V , км/ч	Нагрузка на ось P , т/ось	Перепад модуля упругости пути ΔU , МПа
$\varepsilon = f(v)$	60; 80; 100	const	0; 20; 40
$\varepsilon = f(v)$	60; 80; 100	23,5; 25; 27; 30	const
$\varepsilon = f(\Delta U)$	60; 80; 100	const	0; 20; 40
$\varepsilon = f(\Delta U)$	const	23,5; 25; 27; 30	0; 20; 40
$\varepsilon = f(P)$	const	23,5; 25; 27; 30	0; 20; 40
$\varepsilon = f(P)$	60; 80; 100	23,5; 25; 27; 30	const

Определение предельных условий моделирования. Очевидно, что в рамках математического моделирования необходимо выбрать условия, при достижении которых дальнейший расчет нецелесообразен, – в случае достижения определенной остаточной деформации, либо остановки расчета, в случае если пропущена значительная поездная нагрузка, а остаточная деформация не достигла своих предельных условий.

Из многолетнего опыта эксплуатации пути в различных условиях, а также длительных ресурсных испытаний на экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» на ст. Щербинка известно, что путь с отступлениями, не превышающими I степень,

согласно [65, 66] обеспечивает заданные межремонтные сроки и не требует исправления. Также специалистами «ВНИИЖТ» было установлено, что *«отступления могут «самоустраняться», особенно если они незначительно (на 1–3 мм) превышают нижний порог 2-й степени», а развитие таких неровностей не носит «скачкообразный характер»* [65, 66]. Исходя из этого, в качестве допускаемой остаточной деформации в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО принято отступление, не превышающее I степень – 10 мм, развившееся при пропуске не менее чем 150 млн. т бр. – минимального межремонтного тоннажа. При обеспечении такой интенсивности развития остаточных деформаций при эксплуатации не потребуется проводить внеплановые работы по выправке, при этом следует ожидать, что развитие неровности не будет иметь «скачкообразный характер».

3.2 Генезис предмостовых ям

По результатам численного моделирования установлено, что, даже при отсутствии перепада модуля упругости пути, на подходах к ИССО развиваются предмостовые ямы [67]. Причем величина скачка модуля упругости пути не оказывает существенного влияния на интенсивность их развития. На рисунке 3.1 представлена зависимость остаточных деформаций пути при осевой нагрузке 23,5 т, скорости движения 100 км/ч, начальном модуле упругости пути 50 МПа и при различных перепадах модуля упругости пути (ΔU).

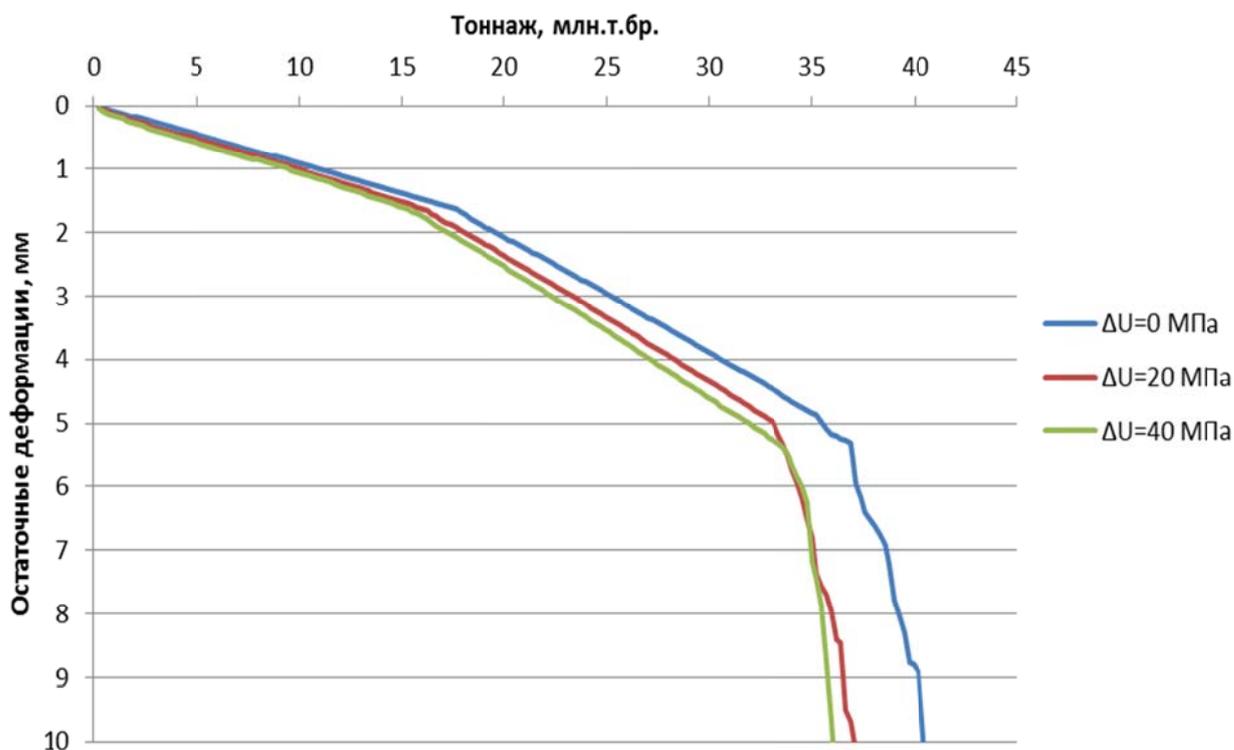


Рисунок 3.1 – Зависимость остаточных деформаций от пропущенного тоннажа при различных перепадах модуля упругости пути

Из рисунка 3.1 видно, что при отсутствии перепада модуля упругости пути остаточные деформации все равно развиваются, причем величина перепада не оказывает существенного влияния на величину и интенсивность развития остаточных деформаций [67].

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. На рисунке 3.2 приведен график развития остаточных деформаций пути при сопряжении земляного полотна и ИССО без перепада модуля упругости пути (рисунок 3.2а) и динамические добавки сил (рисунок 3.2б), после пропуска 2,35 и 7,05 млн. т бр.

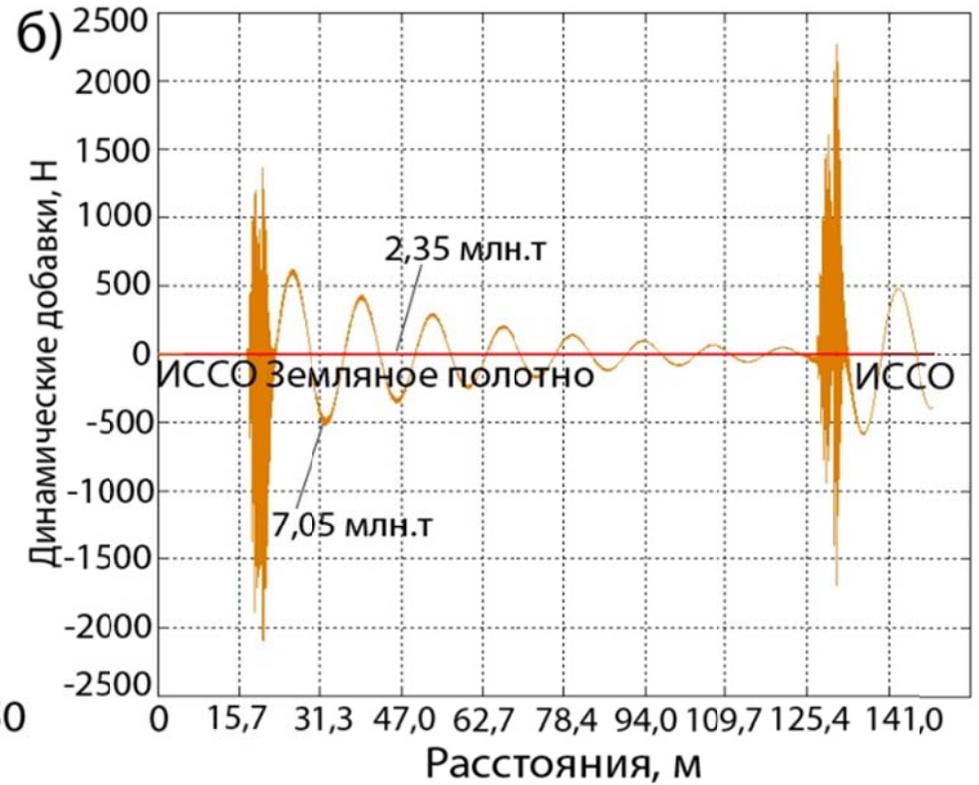
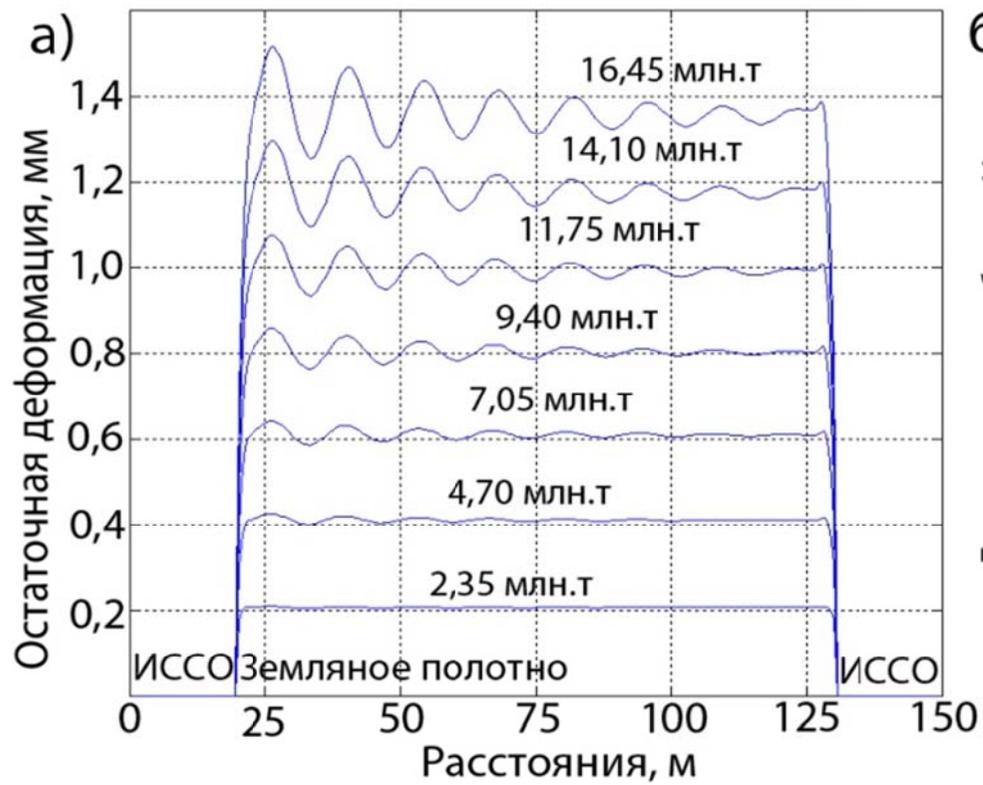


Рисунок 3.2 – Остаточные деформации пути и динамические добавки, возникающие на равновешном пути в зоне сопряжения

Из рисунка 3.2а видно, что на начальной стадии эксплуатации (пропуск 2,35 млн. т бр.) остаточные деформации пути на земляном полотне развиваются равномерно. Соответственно не возникает и динамических добавок вертикальных сил (рисунок 3.2а). С накоплением пропущенного тоннажа увеличивается просадка пути на земляном полотне, развивается неровность, которая становится причиной возбуждения дополнительных колебаний подвижного состава (рисунок 3.2б), из-за чего интенсивность развития остаточных деформаций увеличивается.

На рисунке 3.3 приведен график развития остаточных деформаций пути при сопряжении земляного полотна и ИССО с модулями упругости 25 и 65 МПа соответственно (рисунок 3.3а) и динамические добавки вертикальных сил от действия подрессоренных и непрессоренных масс (рисунок 3.3б) после пропуска 2,35 млн. т бр.

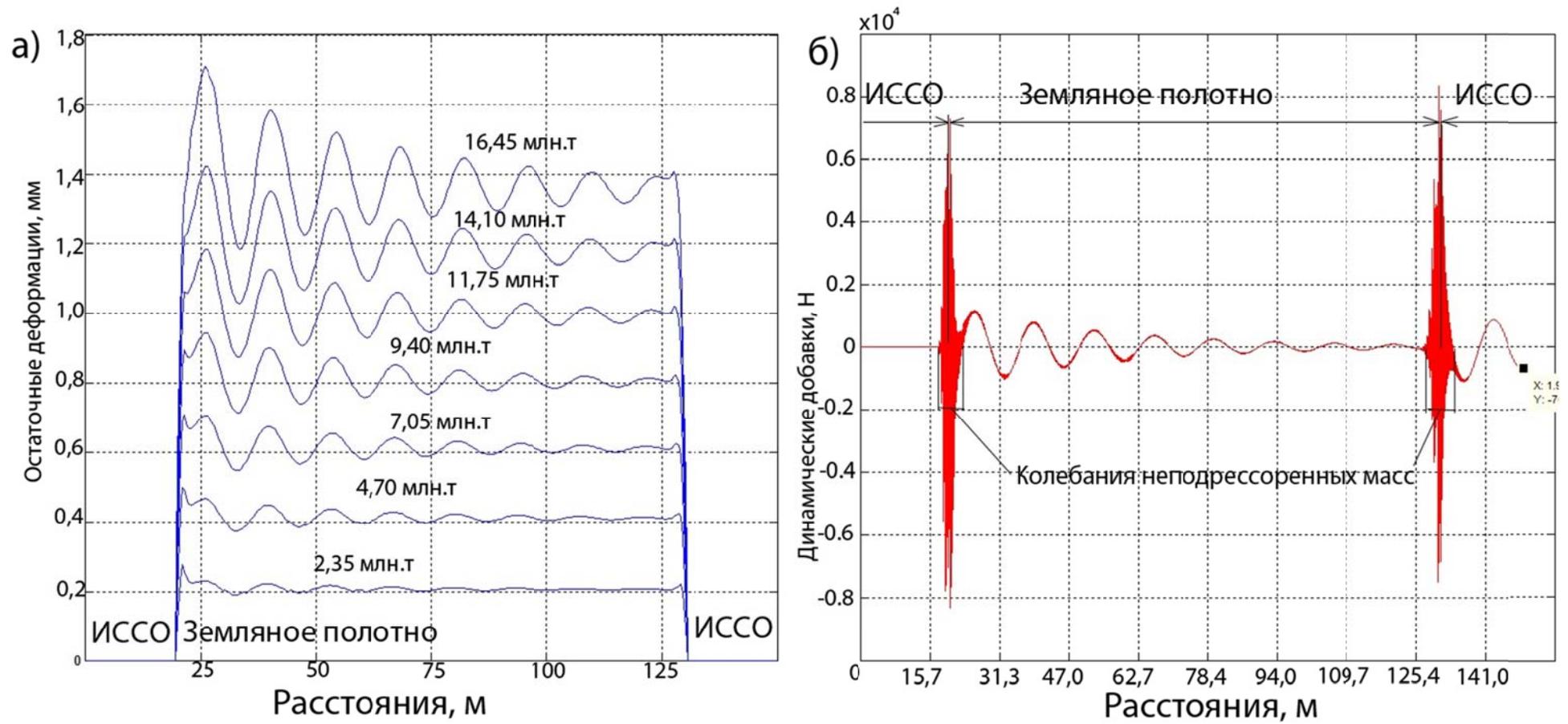


Рисунок 3.3 – Остаточные деформации (а) и динамические добавки вертикальных сил (б) на неравножестком пути в зоне сопряжения

Как видно из рисунка 3.3б, при наличии перепада модуля упругости пути возникают динамические добавки при прохождении подвижным составом сопряжения земляного полотна и ИССО. Наибольшие добавки сил действуют в зоне непосредственного сопряжения и вызваны высокочастотными колебаниями неподрессоренных масс экипажа. Эти добавки достаточно быстро затухают по длине. Расстояние после крайней подрельсовой опоры на ИССО, на котором происходят интенсивные колебания неподрессоренных масс, вызванные перепадом модуля упругости пути, в дальнейшем будем называть зоной влияния колебаний неподрессоренных масс. Величина этой зоны зависит от скорости движения, величины неподрессоренной массы и других параметров. В рамках проведенного численного эксперимента наибольшая длина зоны влияния колебаний неподрессоренных масс составила около 3 м.

Амплитуда колебаний неподрессоренных масс и, как следствие, величина динамических добавок зависит от скорости движения и величины силового уклона, который возникает при сопряжении участков пути с различными модулями упругости. Значения силового уклона, в свою очередь, зависят от амплитуды перепада модуля упругости пути и его начальных значений: при перепаде 20 МПа силовой уклон будет больше при переходе с 25 на 45 МПа, чем при переходе с 50 на 70 МПа. Таким образом, величина перепада модуля упругости пути преимущественно оказывает влияние в зоне колебаний неподрессоренных масс, т.е. на расстоянии около 3 м от места сопряжения.

На начальной стадии эксплуатации, при съезде, остаточные деформации наиболее интенсивно развиваются в зоне влияния колебаний неподрессоренных масс, что объясняется повышенным динамическим воздействием. На рисунке 3.3а видно, что после пропуска 2,35 млн. т бр. наибольшая остаточная деформация развилась в этой зоне. С накоплением пропущенного тоннажа наибольшие просадки пути развиваются за указанной зоной, где возникают динамические добавки от низкочастотных колебаний подрессоренных масс (см. рисунок 3.3), т.е. влияние колебаний неподрессоренных масс снижается. Это происходит из-за того, что примыкающий к зоне влияния колебаний неподрессоренных масс путь на ИССО

не накапливает остаточных деформаций и не позволяет развиваться остаточным деформациям с той же интенсивностью, воспринимая большую часть нагрузки от подвижного состава. На рисунке 3.4 представлены силы, действующие на подрельсовые опоры, при сопряжении пути с перепадом модуля упругости 55 и 35 МПа, осевой нагрузке 23,5 т после пропуска 0,235 и 16,45 млн. т бр.

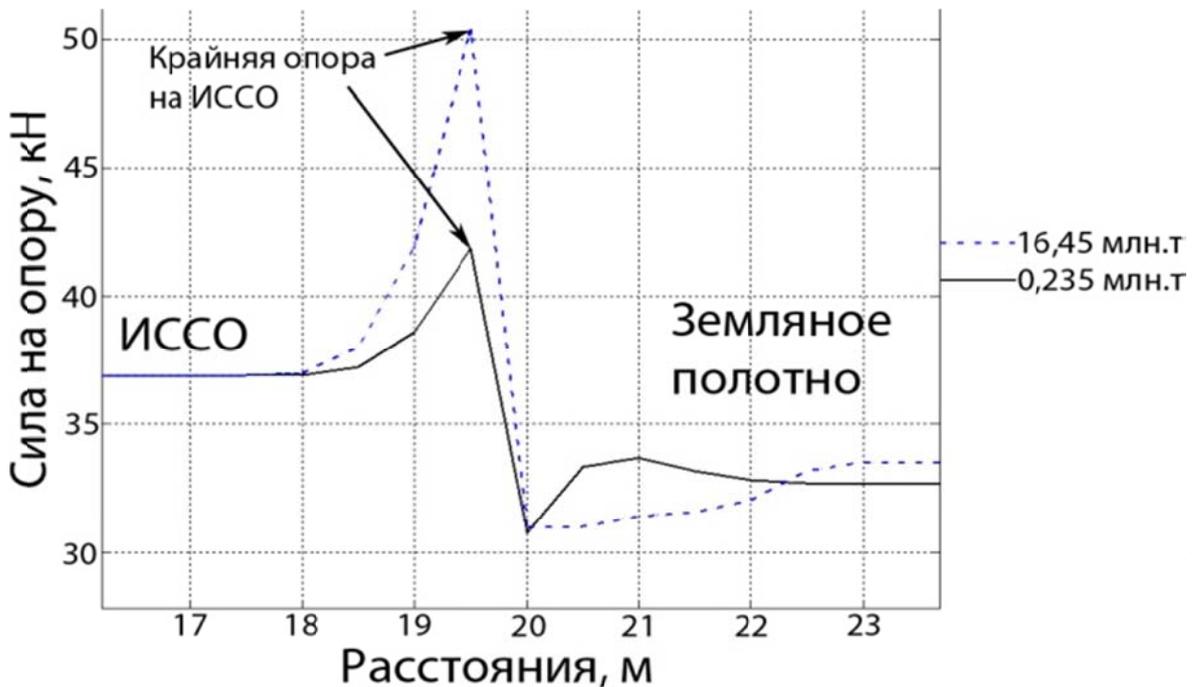


Рисунок 3.4 – Силы, действующие на опору, при сопряжении пути с модулем упругости 55 и 35 МПа

Как видно из рисунка 3.4, с ростом пропущенного тоннажа нагрузка на крайнюю опору увеличивается, а на земляном полотне, на расстоянии около 2,3 м от этой опоры, наоборот, снижается, т.е. происходит перераспределение нагрузок между элементами ВСП. С ростом пропущенного тоннажа эта тенденция сохраняется.

Величина добавок сил, вызванных колебаниями подрессоренных масс при прохождении подвижным составом зоны сопряжения, существенно меньше добавок, вызванных колебаниями неподрессоренных масс, и на начальной стадии эксплуатации не превышает 2% от осевой нагрузки (см. рисунок 3.3б). Такая малая величина добавок динамических сил от колебаний подрессоренных масс подвижного состава связана с тем, что силовой уклон, вызванный перепадом

модуля упругости пути, мал и в рамках проводимого численного моделирования не превысил 0,5 ‰.

Процесс развития неровностей при въезде на ИССО отличается от съезда. На рисунке 3.5 изображен одновременный процесс накопления остаточных деформаций на подходах к ИССО.

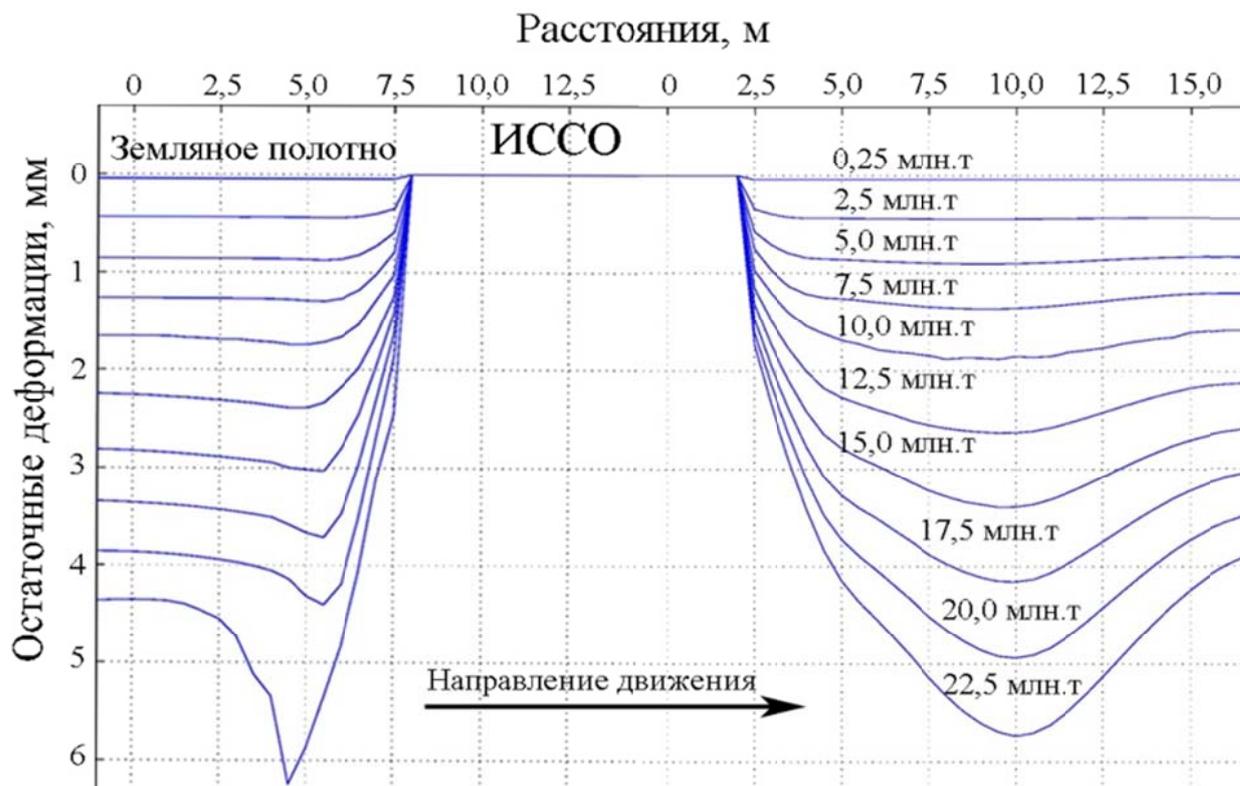


Рисунок 3.5 – Накопление остаточных деформаций на въезде и съезде с ИССО

При въезде на начальной стадии эксплуатации так же, как и на съезде, остаточные деформации практически не развиваются, 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 под ближайшей к ИССО шпалой возникает люфт, т.к. безбалластный путь практически не накапливает остаточных деформаций, далее возрастают силы, действующие на опоры за устоем, в результате чего наибольшие остаточные деформации начинают смещаться в сторону от ИССО.

3.3 Определение критерия длины УПЖ

Наибольшие остаточные деформации пути для всех условий эксплуатации были зафиксированы на некотором расстоянии (от 4,5 до 8 м) от зоны сопряжения.

Характер развития неровностей по длине пути говорит о том, что продольный профиль неровностей совпадает с колебаниями кузова подвижного состава. На рисунке 3.6 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). Ускорения кузова и остаточные деформации отложены в абсолютных единицах, поэтому на графике наименьшее ускорение кузова вниз соответствует наибольшей просадке пути, отложенной вверх.

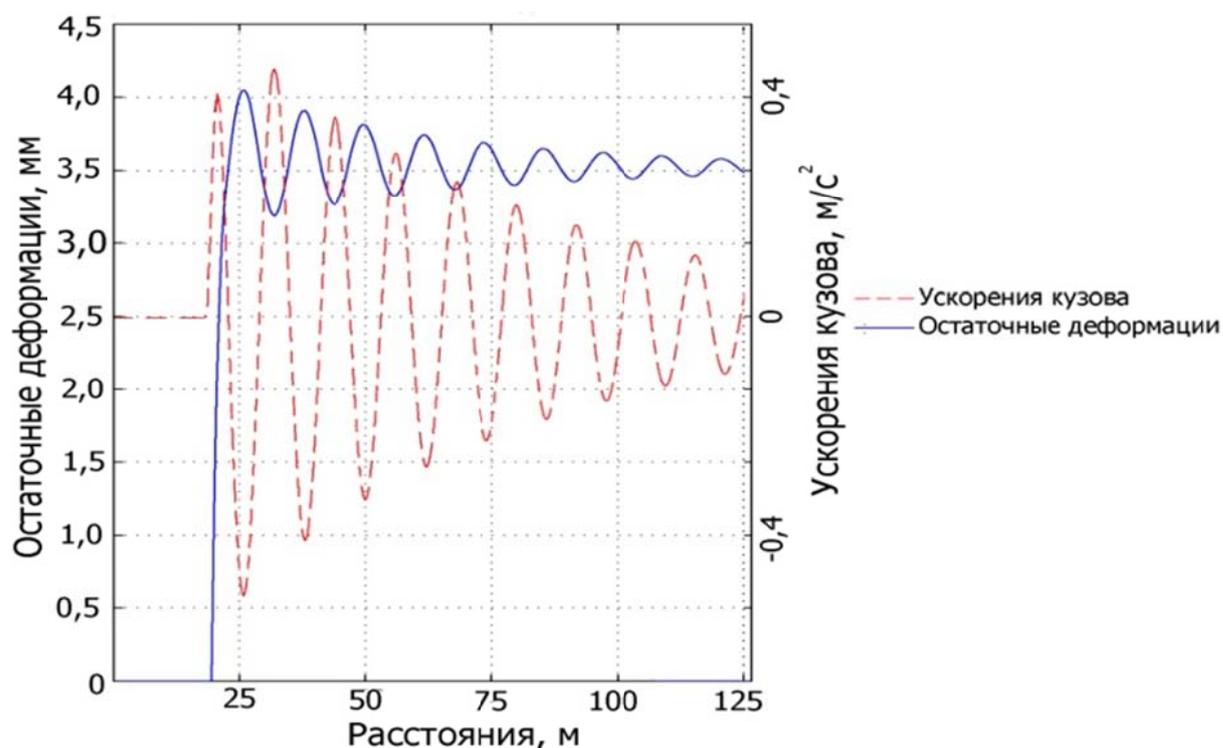


Рисунок 3.6 – Остаточные деформации пути и соответствующие им ускорения кузова подвижного состава

На основании полученных данных была выдвинута гипотеза о том, что периодические неровности пути на подходах к мостам, особенно при съезде, связаны с тем, что возбуждение колебаний кузова происходит всегда в одном и

том же месте – месте сопряжения 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 [67].

Это объясняется тем, что при прохождении подвижным составом участка неравножесткости происходит раскачка кузова подвижного состава, и далее состав следует по участку с затухающими колебаниями кузова, а поскольку инициация колебаний носит импульсный характер, кузов колеблется с собственной частотой. Так как эти колебания иницируются в одном и том же месте, и однопутные поезда следуют по участку сопряжения с примерно одинаковыми скоростями, путь испытывает динамическую нагрузку в одних и тех же местах. Поэтому просадки пути на подходах к ИССО будут развиваться синфазно колебаниям подвижного состава. Поскольку назначение участков переменной жесткости – не только сглаживать перепад модуля упругости пути, но и снижать деформативность пути по мере приближения к ИССО, целесообразно назначать длину участков переменной жесткости с учетом колебаний кузова подвижного состава, который следует по данному участку.

При обследовании ряда мостов на линии Москва – Санкт-Петербург Октябрьской железной дороги [20] при помощи флексометров были получены силовые профили пути под пассажирскими подвижными составами с локомотивами ЧС2, ЧС7 и ЧС200, которые двигались с установленными скоростями, и представлены на рисунке 3.7.

Полученные силовые профили были подвергнуты спектральному анализу (рисунок 3.8), который показал, что длина волны, соответствующая неровности длиной порядка 18,2 м встречается на всех участках измерений, остальные неровности имеют различную длину, не совпадающую с другими неровностями. При анализе не рассматривались первые максимумы спектральной плотности, поскольку они соответствуют наибольшим длинам волн, т.е. длине участка, на котором производились измерения.

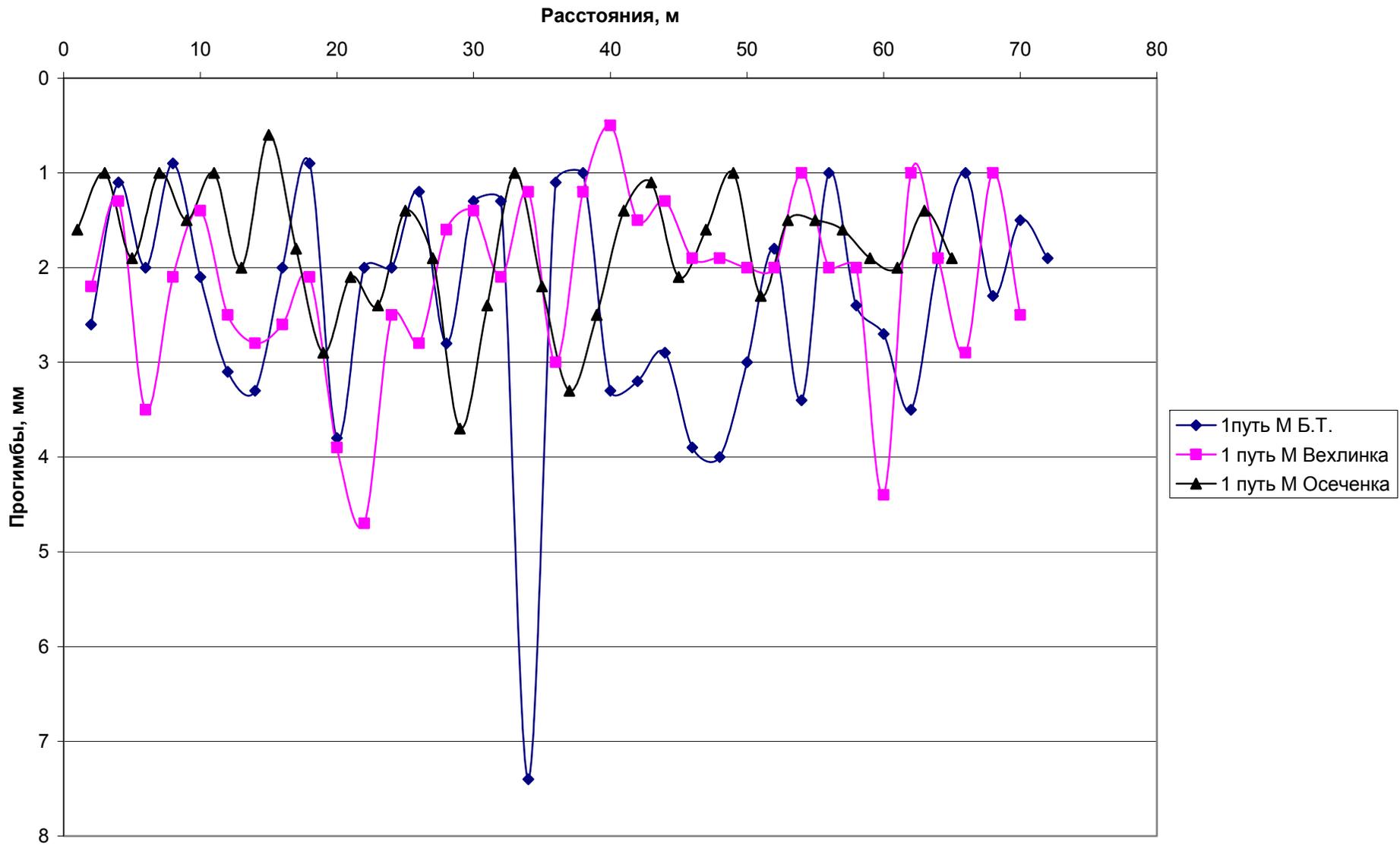


Рисунок 3.7 – Силовые профили пути, полученные при помощи флексометров, на различных участках пути

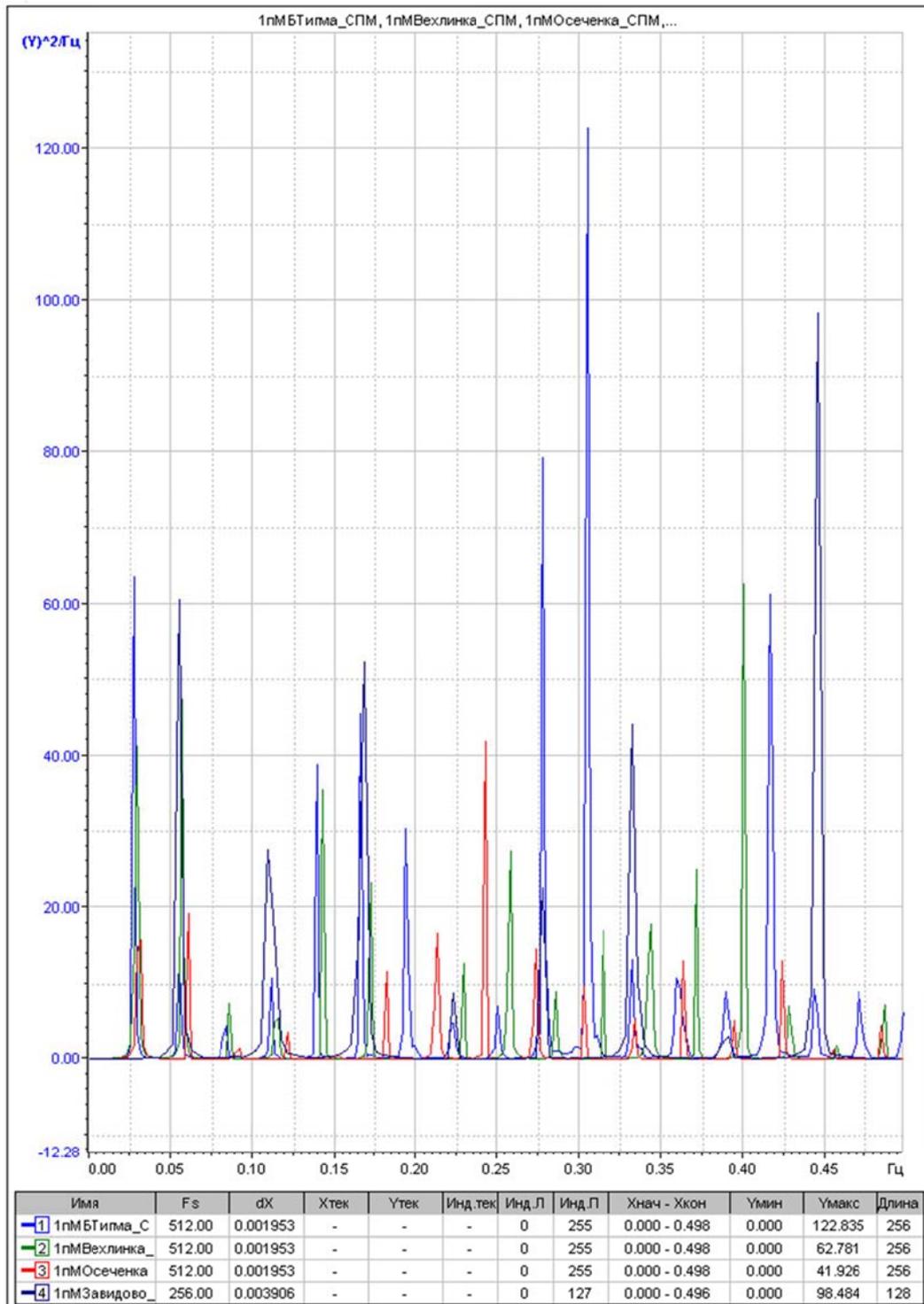


Рисунок 3.8 – Спектральный анализ силовых неровностей пути, полученных при обследовании участков пути на Октябрьской железной дороге

Смоделируем проход подвижного состава по участку неравножесткости и проверим, какие длины неровностей пути возникают из-за колебаний кузова на рессорах. Совпадение длин неровностей, полученных в ходе моделирования, с длинами неровностей, измеренных экспериментально, подтвердит гипотезу о том,

что длинные неровности пути на подходах формируются в основном за счет колебаний кузова на рессорах, а также дополнительно подтвердит адекватность расчетных данных.

Поскольку просадки пути под локомотивами больше, чем под пассажирскими вагонами из-за разницы в осевых нагрузках, был смоделирован проход по участку неравножесткости локомотивов ЧС2, ЧС7 и ЧС200, со скоростями, близкими установленным на момент обследования – 144 и 160 км/ч. В ходе моделирования были зафиксированы длины неровностей пути за зоной сопряжения, которые развивались при пропуске поездной нагрузки. Результаты моделирования представлены в виде диаграммы на рисунке 3.9.

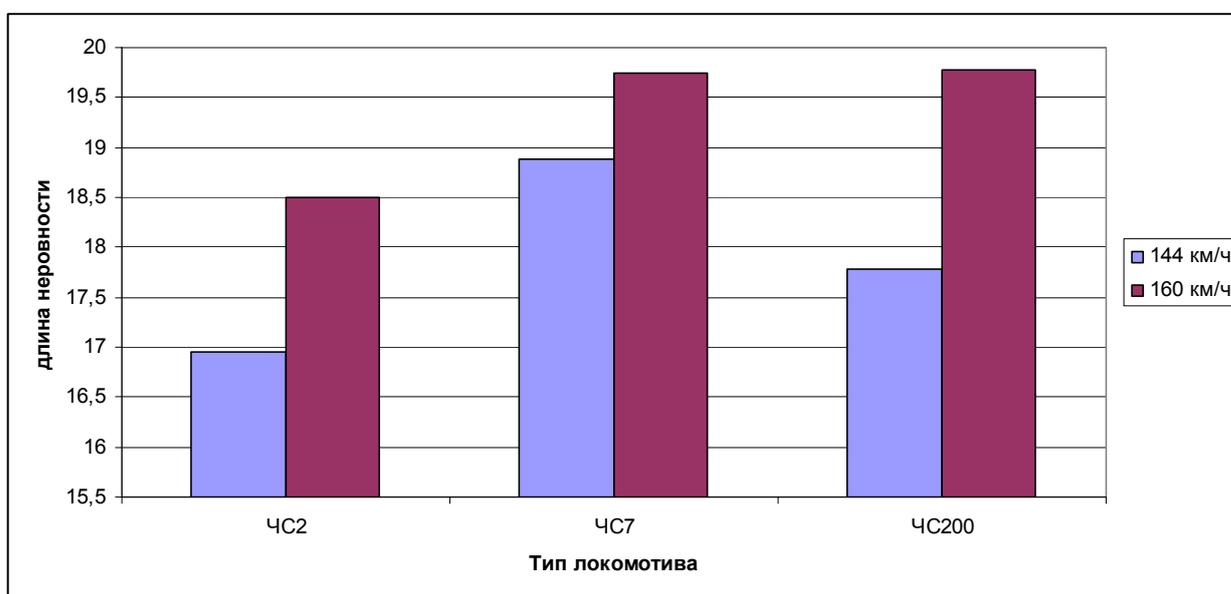


Рисунок 3.9 – Длины неровностей пути, полученные в ходе моделирования

Как видно из рисунка, полученные длины неровностей лежат в диапазоне 16,9÷19,8 м, при скоростях движения от 144 до 160 км/ч, что соответствует измеренным длинам неровностей 18,2 м с разбросом $\pm 10\%$. Данные результаты свидетельствуют о верности принятой гипотезы и об адекватности данных, полученных расчетным путем.

На фотографиях, представленных на рисунках 3.10 и 3.11, отчетливо видно, что остаточные деформации на подходах к ИССО имеют периодический характер, а длина неровностей соответствует определенному периоду.



Рисунок 3.10 – Фото неровностей на подходе к мосту через реку Осеченку на Октябрьской железной дороге



Рисунок 3.11 – Фото неровностей на подходе к мосту через реку Шошу на Октябрьской железной дороге

На величину вертикальных ускорений кузова подвижного состава главным образом оказывает влияние величина возмущающего фактора, в нашем случае – величина перепада модуля упругости пути. Из этого можно сделать вывод о том, что величина вертикальных ускорений кузова зависит от величины силовых неровностей пути в зоне сопряжения. При одинаковом перепаде модуля упругости пути величина ускорений подвижного состава будет больше на пути с меньшим значением модуля упругости, из-за того, что наибольшие силовые неровности возникают при сопряжении земляного полотна и ИССО с меньшими модулями упругости из-за больших прогибов рельсов.

Собственная частота колебаний кузова подвижного состава величина постоянная и зависит от жесткости комплекта рессор и массы кузова. Известна обобщенная формула определения собственной частоты колебаний системы без учета демпфирования [68]:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{жс}{m}} , \quad (3.1)$$

где $жс$ – жесткость системы;

m – масса.

Из формулы (3.1) следует, что чем больше жесткость системы, тем больше частота ее собственных колебаний, но так как жесткость однотипного подвижного состава – величина в принципе постоянная и зависит от жесткости подвешивания кузова, значит, мы можем сделать вывод о том, что частота собственных колебаний, а следовательно, и длина неровности, вызванная колебаниями кузова на рессорах, будет изменяться только при изменении массы кузова, причем при увеличении массы длина неровности будет возрастать.

Если предположить, что по участку неравножесткости проходит однотипный подвижной состав с одинаковыми параметрами колебаний кузова, то длина неровности, вызванная этими колебаниями, будет зависеть только от скорости движения. Однако по участку сопряжения может проходить подвижной состав различных типов и с различными массами кузова и скоростями движения. Целесообразно устанавливать длину УПЖ с учетом наибольшей скорости движения и наибольшим периодом колебаний, так чтобы длина УПЖ была не меньше длины, равной произведению скорости движения на половину периода колебаний кузова. Таким образом, критерий по определению минимальной длины участка переменной жесткости можно выразить в виде формулы

$$L_{\text{УПЖ}} \geq \frac{T_k}{2} v \quad (3.2)$$

где $L_{\text{УПЖ}}$ – длина участка переменной жесткости, на котором устраивается отвод жесткости и деформативности;

T_k – период колебаний кузова подвижного состава;

v – скорость движения;

или через частоту собственных колебаний кузова:

$$L_{\text{впдж}} = \frac{v}{\pi} \sqrt{\frac{m}{\text{ж}}} \quad (3.3)$$

Для подтверждения этой гипотезы также было проведено обследование моста через реку Клязьму на Московской железной дороге, в ходе которого проведена съемка микропрофиля рельса через 2,5 м. Результаты нивелировки представлены на рисунке 3.12.

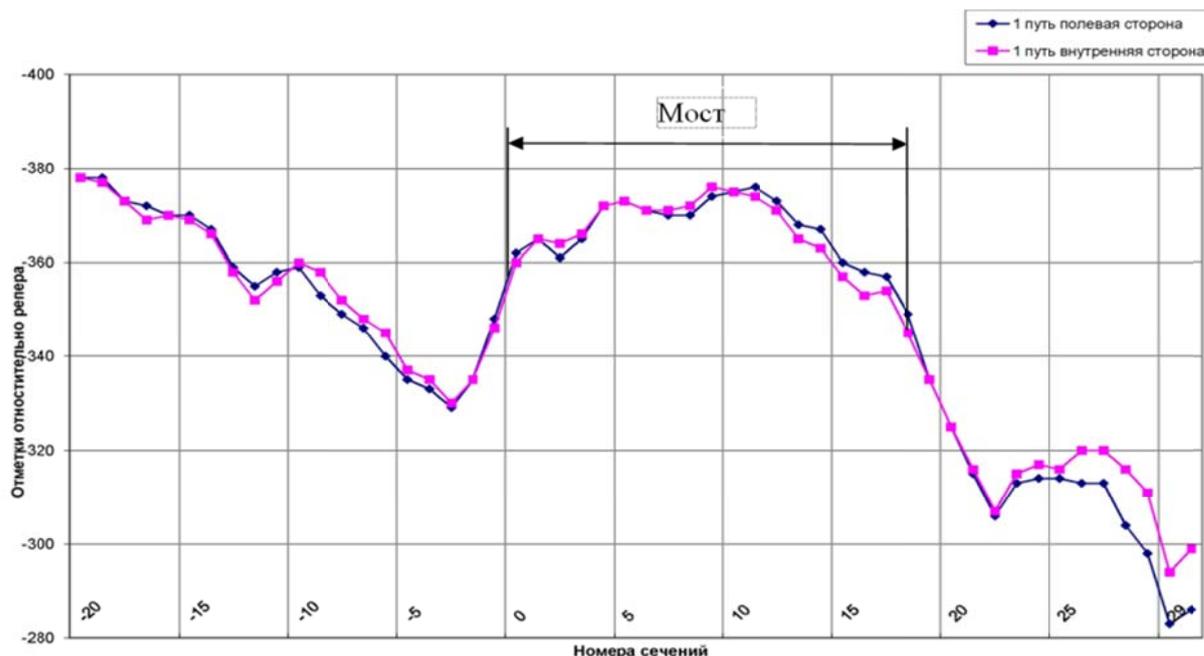


Рисунок 3.12 – Нивелировка микропрофиля рельса на подходах к мосту через реку Клязьму

Направление движения поездов по данному пути 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 точкой 0. 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 данные свидетельствуют о том, что периодические неровности пути на подходах к ИССО при съезде развиваются синфазно колебаниям кузова подвижного состава, а длины переходных участков следует назначать с учетом этих колебаний. Полученные результаты также свидетельствуют об адекватности расчетной модели в рамках решаемой задачи.

3.4 Определение параметров эксплуатации пути, в наибольшей степени влияющих на интенсивность развития остаточных деформаций в зоне сопряжения

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 3.13 приведена расчетная зависимость величины остаточных деформаций от пропущенного тоннажа при различной осевой нагрузке. Скорость движения принята 100 км/ч, перепад модуля упругости – 25÷65 МПа.

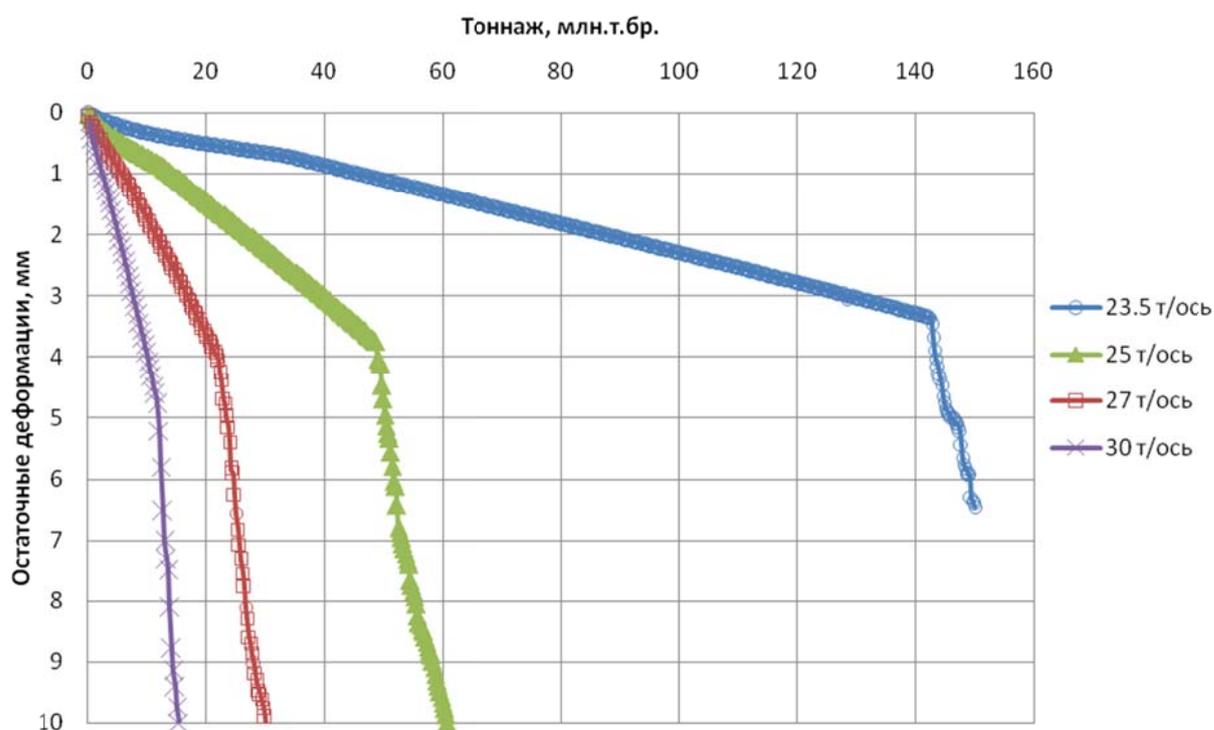


Рисунок 3.13 – Зависимость величины остаточных деформаций от пропущенного тоннажа при различных нагрузках на ось

Как видно из рисунка 3.13, при осевой нагрузке 23,5 т остаточные деформации пути развиваются с наименьшей интенсивностью 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 3.13 отчетливо виден «перелом» графиков при накоплении определенной остаточной деформации. Резкое увеличение интенсивности накопления остаточных деформаций вызвано тем, что в процессе развития периодической неровности на подходе к ИССО достигается такая её 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 3.14 показаны графики колебаний неподрессоренных масс при пропуске 21,6 и 22,7 млн. т бр. при остаточной деформации 3,9 и 4,4 мм соответственно.

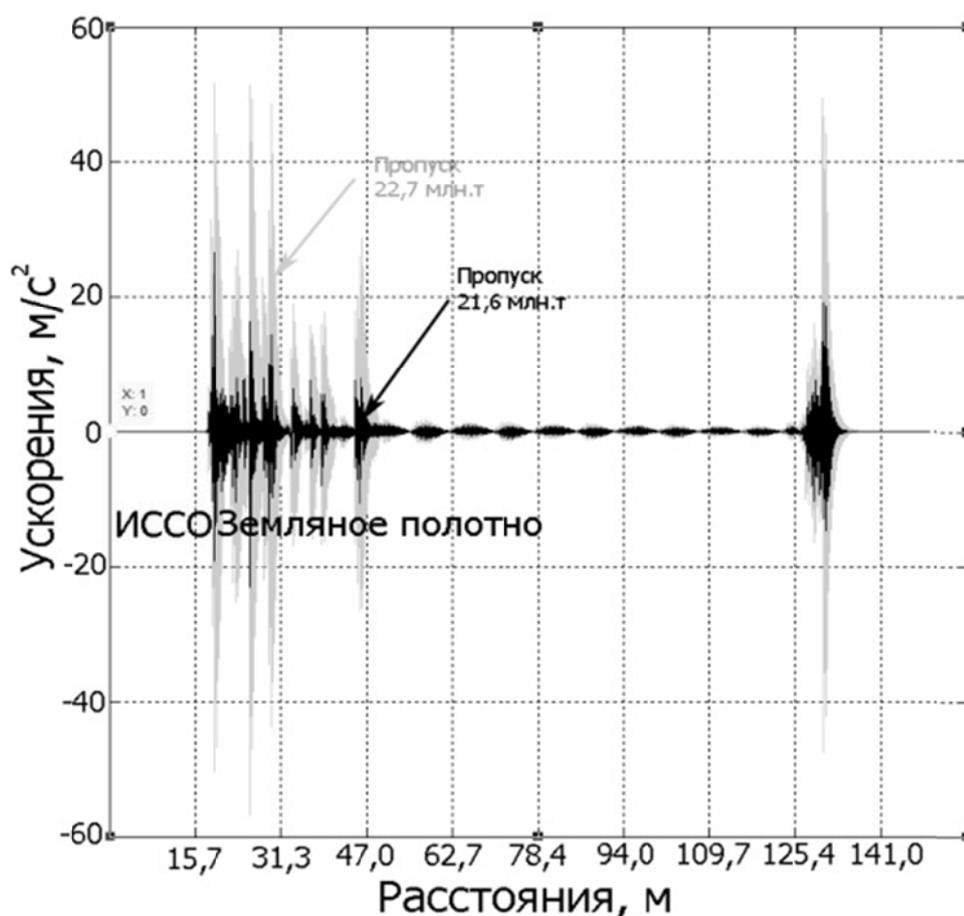


Рисунок 3.14 – Графики колебаний неподрессоренных масс при достижении остаточных деформаций 3,9 и 4,4 мм

Величина неровности, при которой возникают колебания неподрессоренных масс, зависит от скорости движения, осевых нагрузок и параметров экипажа.

В ходе проверки реакции модели установлено, что значительное возбуждение неподдресоренных масс подвижного состава происходит при неровностях глубиной от 2,9 до 4,5 мм.

По результатам моделирования получена зависимость интенсивности накопления остаточных деформаций от осевой нагрузки, которая представлена на рисунке 3.15. Для определения интенсивности накопления остаточных деформаций были получены деформации, которые развиваются при пропуске 10 и 20 млн. т бр., так как при таких наработках зависимость накопления остаточных деформаций от пропущенного тоннажа линейна для всех осевых нагрузок.

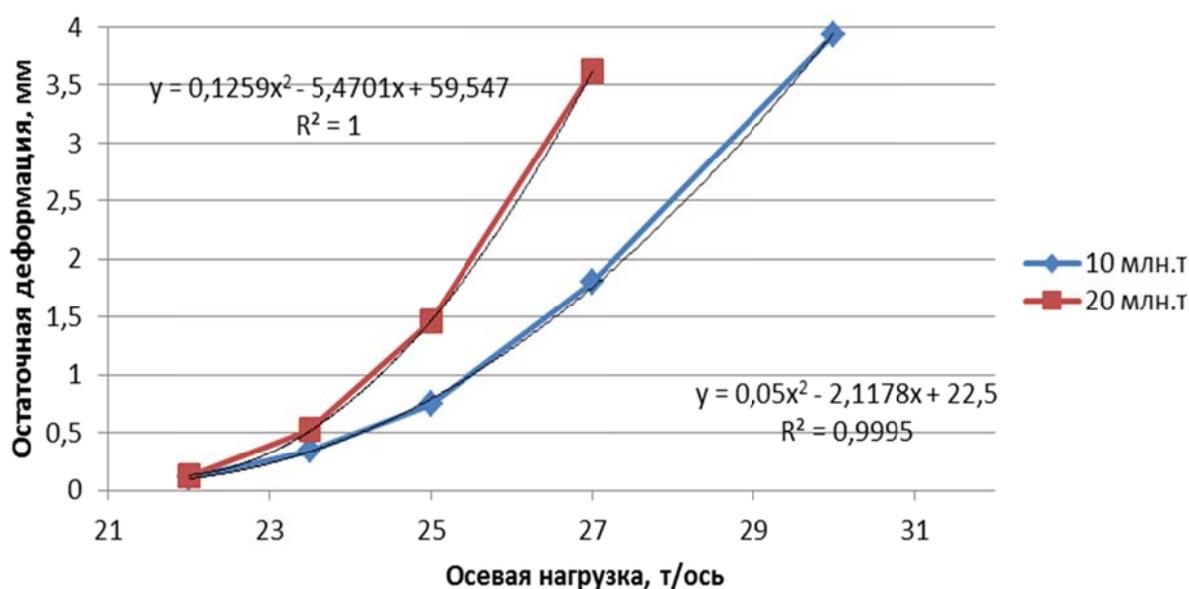


Рисунок 3.15 – Зависимость интенсивности накопления остаточных деформаций от осевой нагрузки

Аппроксимация зависимости величины остаточной деформации от осевой нагрузки показала, что эта зависимость наиболее близка к квадратической с достоверностью аппроксимации 0,9995.

По результатам моделирования установлено, что на скорость развития остаточных деформаций также существенно влияет величина модуля упругости на пути, подверженного накоплению остаточных деформаций. На рисунке 3.16 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.

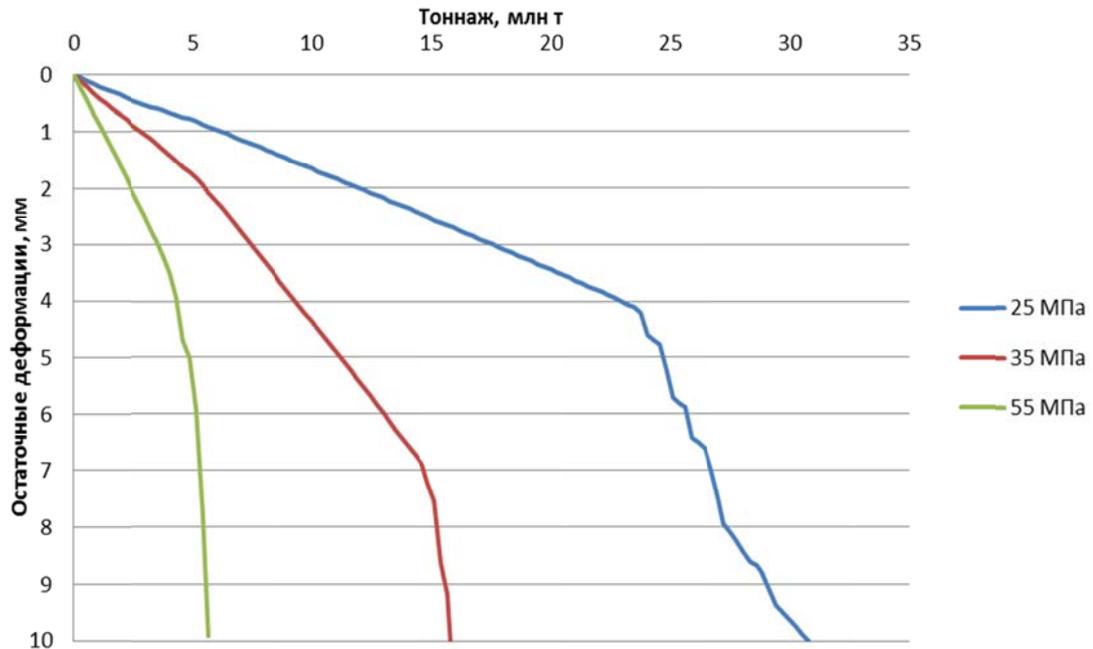


Рисунок 3.16 – Зависимость остаточных деформаций от пропущенного тоннажа при различных модулях упругости пути на земляном полотне

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 был существенно больше [37, 38].

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, показанные на рисунке 3.16 справедливы только в том случае, если способность к накоплению остаточных деформаций пути в каждом случае одинакова.

Скорость движения оказывает влияние на развитие остаточных деформаций, однако это влияние по сравнению с влиянием осевых нагрузок и величинами модуля упругости на земляном полотне значительно ниже. Зависимости величин остаточных деформаций от пропущенного тоннажа при различных скоростях движения (осевая нагрузка 30 т) представлены на рисунке 3.17.

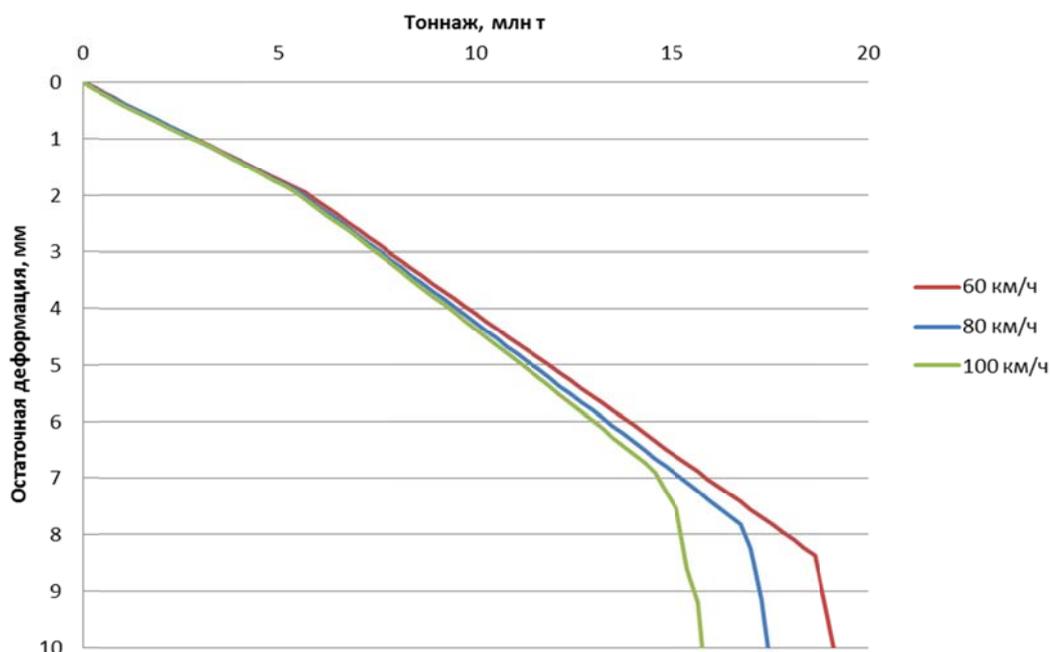


Рисунок 3.17 – Зависимости величин остаточных деформаций от пропущенного тоннажа при различных скоростях движения

Малое влияние скорости движения поездов на интенсивность развития остаточных деформаций объясняется, прежде всего, тем, что наибольшие динамические добавки, которые зависят от скорости движения, возникают в зоне влияния колебаний неподрессоренных масс. Однако, как было показано выше, с ростом остаточных деформаций нагрузки на элементы ВСП перераспределяются, и уменьшается влияние скорости движения поездов на интенсивность развития остаточных деформаций.

3.5 Выводы по главе 3

1. Основной причиной возникновения и развития предмостовых ям является свойство пути, уложенного на земляном полотне и балласте, накапливать остаточные деформации. Предмостовые ямы развиваются даже при отсутствии перепада модуля упругости пути.

2. Величина перепада модуля упругости пути в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО оказывает влияние на накопление остаточных деформаций пути лишь в непосредственной близости от зоны сопряжения, и это влияние с пропуском поездной нагрузки снижается за счет «вывешивания» ближайшей к ИССО шпалы и распределения нагрузок на большее количество подрельсовых опор.

3. Результаты математического моделирования совпадают с результатами инструментального обследования пути в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО, что говорит об адекватности расчетных данных.

4. Предмостовые ямы развиваются синфазно колебаниям кузова подвижного состава.

5. Длину переходного участка следует устанавливать в зависимости от скоростей движения и периода колебаний кузова подвижного состава.

6. Накопление остаточных деформаций отличается на въезде и съезде с ИССО как по характеру, так и по амплитудам.

7. Главными факторами, влияющими на интенсивность развития предмостовых ям, являются масса кузова и величина модуля упругости пути, подверженного накоплению остаточных деформаций.

8. Зависимость интенсивности развития остаточных деформаций и осевых нагрузок близка к квадратической.

4 РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ КОНСТРУКЦИИ ПУТИ В ЗОНЕ СОПРЯЖЕНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА И ИСКУССТВЕННОГО СООРУЖЕНИЯ

4.1 Выбор параметров пути в зоне сопряжения на основе проведенного математического моделирования

В предыдущей главе было определено, при каких условиях эксплуатации пути остаточные деформации развиваются наиболее интенсивно. Рассмотрим, при каких параметрах конструкции пути в зоне сопряжения можно добиться наибольшей стабильности пути и избавиться от периодических выправок во время текущего содержания.

Исследования, проведенные в предыдущей главе, показали основные параметры, которые влияют на интенсивность развития предмостовых ям. Среди них следует отметить следующие факторы:

- масса кузова;
- прочность элементов пути, подверженных накоплению остаточных деформаций;
- модуль упругости пути, подверженного накоплению остаточных деформаций;
- неравножесткость пути по его длине.

Рассмотрим, какими из указанных параметров можно управлять, и какие их значения будут наиболее оптимальными с точки зрения стабильности пути в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО.

Осевые нагрузки. Как показало проведенное математическое моделирование, наиболее интенсивно остаточные деформации развиваются при высоких осевых нагрузках. С другой стороны, в настоящее время приоритетной целью развития грузовых перевозок является повышение осевых нагрузок до 27 т и в перспективе – до 30 т [1]. Поэтому они являются управляющим параметром, от которого будет зависеть конструкция пути.

Прочность элементов пути, подверженных накоплению остаточных деформаций можно охарактеризовать несущей способностью основной площадки земляного полотна и прочностью балласта. В первой главе были рассмотрены наиболее широко применяемые УПЖ, а также ряд мероприятий по повышению прочности балластной призмы по мере приближения к ИССО. На наш взгляд, указанные конструкции обеспечивают достаточное упрочнение земляного полотна на подходах к ИССО и необходимы для стабильной работы земляного полотна. Сравнение качества работы этих участков и выбор наиболее рациональной конструкции с технико-экономической точки зрения выходит за рамки настоящего исследования и подлежит дальнейшей проработке. С другой стороны, в первой главе было показано, что укладка УПЖ в теле земляного полотна положительно влияет на снижение интенсивности накопления остаточных деформаций пути. Поэтому в дальнейшем мы рекомендуем обязательную укладку УПЖ в части снижения остаточных деформаций земляного полотна.

Проведенное математическое моделирование показало, что при повышении осевых нагрузок величина остаточных деформаций в балластной призме существенно возрастает, поэтому необходимо проводить мероприятия по ее упрочнению. Зарубежный опыт свидетельствует, что такое упрочнение можно обеспечить за счет обработки балластного материала полимерным вяжущим материалом [69]. Этот процесс в отечественной практике принято называть «омоноличиванием балластной призмы». Применяя омоноличивание, можно достичь склеивания частиц балластного материала и таким образом обеспечить достаточную стабильность балластной призмы. Следует заметить, что необходимо устраивать постепенное снижение деформативности балластной призмы, так чтобы не возникала ситуация, когда достаточно прочная балластная призма, обработанная вяжущим материалом, сопрягалась с необработанной, что чревато возникновением предмостовой ямы, только отодвинутой от ИССО. Такое постепенное изменение деформативности балластной призмы можно обеспечить за счет изменения глубины и ширины обработки балластной призмы по ее длине.

Модуль упругости пути, подверженному накоплению остаточных деформаций. В параграфе 3.4 и на рисунке 3.16 было показано, что при больших значениях модуля упругости пути, подверженному накоплению остаточных деформаций, их интенсивность увеличивается. Однако эта зависимость справедлива только в том случае, если все осадки пути формируются только в балластном слое, а земляное полотно прочное и практически не накапливает остаточные деформации.

В настоящее время для повышения осевых нагрузок и скоростей движения на путях общего пользования для усиления земляного полотна все более широко применяют защитные слои [70–75]. Принцип их устройства заключается в замене верхней части земляного полотна, где располагаются грунты с недостаточной несущей способностью, более прочной щебеночно-гравийно-песчаной смесью. Типовая конструкция защитного слоя представлена на рисунке 4.1 [74].

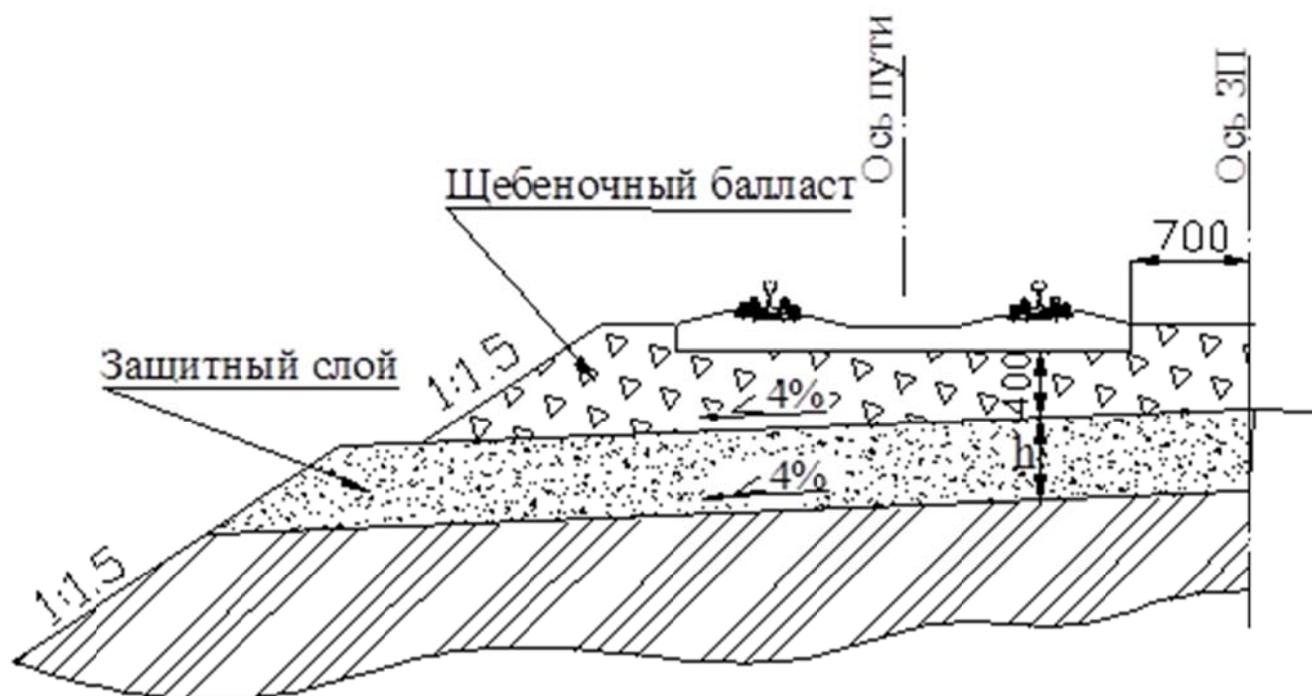


Рисунок 4.1 – Типовая конструкция защитного слоя

Благодаря устройству защитных слоев увеличивается несущая способность основной площадки, однако модуль упругости пути возрастает [70].

Возникает техническое противоречие, поскольку, с одной стороны, для увеличения стабильности пути устраивают защитные слои и увеличивают модуль его упругости, с другой стороны, результаты математического моделирования показывают (параграф 3.4), что более эффективно снижать модуль упругости пути для уменьшения интенсивности накопления остаточных деформаций. Данное техническое противоречие снимается, если рассмотреть подробно, за счет чего формируется модуль упругости пути. В [76] дано принятое в настоящее время определение: «Модуль упругости рельсового основания U численно равен равномерно распределенной реакции основания, возникающей на единицу длины рельса при упругой осадке основания, равной единице». В свою очередь, упругая осадка основания складывается, в том числе, и из упругих деформаций земляного полотна. Величина упругих деформаций земляного полотна была впервые экспериментально определена Г.Г. Коншиным [77, 78], которые, по его данным, могут достигать значений до 2,02 мм под четырехосными и восьмиосными грузовыми полувагонами. При устройстве защитных слоев упругие деформации земляного полотна снижаются, соответственно, повышается модуль упругости пути, однако прочность основной площадки увеличивается. В результате снижается величина остаточных деформаций в земляном полотне и, как следствие, повышается стабильность пути. Рассмотрим, как влияет величина модуля упругости пути на напряжения в балластном слое.

Напряжения под шпалой определяют по формуле [79]

$$\sigma_{\omega} = \frac{Q}{\omega},$$

где Q – сила, действующая на шпалу;

ω – опорная площадь полушпалы с поправкой на изгиб.

Силу, действующую на шпалу определяют по формуле [79]

$$Q = \frac{kl_m}{2} P,$$

где k – коэффициент относительной жесткости рельса;

l_m – расстояние между осями шпал;

P – нагрузка от колеса или системы колес.

В свою очередь, коэффициент относительной жесткости определяется [79] по формуле

$$K = \sqrt[4]{\frac{U}{4EI}}.$$

Соответственно, чем меньше модуль упругости пути, тем меньше нагрузка на отдельно взятую опору и, следовательно, меньше нагрузка на балласт и основную площадку земляного полотна. Таким образом, снижение модуля упругости позволит снизить нагрузки на элементы, подверженные накоплению остаточных деформаций, а применение защитных слоев – повысить прочность земляного полотна [80]. Поэтому снижение модуля упругости пути необходимо выполнять за счет применения различных упругих элементов в конструкции ВСП [81, 82], а не снижения модуля деформации земляного полотна или балластной призмы.

Целесообразность снижения модуля упругости пути на безбалластных конструкциях пути типа Rheda 2000 показывают исследования немецких ученых [85]. В данной работе рассматривается необходимость распределения сил от колеса на рельс на большее количество опор с целью ограничения нагрузок на ВСП от подвижного состава. Данные рекомендации базируются на сравнении нагрузок на путь от подвижного состава и параметров его стабильности на скоростных магистралях пути традиционной конструкции, усиленной защитным слоем с различными параметрами жесткости.

Проведенное в главе 3 математическое моделирование позволило установить, что величина неравножесткости не имеет принципиального значения для формирования предмостовых ям и интенсивность их развития. Однако труды многих ученых показывают [81–85], что при неравномерной нагрузке на отдельные элементы ВСП возникает их преждевременный выход из строя. Прежде всего, это относится к упругим прокладкам в узлах скрепления. Поэтому в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО необходимо стремиться исключить возникновение сопряжения конструкций с разными модулями упругости. Такими местами могут быть при сопряжении земляного полотна с мостом [86]:

– земляное полотно и устой моста;

- путь над шкафным блоком устоя и мауэрлатным брусом;
- мауэрлатный брус и пролетное строение;
- путь в зоне опирания пролетных строений на опоры моста.

При сопряжении земляного полотна с тоннелями или безбалластным путем таким участком является непосредственно место сопряжения двух конструкций пути.

Таким образом, для обеспечения наибольшей стабильности пути в зоне сопряжения к нему выдвигаются следующие требования [87]:

- снижение деформативности земляного полотна и балластной призмы по мере приближения к ИССО;
- устранение перепадов модуля упругости пути за счет снижения его на ИССО до величин на земляном полотне.

Рассмотрим, при помощи каких мероприятий можно достичь таких параметров конструкции пути в зоне сопряжения.

4.2 Разработка мероприятий по совершенствованию конструкции пути в зоне сопряжения

Балластный слой и основная площадка земляного полотна в зоне сопряжения нуждается в дополнительном усилении. Существует ряд методов усиления балластной призмы [88–91]:

- увеличение ее толщины;
- укладка геосинтетических материалов;
- обработка вяжущим материалом;
- применение подшпальных прокладок;
- применение подбалластных матов.

Из указанных мероприятий только обработка вяжущим материалом увеличивает прочность балластного слоя под шпалой, другие же мероприятия перераспределяют нагрузки в балластном слое. Существуют три принципиально разных способа обработки:

- методом проливки балластного слоя;

- методом принудительного перемешивания;
- инъектирование.

С технологической точки зрения гораздо выгоднее проливка вяжущим материалом, поскольку для ее применения не нужна специальная техника, при помощи которой будут смешиваться балластный материал и вяжущий материал. Однако с технической точки зрения такой метод менее выгоден, т.к. вяжущий материал может не проникать на достаточную глубину, в результате нельзя точно определить глубину обработки балластной призмы. В случае применения вяжущего материала, который способен проникнуть на большую глубину за счет своей низкой вязкости, возникает угроза того, что большая его часть окажется на основной площадке земляного полотна, а сама балластная призма будет практически не обработана. Все это говорит о том, что метод проливки не может гарантировать одинаковой степени обработки балластной призмы по глубине, а также качество обработки.

При проливке балластной призмы с уложенной рельсошпальной решеткой вяжущий материал не сможет проникнуть в подшпальную зону [92], где возникают наибольшие напряжения в балласте. Схематично это представлено на рисунке 4.2.

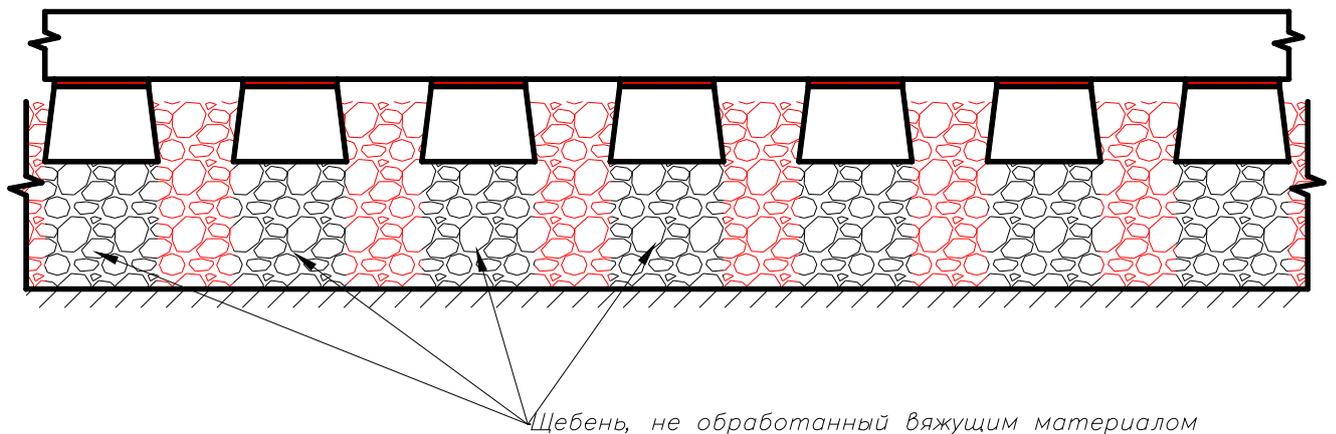


Рисунок 4.2 – Схема обработки вяжущим материалом балластной призмы пути с уложенной рельсошпальной решеткой

Поэтому с технической точки зрения гораздо выгоднее метод принудительного перемешивания балласта с вяжущим материалом. Такой способ гарантирует одинаковую обработку всего балласта и возможность контролировать толщину обработки балластной призмы.

Помимо этого, при достаточно длительной эксплуатации балластной призмы, обработанной вяжущим материалом, связи между зернами щебня могут разрушаться, в результате возможны прогрессирующие осадки балластной призмы. Поэтому целесообразно проводить уплотнение балласта, обработанного вяжущим материалом, до его затвердения [92].

Исключение перепадов модуля упругости пути и его снижение до значений, близких к значениям на земляном полотне в зоне сопряжения сводится к задаче выбора места расположения упругих элементов и их характеристик.

Наиболее экономичным и простым с технической точки зрения было бы располагать в узлах промежуточных скреплений прокладки повышенной упругости. Однако в работах В.Б. Каменского [93] показано, что ресурс узла промежуточного рельсового скрепления практически полностью исчерпан с точки зрения дальнейшего снижения жесткости пути. Поскольку при дальнейшем снижении жесткости пути за счет уменьшения модуля упругости прокладок в узле промежуточного скрепления уменьшится срок службы металлических частей. Поэтому необходимо снижать модуль упругости пути за счет применения упругих элементов вне узла промежуточного скрепления.

Наиболее полно классификация расположения упругих элементов в конструкции ВСП изложена в [94], которая приведена на рисунке 4.3. Данная классификация разработана с точки зрения виброгашения в безбалластном пути метрополитена, однако согласно этой классификации можно подобрать тип упругих элементов и их расположение в конструкции пути так, чтобы, с одной стороны, не уменьшать модуль упругости пути в узле промежуточного скрепления, с другой стороны, общая жесткость пути будет соответствовать условиям работы конструкции.

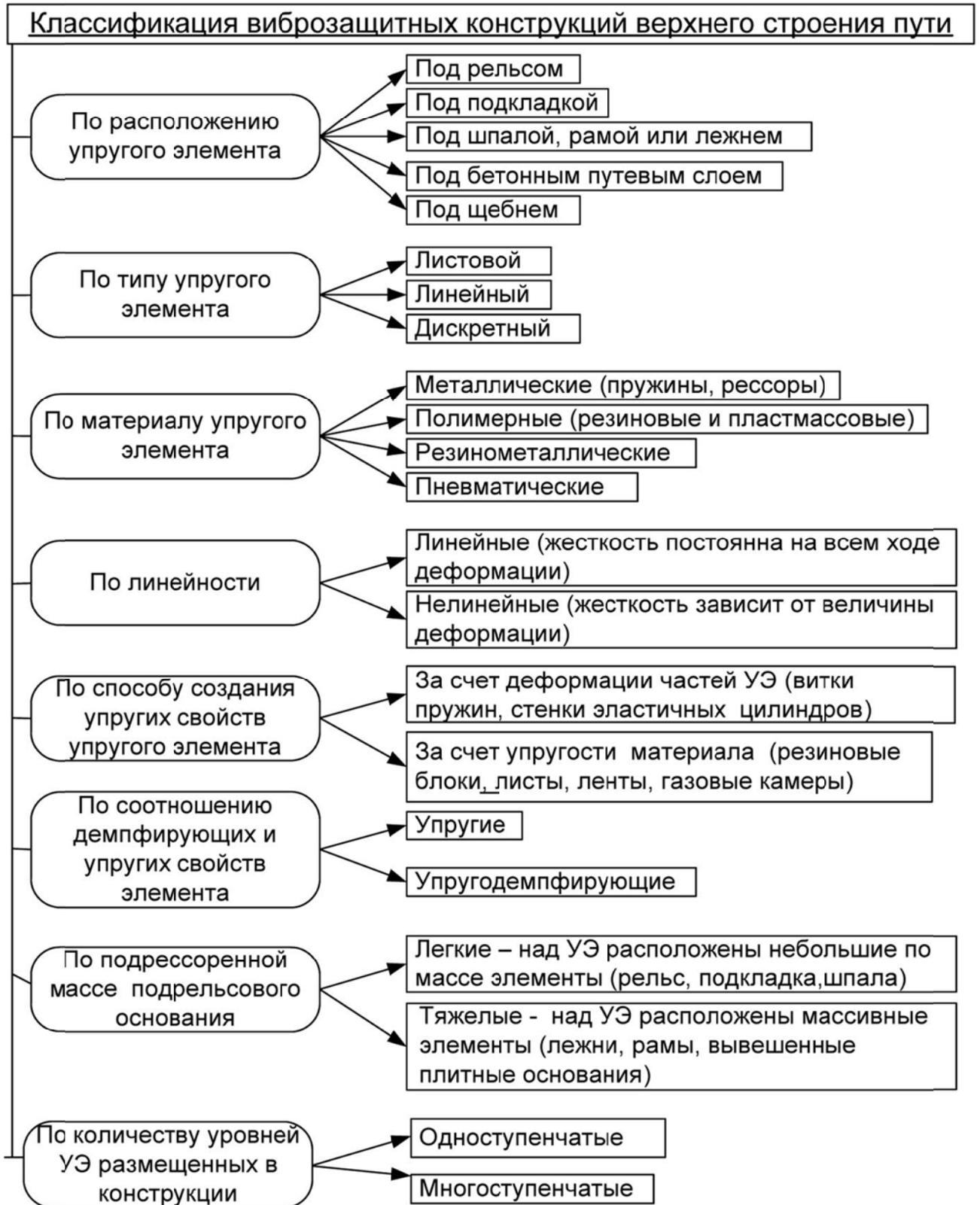


Рисунок 4.3 – Классификация виброзащитных конструкций ВСП по способу обеспечения виброзащитных свойств (УЭ – упругий элемент)

Жесткость пути и, соответственно, модуль упругости пути на ИССО зависят от жесткости элементов его конструкции, жесткостные свойства которых определяются, прежде всего, модулями упругости материалов из которых они состоят, и в некоторых случаях их формой и размерами (рифленые прокладки, упругие клеммы и т.п.). За исключением упругих прокладок в пути применяют материалы с модулем упругости выше 4×10^4 МПа: природный и искусственный камень, бетон и железобетон, сталь. Таким образом, модуль упругости пути на ИССО в основном определяется жесткостными характеристиками упругих элементов пути. К ним относятся: упругие подрельсовые прокладки, подшпальные прокладки, подбалластные маты, упругие элементы системы «масса – пружина».

Из многообразия безбалластных конструкций пути и опыта применения виброзащитного пути на балласте в тоннеле можно выделить следующие 6 принципиальных конструктивных типов верхнего строения пути на ИССО и устоях мостов и, соответственно, принципы снижения жесткости пути в зависимости от его конструкции.

Принципиальные схемы конструкций пути приведены на рисунках 4.4 – 4.9.

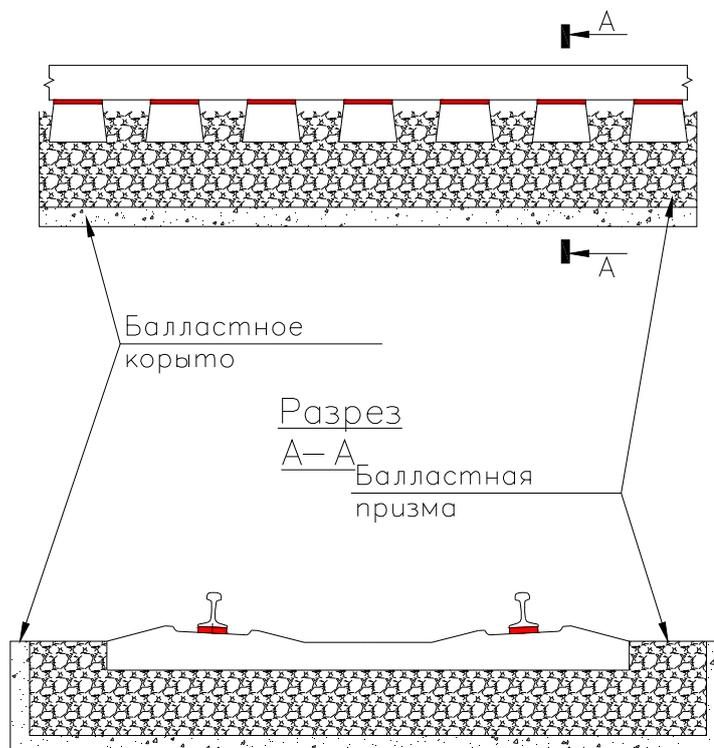


Рисунок 4.4 – Тип 1. Железобетонные шпалы с упругими промежуточными скреплениями в балластном корыте. Применяется на мостах с балластным корытом, в тоннелях, а также на устоях мостов

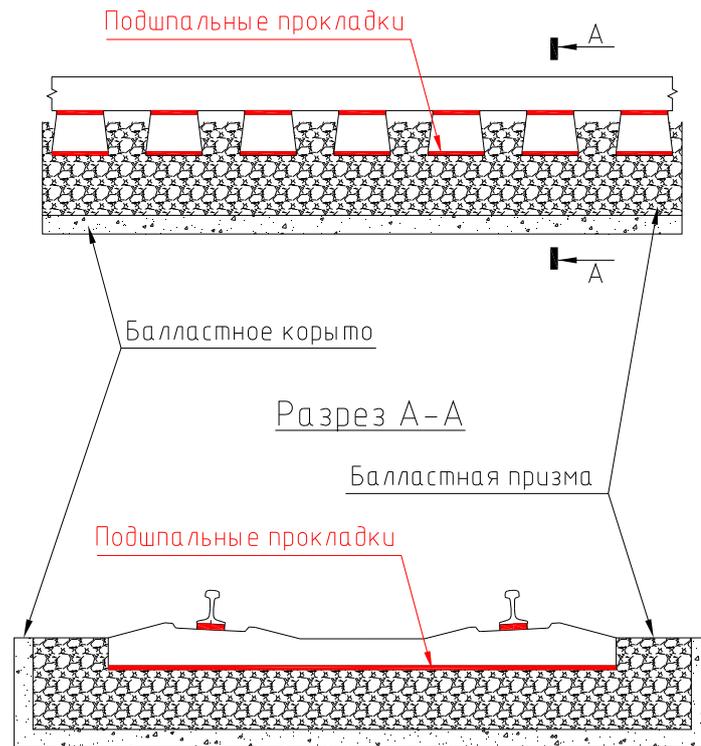


Рисунок 4.5 – Тип 2. Железобетонные шпалы с упругими промежуточными креплениями и подшпальными прокладками

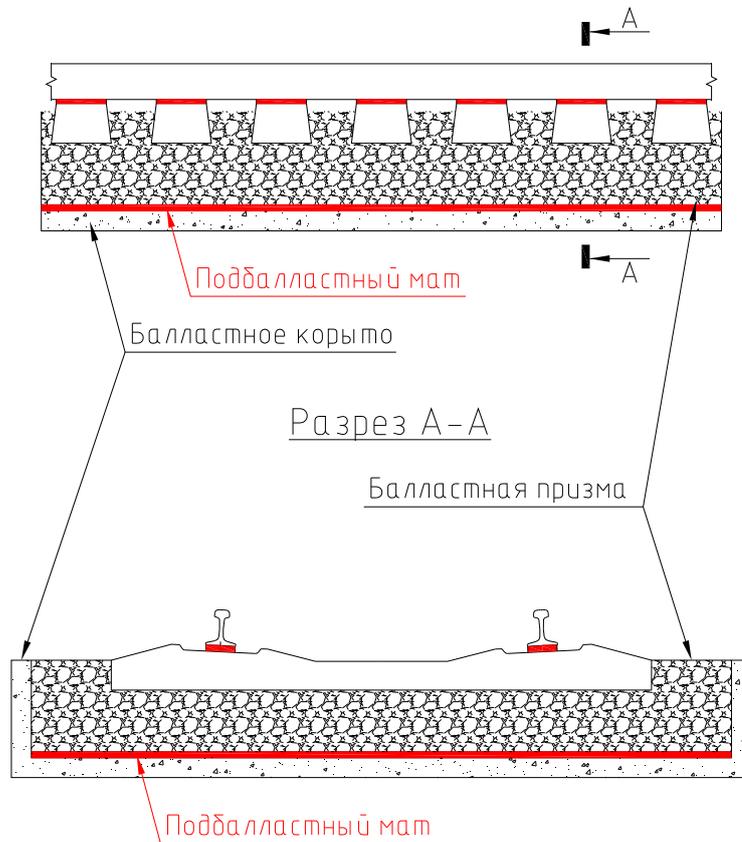


Рисунок 4.6 – Тип 3. Железобетонные шпалы с упругими промежуточными креплениями. Балластная призма на подбалластном мате

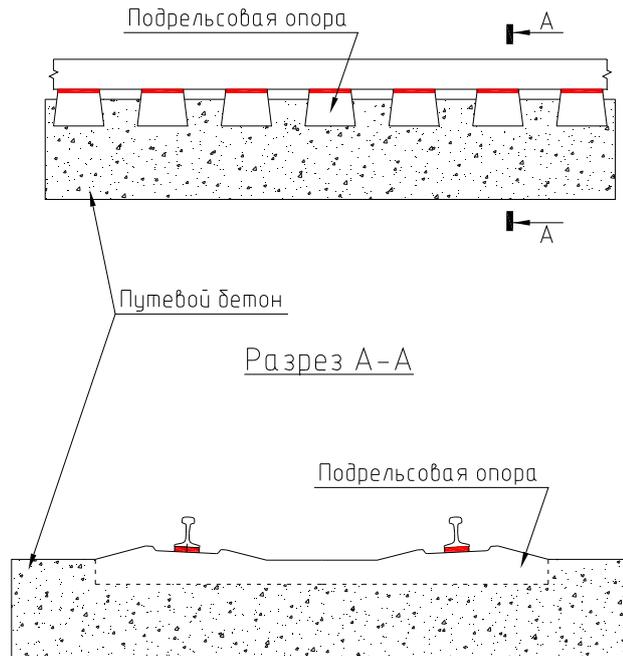


Рисунок 4.7 – Тип 4. Безбалластный путь с омоноличенными в путевом бетоне подрельсовыми опорами с типовыми упругими промежуточными скреплениями без специальных мероприятий по снижению его жесткости. На мостах аналогом этой конструкции является путь на деревянных поперечинах и БМП с прокладным слоем из мелкозернистого бетона

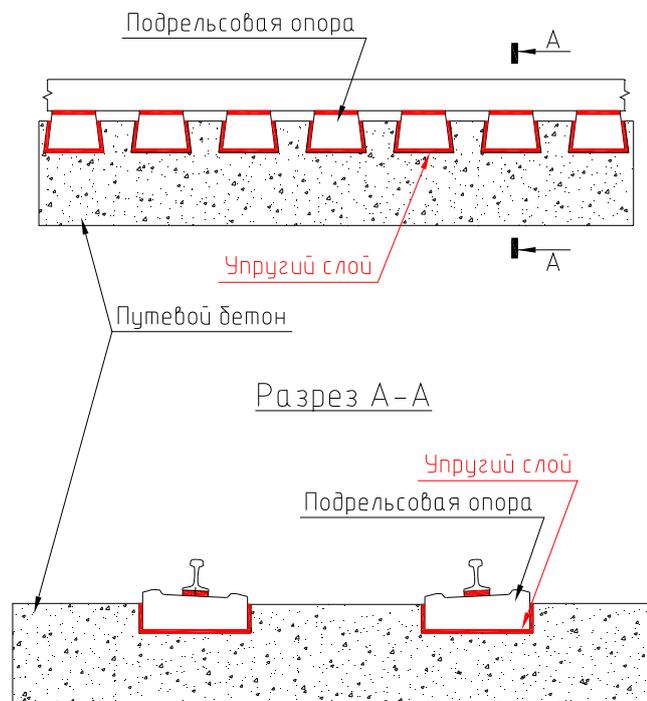


Рисунок 4.8 – Тип 5. Безбалластный путь с подрельсовыми опорами, омоноличенными в путевом бетоне через упругий слой с расчетной (пониженной) жесткостью

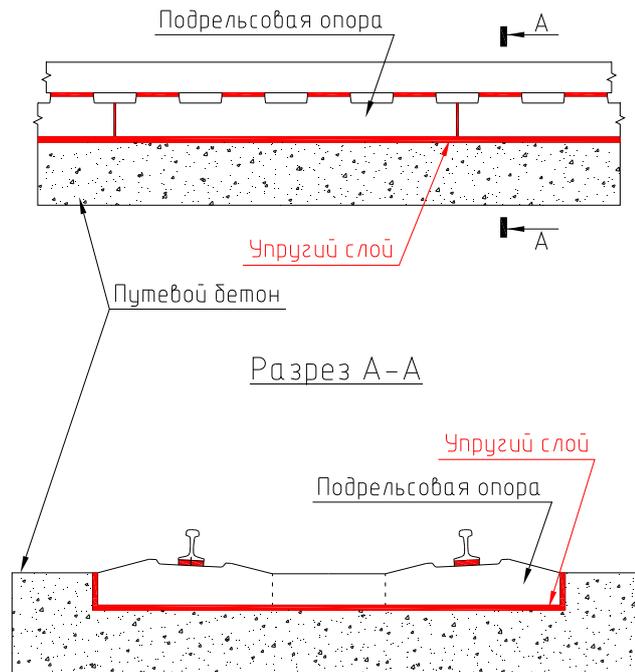


Рисунок 4.9 – Тип 6. Безбалластный путь с расчетной (пониженной) жесткостью с расположением упругого элемента под плитами (на мостах это конструкция БМП с упругим прикреплением) или рамами

С другой стороны, как бы ни уменьшалось давление на балласт и основную площадку земляного полотна за счет снижения модуля упругости пути, полностью предупредить развитие остаточных деформаций при существующих и перспективных нагрузках на путь не представляется возможным. Поэтому необходимо увеличить прочность элементов, подверженных накоплению остаточных деформаций в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО. На подходах к ИССО этого можно добиться за счет применения различных конструкций участков УПЖ. Однако для предотвращения увеличения модуля упругости пути, и, как следствие, сил, действующих на шпалу, на УПЖ необходимо укладывать подшпальные прокладки, которые компенсируют уменьшение упругой осадки рабочей зоны земляного полотна. Упрочнение балластных материалов, расположенных на устое мостов, можно осуществлять за счет применения вяжущего материала.

На основе всего вышеуказанного определим мероприятия, которые необходимо проводить для повышения стабильности пути в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО.

Зона пути на земляном полотне. В этой зоне предполагается укладка защитных слоев, при необходимости, согласно действующей инструкции [74].

Зона переменной жесткости или УПЖ. По длине данного участка необходимо укладывать УПЖ известных конструкций, в соответствии с особенностями конкретного объекта, для плавного снижения деформативности пути на подходе к ИССО. По длине УПЖ необходимо укладывать подшпальные прокладки различной жесткости, так чтобы компенсировать уменьшение упругой просадки рабочей зоны земляного полотна.

Зона устоя. В этой зоне следует применять упругие подшпальные прокладки для снижения «естественной» жесткости пути, а также увеличивать прочность балластных материалов, например за счет применения вяжущего материала.

Зона мауэрлатного бруса. Длина этой зоны ограничивается непосредственно самим брусом, под который необходимо укладывать упругие элементы, жесткость которых необходимо определить расчетом.

Безбалластный путь на ИССО. На самом ИССО необходимо снижать модуль упругости пути до значений, близких к значениям на земляном полотне, для устранения перепада модуля упругости пути, а также снижения нагрузок на промежуточные скрепления, например, за счет укладки подбалластных матов или подшпальных прокладок.

Указанные рекомендации были использованы при разработке «Типовых конструктивно-технологических решений к конструкции железнодорожного пути с участком переменной жесткости на подходах к безбалластному железнодорожному пути» [95] и «Типовых конструктивно-технологических решений к конструкции железнодорожного пути с участком переменной жесткости на подходах к искусственным сооружениям» [96].

На рисунках 4.10 – 4.11 показаны принципиальные конструктивные решения на подходах мостам и тоннелям [87]. В качестве УПЖ указана конструкция с использованием плоских геосеток, однако выбор типа конструкции должен осуществляться в соответствии с местными условиями, где предполагается сооружение или реконструкция объекта.

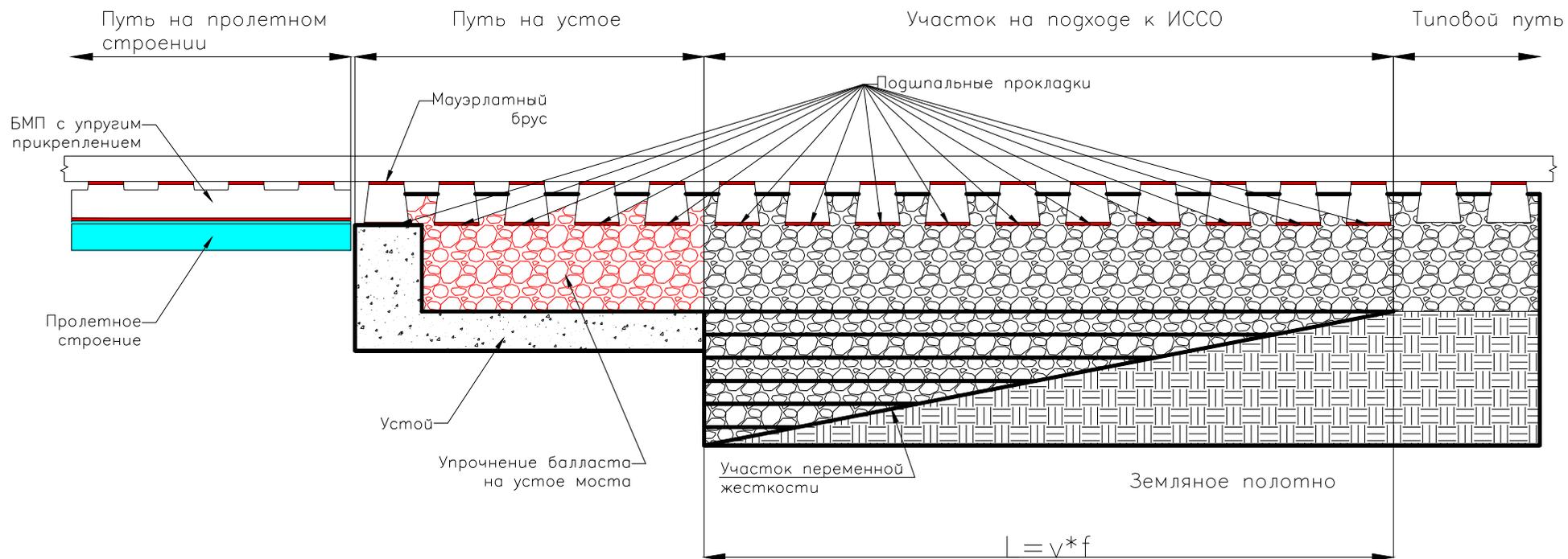


Рисунок 4.10 – Предлагаемые мероприятия по повышению стабильности пути в зоне сопряжения мостов и земляного полотна

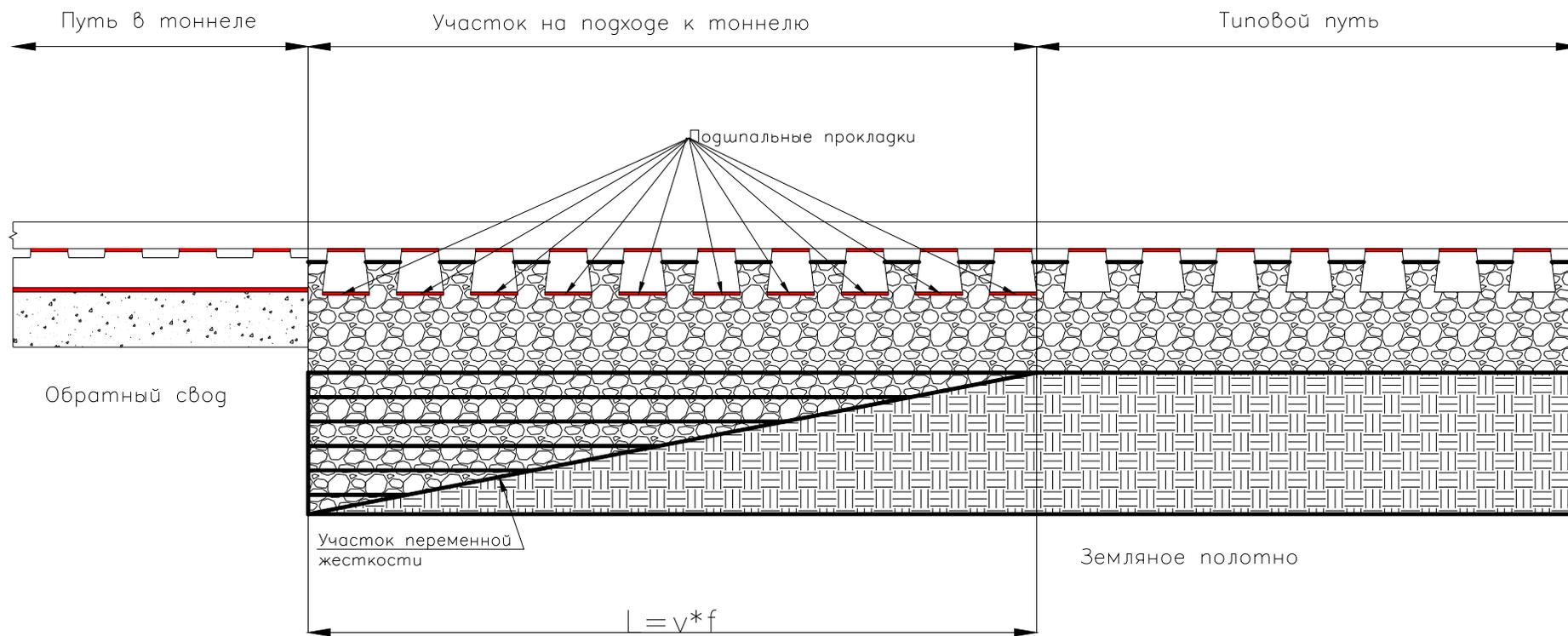


Рисунок 4.11 – Предлагаемые мероприятия по повышению стабильности пути в зоне сопряжения тоннелей и земляного полотна

4.3 Взаимосвязь различных параметров, характеризующих упругие характеристики элементов пути

В предыдущем параграфе были разработаны мероприятия по повышению стабильности железнодорожного пути в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО. Одним из основных является применение различных упругих элементов в конструкции ВСП. Однако, для практического применения этого мероприятия необходимо привести методику расчета параметров упругих материалов, так чтобы модуль упругости пути соответствовал значениям, указанным в предыдущем параграфе.

Как известно, модуль упругости пути и жесткость связаны следующим соотношением [76]:

$$U = \frac{Ж}{l}, \quad (4.1)$$

где U – модуль упругости пути, МПа;

$Ж$ – жесткость пути, МН/м;

l – расстояние между осями соседних шпал, м.

В свою очередь, жесткость пути и жесткость его отдельных элементов связаны следующим соотношением:

$$\frac{1}{Ж} = \sum \frac{1}{Ж_i}, \quad (4.2)$$

где $Ж_i$ – жесткость отдельных элементов конструкции пути.

Формулы (4.1) и (4.2) позволяют рассчитать модуль упругости безбалластного пути при известной жесткости прокладок-амортизаторов в узле промежуточного скрепления и дополнительную жесткость упругого слоя между подрельсовой опорой и путевым бетоном. Эти расчеты для эпюры подрельсовых опор 2000 и 1840 шт./км приведены в таблицах 4.1 и 4.2 соответственно.

При пользовании таблицами в столбце, соответствующем жесткости прокладки-амортизатора, находим строку с требуемым модулем упругости пути. Значение в боковике таблицы показывает требуемую дополнительную жесткость упругого слоя (подшпальной прокладки).

Чтобы перейти к выбору материала для упругого слоя между подрельсовыми опорами и путевым бетоном необходимо определить необходимый модуль упругости этого материала.

Таблица 4.1– Модуль упругости пути, МПа, при эпюре подрельсовых опор 2000 шт./км

Ж _{доп.} МН/м	Ж _{скр.} , МН/м					
	50	60	70	80	90	100
100	66,7	75,0	82,4	88,9	94,7	100,0
90	64,3	72,0	78,8	84,7	90,0	94,7
80	61,5	68,6	74,7	80,0	84,7	88,9
70	58,3	64,6	70,0	74,7	78,8	82,4
60	54,5	60,0	64,6	68,6	72,0	75,0
50	50,0	54,5	58,3	61,5	64,3	66,7
40	44,4	48,0	50,9	53,3	55,4	57,1
30	37,5	40,0	42,0	43,6	45,0	46,2
20	28,6	30,0	31,1	32,0	32,7	33,3

Таблица 4.2 – Модуль упругости пути, МПа, при эпюре подрельсовых опор 1840 шт./км

Ж _{доп.} МН/м	Ж _{скр.} , МН/м					
	50	60	70	80	90	100
100	61,3	69,1	75,8	81,8	87,2	92,1
90	59,1	66,3	72,5	78,0	82,9	87,2
80	56,6	63,1	68,8	73,7	78,0	81,8
70	53,7	59,5	64,5	68,8	72,5	75,8
60	50,2	55,2	59,5	63,1	66,3	69,1
50	46,0	50,2	53,7	56,7	59,2	61,4
40	40,9	44,2	46,9	49,1	51,0	52,6
30	34,5	36,8	38,7	40,2	41,4	42,5
20	26,3	27,6	28,6	29,5	30,1	30,7

Для определения упругих характеристик материала упругого элемента (упругого слоя, упругой прокладки) рассмотрим схему его работы на сжатие, изображенную на рисунке 4.12.

Модуль упругости материала в соответствии с законом Гука – это коэффициент пропорциональности между напряжениями в материале и его относительной деформацией:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E, \quad (4.3)$$

учитывая, что

$$\sigma = P/A,$$

где P – сила, действующая на образец площадью A , а

$$\varepsilon = \delta/h,$$

где d – деформация образца начальной высоты h , то

$$E = \frac{P}{A} \cdot \frac{h}{\delta} \quad (4.4)$$

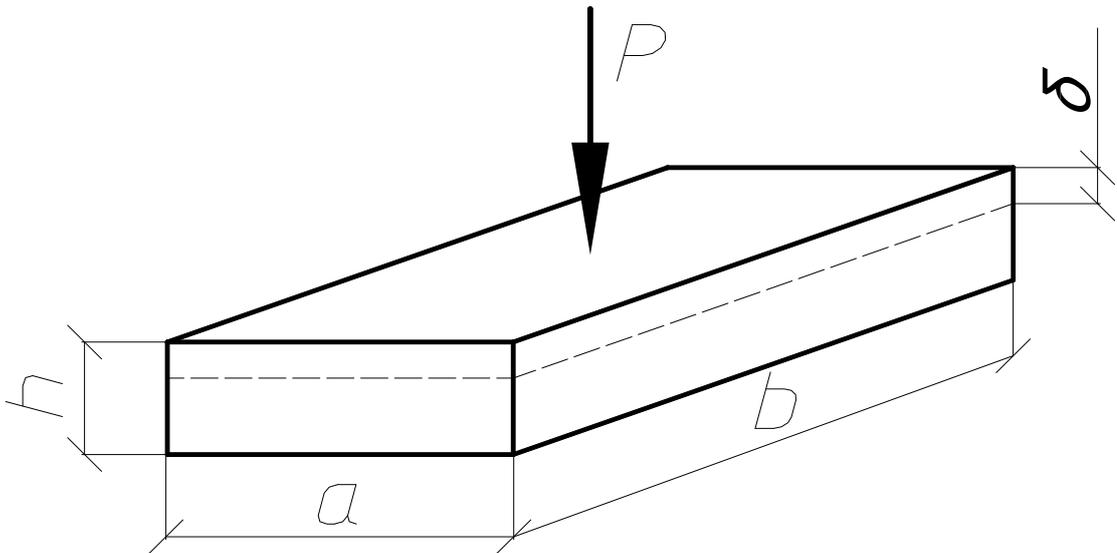


Рисунок 4.12 – Схема работы упругого элемента

При этом P/δ есть жесткость. Тогда жесткость и модуль деформации связаны следующим выражением:

$$Ж = E \frac{A}{h} \quad (4.5)$$

Коэффициент постели (опоры) представляет собой силу, которую надо приложить к площади A полупространства, чтобы вызвать ее перемещение на величину d :

$$C = \frac{P}{A\delta}, \quad (4.6)$$

где P/δ – жесткость, тогда

$$Ж = C \cdot A. \quad (4.7)$$

Из (4.5) и (4.6) получим

$$E = Ж \frac{h}{A}, \quad (4.8)$$

где h – толщина подшпальной прокладки, м;

$A = a \cdot b$ – площадь упругого элемента. Для шпалы в балласте это площадь эффективной опоры полушпалы, м².

Таким образом, зная требуемую дополнительную жесткость, можно подобрать материал упругого слоя и его размеры.

Для конструктивных типов 3 и 6 (рисунки 4.6 и 4.9) площадь упругого слоя или подбалластного мата должна определяться исходя из следующих предпосылок. Примем, что для конструктивных типов 3 и 6 упругий слой испытывает равномерное давление от поездной нагрузки. Тогда площадь упругого слоя, учитываемого в формуле (4.8), должна быть равна произведению расстояния между подрельсовыми опорами на ширину упругого слоя в поперечном оси пути направлении.

Для подбалластного мата за его расчетную ширину следует принимать наименьший из двух размеров: ширину балластного корыта или сумму длины шпалы и удвоенной толщины балласта под шпалой.

Приведенные данные позволяют определить необходимые упругие свойства материалов для различных конструктивных типов ВСП в зоне сопряжения.

4.4 Оценка эффективности предлагаемых мероприятий

Определим количественно эффективность предлагаемых мероприятий. Для этого рассмотрим, какие остаточные деформации пути возникают, после пропуска поездной нагрузки при различных вариантах конструктивных решений в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО. Смоделируем два основных варианта конструкции пути в зоне сопряжения моста с земляным полотном:

– устройство УПЖ на подходе к искусственному сооружению. Значения модуля упругости при заданном варианте будут следующие: на пролетном строении – 45 МПа, на устое – 55 МПа (поскольку при устройстве УПЖ путь на устое не претерпевает каких-либо изменений), на подходе к мосту модуль упругости пути плавно изменяется от 50 МПа у устоя до 30 МПа на земляном полотне.

– уменьшение модуля упругости пути на ИССО и устое моста, а также устройство участка отвода деформативности и упрочнения пути на устое, как в предыдущем примере. При этом модуль упругости пути на ИССО – 35 МПа, на устое и земляном полотне – 30 МПа. Также на УПЖ прочность балласта плавно изменяется от значений, принятых при моделировании для обычного пути, до значений, принимаемых при укреплении балластной призмы вяжущим материалом.

Во всех расчетах присутствует перепад модуля упругости пути. Это вызвано тем, что в действительности полностью исключить перепад модуля упругости пути не представляется возможным.

В качестве исходных данных примем скорость движения 90 км/ч, осевые нагрузки 23,5 и 25 т, длину участка определим 11 м согласно формуле (3.2) для грузового полувагона с тележками типа 18-100. По каждому варианту был выполнен пропуск поездной нагрузки 150 млн. т бр. В случае если процесс развития остаточных деформаций приобретал катастрофический характер, расчет останавливался на определенном цикле. Для оценки эффективности сравнивали, при каком тоннаже на подходе к ИССО образуется неровность глубиной 10 мм.

Результаты моделирования показали, что при осевой нагрузке 23,5 т и пропуске 150 млн. т бр. в пути образуется неровность глубиной 1,89 мм при применении разработанных рекомендаций, т.е. по 2 варианту моделирования. При моделировании пропуска поездной нагрузки по 1 варианту конструкции зоны сопряжения неровность глубиной 10 мм развивается при пропуске 68 млн. т бр. Аналогичные результаты были получены для осевой нагрузки 25 т. При моделировании по 1 варианту неровность глубиной 10 мм развилась после пропуска 39,25 млн. т бр., а по варианту с разработанными мероприятиями такая же неровность – после пропуска 160 млн. т бр. Сравнение результатов моделирования приведены на рисунке 4.13.

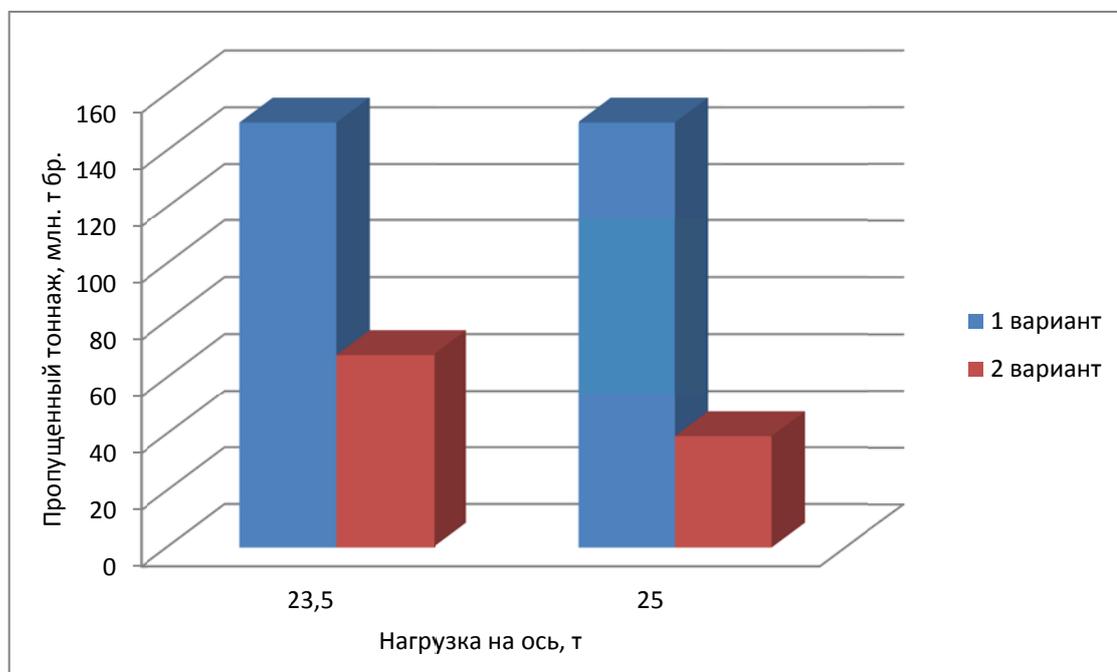


Рисунок 4.13 – Сравнение пропущенного тоннажа до развития неровности 10 мм и более при различных вариантах сопряжения

Таким образом, применение разработанных мероприятий позволяет существенно повысить стабильность железнодорожного пути в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО и обеспечить пропуск поездной нагрузки за межремонтный период.

4.5 Выводы по главе 4

1. Снято техническое противоречие о взаимосвязи упругих и деформативных характеристик пути. Определено, что наиболее рациональным мероприятием для изменения модуля упругости пути является применение упругих элементов в узлах промежуточных скреплений и под шпалами.

2. Составлена методика определения упругих характеристик элементов пути для достижения заданного модуля упругости пути.

3. Разработаны рекомендации и мероприятия по повышению стабильности железнодорожного пути в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО. Наиболее эффективным решением по повышению стабильности пути в зоне сопряжения земляного полотна и ИССО является снижение общей жесткости пути до значений, близких к значениям на земляном полотне, при одновременном увеличении прочности элементов ВСП подверженных накоплению остаточных деформаций на определенной длине.

4. Проведена оценка предлагаемых мероприятий, которая показала, что при их применении существенно повышается стабильность железнодорожного пути в зоне сопряжения. Определение рациональных сфер применения этих мероприятий в зависимости от условий эксплуатации подлежит дальнейшим исследованиям.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года: [Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р]. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=3997.
2. СТО ОАО «РЖД» 1.07.002-2010 Инфраструктура железнодорожного транспорта на участках обращения грузовых поездов повышенного веса и длины. Технические требования.
3. Ермаков В.М., Инновационный путь - выбор правильный! [текст] // Стандарты и качество. – 2012. – № 9. – С. 72–75.
4. Клинов, С.И. Повышение работоспособности и расширение сфер применения бесстыкового пути. [текст] : дисс. ... доктора техн наук : 05.22.06 : ВНИИ ж.-д. трансп. – Москва, 1989. – 614 с.: ил. Железнодорожный путь. 71 90-5/183.
5. Клинов, С. И. Железнодорожный путь на искусственных сооружениях [Текст] // С.И. Клинов. – М.: Транспорт. – 1990. – 144 С.
6. Путь для переходных участков при высоких осевых нагрузках [Текст] // Железные дороги мира. – 2009. – № 2. – С. 74–77.
7. Исследование мостов и подходов к ним на участках с интенсивным движением [Текст] // Железные дороги мира. – 2009. – № 5. – С. 18–21.
8. 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.
9. Dr. Bernhard Lichtberger. [текст] Track Compendium: Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics. Eurailpress, 2005. ISBN. 3777103209, 9783777103204.
10. 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. – 568 С.

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

12. Локтев А.А. Разработка математической модели железнодорожного пути переменной жесткости [Текст] // Г. Н. Талашкин, К. Д. Степанов, А. А. Локтев, А. В. Сычева // Сборник трудов 9-й Международной научно-практической конференции Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. — Издательство МИИТ Москва. – 2016.

13. Кругликов А.А. Организация переходных участков железнодорожного пути переменной жесткости на основе полимерных связующих материалов [Текст] Кругликов А.А., Ермолов Я.М., Морозов А.В., Нахимович И.А., Явна В.А. // Вестник РГУПС. – 2016 г. – №4. – С. 106-113.

14. СП 261.1325800.2016 Железнодорожный путь промышленного транспорта. Правила проектирования и строительства (утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 3 декабря 2016 г. N 888/пр).

15. СП 119.13330.2012. Железные дороги колеи 1520 мм. Актуализированная редакция СНиП 32-01-95. - М. :Стандартинформ, 2012. – 51 С.

16. СП 238.1326000.2015. Железнодорожный путь. - М.: Стандартинформ, 2015. - 71 С.

17. Стандартные проектные решения и технологии по переустройству инженерных сооружений при подготовке железных дорог к введению скоростного движения пассажирских поездов, выпуск 3, М.: Транспорт. – 1999 г. – 78 С.

18. ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ для конструкций пути на подходах к искусственным сооружениям [текст] // утв. 16.12.2003 г. М. Транспорт. – 2004 г. – 24 С.

19. Отчет о НИР «Разработка конструкции мостового полотна на плитах с упругим креплением к балкам проезжей части металлических пролетных строений» (10.32.00) (Заключительный). Рук. темы Е.С. Ашпиз М.: МИИТ. – 2006.
20. Отчет о НИР «Организация высокоскоростного движения на участке Москва – Санкт-Петербург» (6.3.00). "Конструкция и устройство бесстыкового пути на участках переменной жесткости, мостах и эстакадах" (6.3.01.1). «Осмотр мостовых переходов на линии Санкт-Петербург – Москва. Анализ состояния зон переменной жесткости» (6.3.01.1.1). (Заключительный). Рук. темы П.М. Токарев. М.: МИИТ. – 2005.
21. Козьмин Ю.Г. Динамическое взаимодействие пути и подвижного состава в зоне сопряжения мостов с земляным полотном [Текст] // Тр. ЛИИЖТ. – 1971. – ВЫП.328. – С.70–87.
22. Козьмин Ю.Г. Напряжения в рельсах в местах перелома профиля пути над промежуточными опорами мостов [Текст] Козьмин Ю.Г., Васильев Д.И., // Тр. ЛИИЖТ. 1969. – ВЫП. 290. – С. 44-56.
23. Козьмин Ю.Г, Взаимодействие балочных пролетных строений железнодорожных мостов и подвижного состава при высоких скоростях движения [Текст]: Автореферат дис. . . . докт.техн.наук: Л. – 1973. – 35 С.
24. Поляков В.Ю. Напряженно-деформированное состояние верхнего строения железнодорожного пути на подходах к искусственным сооружениям [Текст]: Автореферат дис. канд.техн.наук: М. – 1985.– 24 С.
25. Гасанов, А.И. Путь на подходах к металлическим мостам [Текст] // А.И. Гасанов. Путь и путевое хозяйство. – 2012. – № 7. – С. 29–30.
26. Клинов, С.И. Переходный путь [Текст] // Путь и путевое хозяйство. – 1987. – № 7. – С. 27–27.
27. Клинов, С.И. Железнодорожный путь в тоннелях. Устройство и содержание [Текст] // Железнодорожный транспорт. Путь и путевое хозяйство. – М. – 1986. – № 1 . – 32 С.
28. Разработка инструкции по применению конструкций верхнего строения пути в тоннелях [Текст] отчет о НИР. Этап 1. «Обоснование критериев

выбора ВСП в тоннелях". Подэтап 1.1. проведение инструментального обследования действующих тоннелей с различными типами ВСП». (Промежуточный). Рук.темы А.К. Гучков. М.: – ПТКБ ЦП ОАО «РЖД». 2012. – 40 С.

29. Стоянович Г.М.,– Конструкция переменной жесткости [Текст] Стоянович Г.М., Марченко Л.Н., Пупатенко В.В., Змеев К.В. М.: – Путь и путевое хозяйство – 2000. – №1. – С. 29–31.

30. Раковски Зигмунд, Механически-стабилизированные основания ТЕНСАР [Текст]. // Труды X Научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути» чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца. – 2012. – С. 30–33.

31. Раковски Зигмунд, Изучение феномена механической стабилизации каменных материалов посредством георешеток [Текст]. // Труды XII Научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути» чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца. – 2015. – С.11–14.

32. El-SibaieMagdy, On the Component of Track Resistance and Related Damping Measurements, REPORT No. R-753, AAR, Technical Center, Chicago, II, 1990, 46 p.

33. Правила и технология выполнения основных работ при текущем содержании пути [Текст]. Утв МПС РФ 30.06.1997 N ЦПТ-52.

34. RAILWAY TRANSITIONAL ZONES: THE CHALLENGES OF VERY HIGH SPEEDS Sofia Costa D'Aguiar, ElodieArlaud, Rodolphe Potvin, Emmanuel Laurans, Christine Funfschilling.

35. Отраслевой стандарт Китайской Народной Республики. Нормы проектирования высокоскоростных железных дорог (временные положения). Code for Design of High Speed Railway TB 10621-2009 J971-2009.

36. Subgrade Design for High Speed Railway in China, Liu Jiankun, Wang Qingzhi.

37. Лысюк В.С., влияние жесткости и неровностей пути на деформации, вибрации и силы взаимодействия его элементов [Текст]. Под ред. Лысюка В.С.. Труды ЦНИИ МПС. – вып. 370. – Транспорт. – 1969. – 168 С.
38. Работа пути с железобетонными шпалами под нагрузкой [Текст]: Сб. научных трудов МИИТ. Вып. 78. -М.: МИИТ. – 1965. – 252 С.
39. Коншин Г.Г., Рабочая зона в насыпи [Текст] // Коншин Г.Г. Путь и путевое хозяйство. 2001. – № 2. – С. 32–36.
40. Инструкция по оценке деформативности подрельсового основания нагрузочным поездом. Утв. 15.08.2012 № 1648р.
41. 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.
42. Ершков О.П., Теоретический анализ влияния расстройств рельсовой колеи на динамическое взаимодействие подвижного состава и пути и оценка неравножесткости рельсовых нитей [Текст] // Ершков О.П., Зак М.Г., Ткачев Е.Д., тр. ВНИИЖТ. – 1980. вып. 628. – М. – С. 67–103.
43. Отчет о НИР «Технико-экономическая оценка влияния применения в эксплуатации вагонов с осевой нагрузкой 27 тс на базе определения напряженно-деформированного состояния верхнего строения пути и земляного полотна на участке Ковдор – Мурманск при воздействии поездов с вагонами с осевой нагрузкой 23,5 тс, 25 тс и 27 тс и интенсивности расстройств пути.» [Текст] // (Заключительный). Рук.темы Е.С. Ашпиз М.: МИИТ. – 2015.
44. Яковлева Т. Г., Моделирование прочности и устойчивости земляного полотна. [Текст] // Яковлева Т. Г., Иванов Д.И. М.: Транспорт. – 1980. – 245 С.
45. Тимошенко С.П., Колебания в инженерном деле [Текст] // Тимошенко С.П., Янг Д., Уивер У.. – М.: Машиностроение. 1985. – 472 С.
46. Сагомоян А.Я. Волны напряжений в сплошных средах [Текст]. – М.: Изд-во Московского университета. 1985. – 416 С.

47. Тимошенко С.П. Прочность и колебания элементов конструкций [Текст] // М.: Наука. – 1975. – 704 С.
48. Поляков В.Ю., Взаимодействие подвижного состава с элементами мостового перехода при высокоскоростном движении [Текст] // : дисс. ... доктора техн наук : 05.22.07 : ВНИИ ж.-д. трансп. – Москва. – 1994. – 395 С.
49. Гасанов А.И. Расчет железобетонной шпалы при учете осадочности основания [Текст] // Труды МИИТ. вып. 901. М.: – 1996.
50. Гречаник А.В., Оценка влияния жесткости пути и рессорного подвешивания тележек на развитие остаточных деформаций пути [Текст] дисс. ... канд. техн. наук : 05.22.06 : МИИТ. – Москва. – 2011. – 99 С.
51. Коренев Б.Г., Некоторые задачи динамики балок на упругом основании [Текст]. Коренев Б.Г., Ручимский М.Н. Научное сообщение №120 центрального научно-исследовательского института промышленных сооружений: М., Стройиздат. – 1955. – 26 С.
52. Winkler E. Die Lehre von der Elastizitat und Festigkeit, Prag, 1867. 338 S.
53. Winkler E. Der Eisenbahn-Oberbau – Prag. 1871. 250 S.
54. Попов, С.Н. О допускаемых напряжениях на балласт [Текст] // Труды ВНИИЖТ. – М.: Транспорт. 1955. – № 97. – С. 353–385.
55. Вериго М.Ф., Взаимодействие пути и подвижного состава. [Текст] // Вериго М.Ф., Коган А.Я. под ред. М.Ф. Вериго. – М.: Транспорт. 1986. – 559 С.
56. Осипов В.В., Нагрузочный диагностический комплекс СПМ-18 с высокопроизводительной бесконтактной системой измерений [текст] // Осипов В.В., Пахомов А.Г. Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 3. – С. 29–30.
57. Методика обработки и интерпретации данных нагрузочных испытаний железнодорожного пути на основе измерений нагрузочным комплексом СПМ-18. Инв. № СПМ/334-04. – 2002. – 48 С.
58. Методика определения деформативности элементов конструкции железнодорожного пути нагрузочным диагностическим комплексом СМ-460 (утв. Департаментом технической политики ОАО «РЖД»). НПФ «Спецмаш». – 2010. инв. № СПМ-526/10.

59. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов.[Текст] т. I. Перевод Федоров В.Н. Под ред. И.К. Никитенко—М.: Наука. – 1965.
60. Официальный сайт компании ООО НПП «Мера» <http://www.nppmera.ru>
61. Шепитько Т.В., Система и моделирование организации работ по сооружению верхнего строения пути при строительстве новой железнодорожной линии [Текст] дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.13 : МИИТ. – Москва. 1984. – 210 С.
62. Меренченко К.В. Разработка критериев определения допускаемой неравножесткости пути для зоны сопряжения земляного полотна и искусственного сооружения[Текст]. Транспорт Урала. – 2014. – №1. – С.26-31.
63. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 29 декабря 2012 г. № 2791р. – Москва. – 2012. – 235 С.
64. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [текст] // утв. приказом министерства транспорта РФ от 21.12.2010 № 286.
65. Мишин В.В., Прогнозирование состояния пути проблемы и решения [текст] // Путь и путевое хозяйство. – 2011.–№ 7. – С. 2-6.
66. Мишин В.В., Совершенствовать планирование ремонта пути [текст] // Путь и путевое хозяйство. – 2007. – № 7 – С. 2-6.
67. 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.
68. Челомей В.Н. - Вибрации в технике. Том 3. Колебания машин, конструкций и их элементов [текст] Справочник. В 6-ти т. /Ред. В. Н. Челомей

(пред). — М.: Машиностроение, 1980 — Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов/ Под ред. Ф. М. Диментберга и К. С. Колесникова. — 1980. — 544 С.

69. 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.

70. 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.

71. Ашпиз, Е.С. Обоснование нормативов деформативности подрельсового и подшпального оснований [Текст] / Е.С. Ашпиз, А.В. Замуховский // Мир транспорта . — 2012. — №5. — С. 112–119.

72. 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.

73. 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.

74. Инструкция по устройству подбалластных защитных слоев при реконструкции (модернизации) железнодорожного пути Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12 декабря 2012 г. № 2544р. — Москва. — 2012.

75. Разработка технических решений по снижению деформативности подшпального основания на маршрутах обращения поездов повышенной массы и длины, отчет о НИР [Текст]. Этап №3 «Проведение эксплуатационных

наблюдений и инструментального обследования. Анализ причин отступлений геометрии рельсовой колеи и деформативности подшпального основания. Разработка технического задания на технические решения по снижению отступлений геометрии рельсовой колеи и деформативности подшпального основания» (Промежуточный). Рук. темы Ашпиз Е.С. М.: МИИТ 2008г – 126 с.

76. Виноградов В.В., Расчеты и проектирование железнодорожного пути [Текст] // В.В. Виноградов, А.М. Никонов, Т.Г. Яковлева и др.; М.: Маршрут. – 2003. – 486 С.

77. Коншин, Г.Г. Работа земляного полотна под поездами [Текст] // учеб. пособие. – М.: ФГБОУ «Учебно–методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». – 2012. – 208 С.

78. 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.

79. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности [Текст] // утв. расп. 2706_р от 22.12.2017.

80. Меренченко К.В., Взаимосвязь упругих и деформативных параметров пути с нагрузками на ось свыше 23,5 т. [Текст] // 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.

81. 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.

82. Применение подшпальных подкладок для снижения вибрации [Текст] // Железные дороги мира. М., 2013. – № 2. – С. 75–77.

83. Проблемы содержания пути при высоких осевых нагрузках ЖДМ // [Текст] // 2005. – № 02 – С. 24–28.

84. Подшпальные прокладки для верхнего строения железнодорожного пути [Текст] SchwSohl. SO Russ©CopyrightbyGetznerWerkstoffeGmbH | 11-2009
85. [Шталь В.](#), [Фройденштайн Ш.](#) Упругие характеристики верхнего строения пути [Текст] // RTR Russian edition. Октябрь 2012. – С. 4-7.
86. Замуховский А.В., Оценка влияния неравножесткости бесстыкового пути в зоне сопряжения земляного полотна и искусственного сооружения на состояние ГРК. Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути [Текст]. // Замуховский А.В., Меренченко К.В., Гречаник А.В.: 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
87. Меренченко К.В. Новые подходы к проектированию пути в зоне сопряжения земляного полотна и искусственного сооружения [Текст] // Транспортное строительство. – 2014. – № 6. – С. 7–9.
88. 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.
89. Варызгин, Е.С. Работа балластной призмы под поездной нагрузкой [Текст] // Содержание балластной призмы : под ред. Е.С. Варызгина. – М.: Транспорт. 1978. – С. 14–30.
90. Варызгин, Е.С. Исследование неравномерности остаточных осадок щебеночного слоя [Текст] // Вестник ВНИИЖТ. – 1968. – №5. – С. 43–46.
91. Барабошин, В.Ф. Повышение стабильности пути в зоне рельсового стыка [Текст] / В.Ф. Барабошин, Н.И. Ананьев. – М. : Транспорт. – 1978. – 45 с.
92. Пояснительная записка к Типовым конструктивно-технологическим решениям к конструкции железнодорожного пути с участком переменной жесткости на подходах к искусственному сооружению [текст].
93. Каменский, В.Б. Направления совершенствования системы ведения путевого хозяйства [Текст]. – М.: ОАО НИИТКД, 2009. – 392 с.

94. Наумов Б.В. Совершенствование способов борьбы с вибрацией, передаваемой от железнодорожного пути на тоннель метрополитена. Диссертация на соискание уч. степени канд. техн. наук: 05.22.06. С-Пб.: СПГУПС. – 2005. – 136 С.

95. Типовые конструктивно-технологические решения к конструкции железнодорожного пути с участком переменной жесткости на подходах к безбалластному пути [текст], утвержденные 28 декабря 2016 г. № 803 первым вице-президентом ОАО «РЖД» А.С. Мишариным.

96. Типовые конструктивно-технологические решения к конструкции железнодорожного пути с участком переменной жесткости на подходах к искусственным сооружениям [текст], утвержденные 28 декабря 2016 г. № 803 первым вице-президентом ОАО «РЖД» А.С. Мишариным.