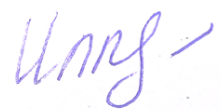


На правах рукописи



Илларионова Лилия Алексеевна

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ БЕЗБАЛЛАСТНОЙ КОНСТРУКЦИИ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ С УЧЕТОМ ЕЕ АРМИРОВАНИЯ

1.1.8. (ранее 01.02.04)- Механика деформируемого твердого тела

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Москва 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» на кафедре «Здания и сооружения на транспорте».

Научный
руководитель: **Локтев Алексей Алексеевич,**
доктор физико-математических наук, профессор.

Официальные
оппоненты:

Алгазин Сергей Дмитриевич,
доктор физико-математических наук, ведущий
научный сотрудник, Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Институт проблем механики им. А.Ю.
Ишлинского Российской академии наук,
лаборатории механики и оптимизации
конструкций, старший научный сотрудник.

Суслов Олег Александрович,
доктор технических наук, технический эксперт,
Научного информационного-аналитического
центра - филиал акционерного общества
"Научно-исследовательский институт
железнодорожного транспорта" (НИИЦ АО
"ВНИИЖТ") (Москва).

Ведущая Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» РТУ МИРЭА.

Защита состоится «16» июня 2022 г., в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д002.075.01 созданного на базе Института проблем машиноведения РАН по адресу: 199178, Санкт-Петербург, ВО, Большой проспект, д.61

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте в ОНТИ Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук и на сайте института по адресу <http://www.ipme>.

Автореферат разослан « » 2022 г.

Врио
ученого секретаря
диссертационного
совета Д 002.075.01,
д.т.н.

E. C. C.

Седакова Е. Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. При определении деформированного состояния строительных конструкций железнодорожного пути, в том числе верхнего строения пути и других плоских элементов несущих конструкций объектов транспортной инфраструктуры при динамических воздействиях, большое значение имеет подготовка математической модели, описывающей реологические свойства материала конструкции. Задача особенно сложная для определения динамического поведения элементов с анизотропными свойствами, в том числе трансверсально - изотропными и ортотропными, к которым можно отнести железобетонные конструкции. Из композитных материалов все чаще выполняются элементы конструкций для строительной отрасли или транспортной инфраструктуры. Актуальным вопросом при расчете железобетонных элементов является методика их армирования, чаще всего используют набор конструктивных требований с вычислением общих показателей для вновь образуемых композитных материалов, что не всегда достаточно. К примеру, для составной конструкции важно учитывать не только коэффициент армирования, отражающий соотношение площадей поперечного сечения отдельных элементов составной конструкции, но и реальное расположение армирующих элементов в заполняющем массиве. Основные подходы, связанные с расположением армирующих металлических и неметаллических элементов в железобетоне, базируются на увязке взаимного размещения рабочей и конструктивной арматуры. При этом основные характеристики вновь получаемого композитного материала являются приведенными, нормированными величинами, например, площадью поперечного сечения или суммарной площадью арматуры. Для достижения достаточной точности расчёта таких конструкций, как правило, используются математические модели, в основу которых положены плоские элементы, позволяющие учесть ортотропные свойства материала, но волновые процессы в элементах конструкции при нагружении чаще всего учитываются в квазистатической постановке. В наши дни чаще всего используется традиционная методика армирования, учитывающая динамическое приложение нагрузки только в квазистатической постановке, с учетом особенностей изменения нагрузки от времени через совокупность уточняющих коэффициентов.

В случае расчета безбалластного пути необходимо также производить учет динамической высокочастотной и гигацикловой нагрузки. Методы формирования изображения распространения фронтов упругих волн в пластине позволяют определить точки, в которых сходятся прямые и отраженные волны различного порядка, что может увеличивать и уменьшать общую интенсивность волновых процессов, приводя к увеличению или снижению напряжений и деформаций в характерных точках конструкции.

С помощью такой постановки задачи возможно выявить точки встречи различных фронтов волн, которые могут привести к росту или уменьшению напряжения в материале, что поможет подобрать верные места расположения армирующих элементов, что сократит перерасход материала и эксплуатационные свойства конструкции. Это особенно актуально для конструктивных элементов объектов транспортного строительства, поскольку именно они испытывают динамическую знакопеременную нагрузку с различной интенсивностью и временными распределениями характерных величин.

Степень разработанности темы исследования.

Теорией передачи нагрузки от подвижного состава и пути, а также моделированием динамического поведения пути занимались различные ученые: профессора В.Г. Альбрехт, С. В. Амелин, С.А. Айзинбуд, М.Ф. Вериге, С.В. Вертинский, А.Б. Васильев, С.И. Герасимов, А. М. Годыцкий-Цвирко, Л.О. Грачева, В.Н. Данилов, В.М. Ермаков, В.И. Ерофеев, М.П. Ершков, Э.П. Исаенко, Н.И. Карпущенко, К.С. Каспакбаев, А.Я. Коган, С. М. Куценко, М. П. Смирнов, М. А. Фришман, М. А. Чернышев, Г. М. Шахунянц, И.В. Прокудин, В.О. Певзнер, Ю.С. Ромен, Эсвельд, В. Ф. Яковлев, А.А. Локтев, В.П. Сычев и многие другие, а также организации АО «РЖДСТРОЙ», ООО «Управляющая компания Бамстроймеханизация», ООО «Спецтрансстрой», АО «ЛенГипрострой», ООО «Желдорпроект», ООО «СтройЖелДорПроект», ООО «НеваТрансПроект», ООО «МОССТРОЙ», ООО «Промстрой», ООО «Трансбарьер М», ООО «СПХ».

Над исследованиями экспериментальными и теоретическими исследованиями железобетонных элементов, в том числе находящихся под динамической нагрузкой, трудились профессора Л.А. Аветисян, В.И. Гнедовский, В.И. Жарницкий, Р. Зелигер, В.И. Довгальук, М. Консидер, О.Г. Кумпак,

С.Б. Крылов, А.В. Леонтьев А.Ф. Лолейт, Л.К. Лукша, А.Н. Мамин, Н.Г. Матков, В.С. Плевков, Попов, А.И, Г.И. Попов, Н.Н. Плотников, Б.С.Расторгуев, А.Г. Тамразян, Н.Н. Трекин, И.С. Царев, В.С. Федоров Я. Хензел, Е.А. Чистяков и др.

Задачи, связанные с динамическим нагружением объектов, решал еще И. Ньютон, исходя из предположения, что изменение импульса равно времени воздействия ударного импульса. Задачи, связанные с динамическим соединением двух тел (стержней), впервые были решены Б. Д. Сен-Ваном путем одновременного распространения волн в сталкивающихся телах.

Г. Герц продолжил разрабатывать решение задачи статического контакта двух упругих тел с их динамическим взаимодействием. С.П. Тимошенко учел стационарные колебательные процессы после динамического нагружения тела, фактически агрегировав колебания балки и контактную теорию. Теория динамического нагружения балочных элементов типа Тимошенко развивалась Crook A.W., Yamamoto S.A., Россихиным Ю.А., Локтевым А.А., Ерофеевым В.И., для пластин данный подход нашел применение в работах – Mindlin R.D., Conway H.D, Reissner E., Lee H.C., Уфлянда Я.С., Филлипова А.П., Филлипова И.Г. Горшкова А.Г. Учет волновых процессов в задачах динамического нагружения был реализован Филлиповым А.П. для частных случаев. Позже Филлипов А.П., Склад В.Л. решили еще несколько подобных задач, Choi I.H., Lim C.H., Егорычев О.О. рассмотрели многослойные плитные элементы, неупругие реологические свойства пластин рассматривали Локтев А.А., Россихин Ю.А., Шитикова М.В., анизотропные свойства и предварительные напряжения в пластинах рассматривались в работах Филиппова И.Г., Егорычева О.А., Егорычева О.О., Локтева А.А., Товстика П.Е., Ерофеева В.И., Царева И.С.

Несмотря на существенные достижения в области проектирования, изготовления и эксплуатации железобетонных конструкций, а также современных конструкций железнодорожного пути, многие вопросы, связанные с учетом волновых процессов в элементах конструкции, различных реологических свойств используемых материалов, определения мест расположения армирующих элементов с учетом разнонаправленных внешних динамических воздействий, требуют дополнительного изучения как с точки зрения строительных конструкций, так и с точки зрения используемых методов механики деформируемого твердого тела. Данным аспектам и посвящено настоящее исследование, результаты которого могут помочь усовершенствовать действующие нормативно-технические документы в области транспортного строительства.

Целью диссертационного исследования является развитие методов динамического расчёта плоских элементов, выполненных из композитных материалов, с учётом характерных внутренних реологических свойств, демпфирования узлов анизотропных конструкций с учетом особенностей приложения нагрузки от колесной пары подвижного состава.

Задачи исследования.

1. Выполнить анализ существующих моделей динамического поведения плоских элементов основания верхнего строения пути ВСП как строительной конструкции с учётом демпфирующих и анизотропных свойств материалов и волновых процессов в элементах конструкции при нагружениях.

2. Разработать модель, описывающую динамическое поведение анизотропного плоского элемента безбалластного железнодорожного пути с учетом особенностей приложения нагрузки от подвижного состава, ортотропных свойств плиты и свойств армирующего материала.

3. Разработать алгоритм выбора мест расположения арматурных элементов в зависимости от распространения волновых поверхностей в плоском элементе и их взаимодействия между собой.

4. Разработать схему армирования плоских элементов, используемых в области транспортной инфраструктуры для элементов, непосредственно контактирующих с подвижным составом.

5. Провести сравнение результатов, полученных с помощью предлагаемого метода учета армирования и традиционного метода расчета балластной и безбалластной конструкции железнодорожного пути.

Теоретическая значимость работы.

1. Проведен многофакторный анализ имеющихся моделей, учитывающих анизотропные свойства, динамические нагрузки и используемые технические технологические решения для железобетонных элементов.

2. Разработана методика расчёта плоских элементов строительных конструкций на динамические воздействия с учётом демпфирующих свойств материалов и волновых процессов в элементах конструкций при нагружении.

3. Разработана математическая модель плоской конструкции из материала, обладающего анизотропными свойствами, позволяющая учесть зарождение и распространение волновых поверхностей в плоских элементах, с учетом особенностей приложения нагрузки от подвижного состава, ортотропных свойств плиты и свойств армирующего материала.

Практическая ценность.

1. Определены места расположения армирующих элементов в зависимости от распространения волновых поверхностей в плоском элементе и их взаимодействия между собой, это позволяет увязать расположение арматуры и наиболее нагруженных точек плиты.

2. Актуализация предложенной методики позволит разработать схему армирования конструкции безбалластного пути с учетом динамической нагрузки. Предлагаемые решения наиболее актуальны для конструктивных элементов объектов транспортной инфраструктуры, поскольку именно они испытывают динамическую знакопеременную нагрузку с различной интенсивностью и временными распределениями характерных величин.

Научная новизна заключается в:

1. Выполнении анализа существующих моделей динамического поведения элементов основания ВСП с учётом демпфирующих свойств материалов имеющих строительные конструкции, волновых процессов в них при разнонаправленных нагружениях.

2. Разработке математической модели динамического поведения плоских элементов с учетом особенностей приложения нагрузки от подвижного состава, волновых процессов, анизотропных свойств основания свойств армирующего материала и наполнителя.

3. Определении места расположения армирующих элементов в зависимости от распространения волновых поверхностей в плоском элементе и их взаимодействия между собой. Основные подходы, связанные с расположением армирующих металлических элементов в железобетоне, базируются на увязке взаимного размещения рабочей и конструктивной арматуры, воспринимающей деформации локального и общего конструктивного характера.

4. Предложении схемы армирования элементов строительных конструкций, испытывающих динамическое воздействие. Данная схема адаптирована для железобетонных плит ВСП высокоскоростных магистралей, а также может быть использована и на существующих железных дорогах в тоннелях и на мостовых переходах (везде, где есть плиты основания для укладки рельсовых плетей).

5. Установлении зависимости динамических и кинематических параметров поведения конструкции, которые представлены в аналитических выражениях и графических зависимостях для традиционного и предлагаемого подходов в методах армирования. Это может иметь практическое применение для проектирования и содержания скоростных и высокоскоростных железнодорожных линий как в России, так и за границей.

Личный вклад автора диссертации: направленность диссертации, постановка целей и задач формулировались вместе с научным руководителем, что получило отражение в многочисленных совместных публикациях. Представленная математическая модель анизотропной плиты основания безбалластного железнодорожного пути при динамических воздействиях с учетом влияния волновых процессов, позволяющая вычислить аналитические зависимости и учесть анизотропные свойства пластин, была получена автором лично.

Методология и методы исследования: в качестве методологической основы исследования использованы основные принципы строительной механики, механики деформируемого твердого тела. Методы асимптотического представления искомых функций по времени и пространственной координате, отсчитываемой вдоль направления распределения упругих волн, метода сращивания решений контактной и волновой задач в твердых деформированных элементах, численные методы, основанные на линеаризации функций и величин. Проводились численное и имитационное моделирование с помощью верифицированного алгоритмического и программного обеспечения.

Тематика работы. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.1.8.- Механика деформируемого твердого тела п.1 «Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых», п.2 «Теория моделей деформируемых тел с простой и сложной структурой», п.4 «Механика композиционных и интеллектуальных материалов и конструкций», п. 7 «Постановка и решение краевых задач для тел различной конфигурации и структуры при механических, электромагнитных, радиационных, тепловых и прочих воздействиях, в том числе применительно к объектам новой техники».

Апробация работы. Материалы, содержащиеся в диссертации, докладывались и обсуждались автором на 11-ти научно-практических конференциях российского и международного уровня: на 10-й, 14-й, 15-й, 16-й Всероссийской научно-практической конференции: «Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство» (2016 г., 2019 г., 2020 г., 2021 г.) Воронеж; Москва; 20-й «Юбилейной международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным системам» (ВМСППС'2017) (2017 г.) Алушта; XXIV-ом Международном симпозиуме имени А.Г. Горшкова. «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» (2018 г.) Вятчи; Международной-интернет конференции «Современные проблемы железнодорожного транспорта» (2019 г.) Москва; TransSiberia: International Scientific Siberian Transport Forum VIII 2019 Новосибирск; E3S Web of Conferences Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering (TPACEE3 2019 г.) Ярославль; VI-VII Международной научно-практической конференции «Системы управления, сложные системы: моделирование, устойчивость, стабилизация, интеллектуальные технологии, пути и методы исследования», посвященной 100-летию со дня рождения профессора А.А. Шестакова, (2020 г., 2021 г.) Елец.

Публикации. Основное содержание и результаты диссертации опубликованы в 17-ти печатных работах, в том числе в зарубежных изданиях, входящих в международную базу Scopus - 3 статьи; в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ - 4 статьи; в сборниках научных трудов и докладов конференций - 10 статей.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность результатов, полученных в ходе исследования, обеспечивается корректным использованием обоснованных положений, методов строительной механики, конкретной и полной постановкой задачи на основе гипотез, начальных и граничных условий, принятых в механике деформируемого твердого тела и теории строительных конструкций, использования геометрических и механических характеристик элементов, входящих в сертифицированные конструкции железнодорожного пути, а также в сравнении результатов в аналитических выражениях и графических зависимостях динамических и кинематических параметров поведения конструкции при традиционном и разработанном подходе армирования.

Положения, выносимые на защиту.

1. Разработанные модели динамического поведения плоских элементов строительных конструкций на воздействие от подвижного состава с учётом реологических и анизотропных свойств материалов и волновых процессов в элементах конструкций при нагружении.

2. Алгоритм определения мест расположения армирующих элементов в плите основания железнодорожного пути в зависимости от распространения волновых поверхностей от динамического нагружения и их взаимодействия между собой. Увязываются между собой инженерные и научные подходы, связанные с расположением армирующих металлических элементов в железобетоне, на основе взаимного размещения рабочей и конструктивной арматуры, воспринимающей деформации локального и общего конструктивного характера.

3. Разработанная схема армирования плоских конструкций безбалластного железнодорожного пути с учетом выявленных связей между свойствами композитного материала, характером внешних воздействий и процессами деформирования как конструкции в целом, так и узла опирания рельса и подрельсового основания.

4. Установленные зависимости параметров динамического поведения конструкции безбалластного пути, которые представлены в аналитических выражениях и графических зависимостях с учетом предлагаемых схем армирования, позволяющие решить технологические проблемы деформирования верхнего строения железнодорожного пути при строительстве и эксплуатации высокоскоростных магистралей.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, пяти разделов, заключения с результатами исследования, практических предложений и списка использованной литературы из зарубежных и отечественных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации. Указаны основные цели работы, кратко изложена структура диссертации, описана ее научная новизна, научно-практическая значимость, сформулированы основные положения защиты, результаты всей работы, разных частей научного исследования, которые представлены в целом на конференциях, семинарах и симпозиумах. Представлен личный вклад автора в степень достоверности научных результатов.

В первой главе представлен обзор экспериментальных и теоретических исследований, посвящённых вопросам изучения динамического поведения и армирования строительных конструкций, в том числе, элементов железнодорожного пути и других объектов транспортной инфраструктуры.

Вследствие разнонаправленной динамической нагрузки на объекты транспортной инфраструктуры возникают деформации в течение всего срока строительства и эксплуатации. Наблюдаются колебания верхнего строения объектов транспортной инфраструктуры (в том числе ж.д. пути), при которых по причине повторяющейся динамической нагрузки возникают волновые процессы и колебания.

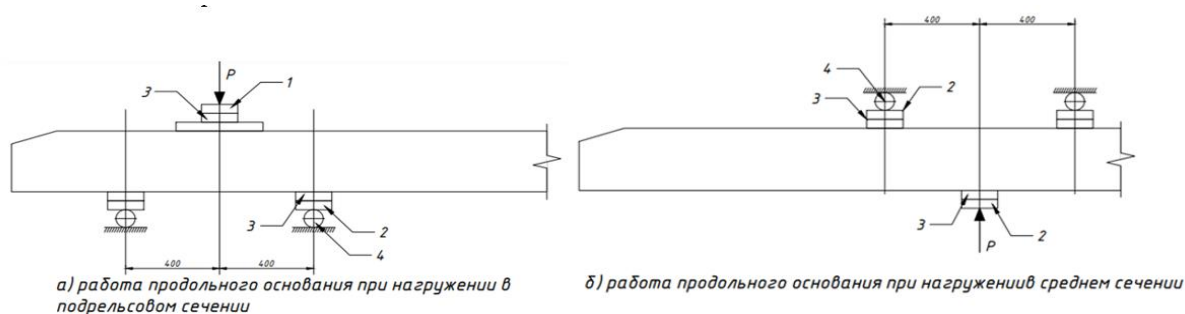


Рис. 1. Работа подрельсового основания при нагружении и разгрузке.

Отдельным и очень важным вопросом при строительстве конструкции безбалластного пути является армирование плиты пути и подстилающего тощего бетонного слоя (при необходимости).

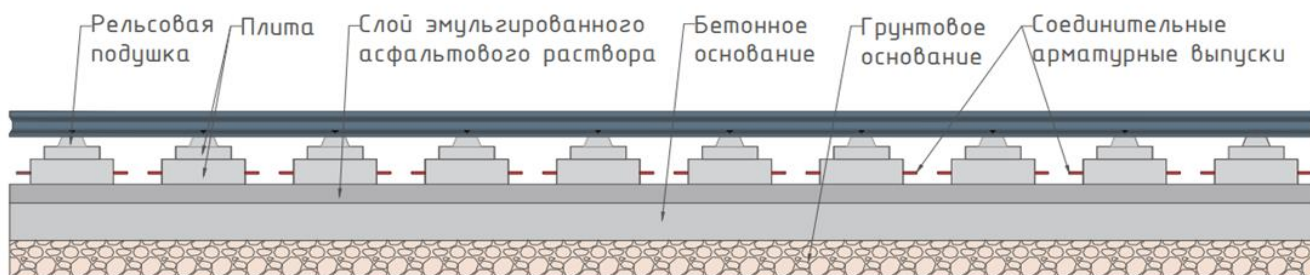


Рис. 2. Пример конструкции безбалластного пути и ее элементов.

В настоящее время используются схемы армирования наиболее характерные для пролетных элементов конструкций мостовых переходов, пролетных элементов промышленных зданий или фундаментных плит, но в реальности необходимо учитывать особенности приложения подвижной нагрузки на железнодорожный путь или автомобильную дорогу, связанные с локальным приложением нагрузки от транспортных средств, связанных с большой частотой потока и высокими скоростями движения пути на железобетонном, сплошном, подрельсовом основании требует нетрадиционную сборку элементов пути. Для закрепления рельса в рабочем положении элементы подрельсового основания заливаются вокруг бетонной смесью в подготовленную опалубку с армокаркасом. Существует несколько безбалластных конструкций пути, основные представлены на рис.3. К анизотропным конструкциям верхнего строения пути можно отнести временные сезонные переправы - это дороги, которыми можно пользоваться только зимой – они обычно проходят по суше и замерзшим водоемам (озерам, рекам, болотам и морскому льду вдоль берегов и заливов). Более теплые зимы и раннее таяние снега приводят к закрытию зимних дорог, в результате чего населенные пункты оказываются вне транспортной доступности, что влияет на безопасность и эффективность этой инфраструктуры и сокращает среднегодовой срок ее эксплуатации. Зимняя дорога обычно состоит из сегментов, которые проходят по суше и по плавучему льду. Рациональное использование плавучих ледовых элементов для транспортировки грузов, а также продление срока их использования требует знания несущей способности

Схема	Описание
EBS	Бетонный опорный блок упруго посаженный в бетонном лотке, который замоноличен в путевую плиту из армированного бетона.
HAS	Шпалы в резиновых чехлах с демпфирующими подшпальными прокладками, замоноличенные в бетон.
FFC	Состоит из несущего слоя бетона толщиной 20–22 см с продольным и поперечным армированием. Дюбели для скреплений устанавливают в заранее просверленные в затвердевшем бетоне отверстия и заливают специальным раствором.
LVT	Полушпалы (блоки) железобетонные ненапряженные с резиновыми чехлами и амортизирующими прокладками. Несущая конструкция основания пути из неармированного бетона. LVT создан на основе двухблочных шпал как для балластных, так и для безбалластных шпальных систем.
FFB	Состоит из сборного железобетона и предварительно напряженных, бетонных плит. Эти плиты соединяются продольно (через стыки) друг с другом, образуя однородные пути, обеспечивающие полезное, долгосрочное поведение системы.
NBT	Две скользящие бетонные плиты, которые заливаются на месте строительства. В верхнюю плиту при заливке замоноличены узлы рельсовых скреплений. Путевая плита и плита основания расположены в шахматном порядке. Нижняя плита имеет выступ в середине колен, а верхняя плита имеет паз.
Rheda	Модифицированные, двухблочные шпалы с выступающей арматурой. Эти шпалы вмонтированы в монолитный армированный бетонный несущий слой так, что арматура шпал при укладке соединяется с арматурой несущего бетонного слоя.

Рис. 3. Основные конструкции безбалластного пути.

Увеличение времени службы сезонных переправ даже на неделю за счет правильного армирования и сохранения требуемого температурного баланса создает возможность получения ощутимого экономического эффекта, а также повышает транспортную доступность отдельных районов. Разрабатываемые модели плоских анизотропных элементов позволяют достичь указанных целей.

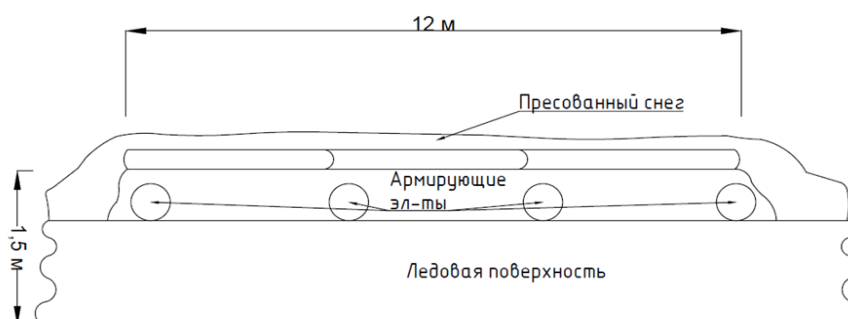


Рис. 4. Схема поверхностного армирования льда для сезонной переправы.

Во второй главе описаны традиционные и полученные зависимости механических и геометрических характеристик, определяющих динамическое поведение конструкций железнодорожного пути.

Анализ работ отечественных и зарубежных авторов показал, что достоверность результатов численного моделирования для описания показателей натурных экспериментов для естественного неармированного основания и подстилающего слоя с армированными элементами достаточно высока и в целом соответствует требованиям проектирования и строительства традиционных железных дорог.

Погрешность результатов находится в диапазоне 10% для обычного основания и 10% для усиленного основания. Окончательные расчетные значения для численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. Вместе с тем, нужно отметить и имеющиеся расхождения в результатах численно-аналитического моделирования и компьютерно-имитационного и натурных экспериментов при скоростях экипажа выше 200-250 км/ч. Данный факт подтверждает актуальность проводимых исследований.

С помощью анализа результатов численного моделирования, определены силы максимально допустимого сопротивления для основания с армированным подстилающим слоем и без него.

Значение силы предельного сопротивления плитного основания, с учетом узла опирания рельса на него с переменным шагом армирования ($F_{ш\text{ арм}}$) по традиционной методике, представляется в следующем виде:

$$F_{ш\text{ арм}} = F_{ш\text{ арм.в.}} + F_{ш\text{ арм.мех}}; F_{ш} = \gamma_b b_1 N_\gamma + N_q q + c_{k1} N_c; F_{ш} = b_{ш} l_{ш} (\gamma_b b_1 N_\gamma \xi_\gamma + N_q q \xi_q + c_{k1} N_c \xi_c) \quad (1)$$

Расчетная схема расположения предполагаемых армирующих элементов приведена на рис. 5.

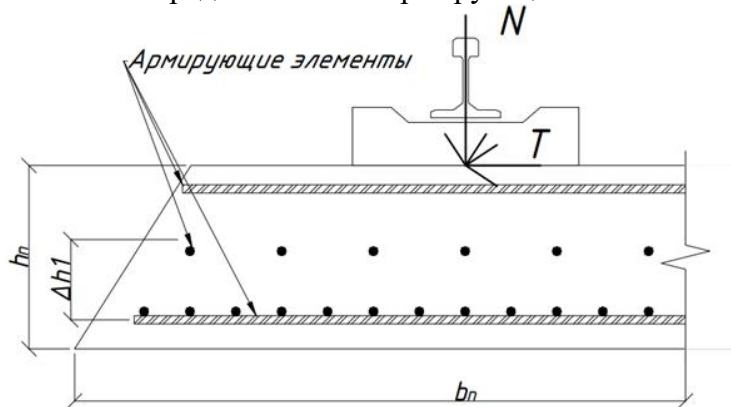


Рис. 5. Расчетная схема плиты с армирующими элементами.

По значениям показателей численного моделирования построен график для определения значений поправочных коэффициентов k_γ , k_q и k_c в зависимости от свойств плиты, определяемых материалом самой плиты и основания (Φ_k/Φ_f).

В качестве параметров для основания безбалластного пути может выступать угол естественного откоса бетона при твердении или факторы начала дилатации. Так как, при сдвиге бетонного слоя по фиксированной плоскости, при наличии сцепления между частицами будет происходить сдвиг всей структуры, которая сначала приведёт к доуплотнению бетона, называемой дилатацией, а при дальнейшем сдвиге - разуплотнению бетона (контракция), что приводит к неизбежному образованию трещин. В предельном состоянии сдвиг бетона по фиксированной плоскости происходит без увеличения величины сдвигающей нагрузки.

$$\Lambda = \sin \psi = -\frac{d\varepsilon_v^p}{d\gamma^p}, \varphi \geq 30^\circ; \psi = \varphi - 30^\circ, \varphi < 30^\circ; \psi = 0^\circ \quad (2)$$

Графическая зависимость приведена на рис. 7.

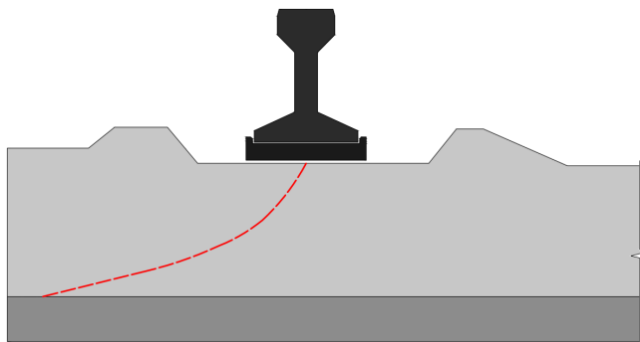


Рис. 6. Поперечное сечения фрагмента ВСП.

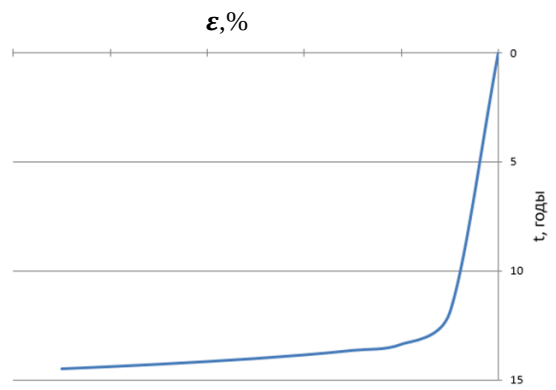


Рис. 7. График зависимости напряжения в бетоне от времени (год).

Таким образом, плотность неуплотненного бетона зависит от уровня действующих в нем сжимающих напряжений.

В ситуации не вертикальной передачи нагрузки на армированное основание необходимо учитывать угол приложения нагрузки в трех взаимно перпендикулярных плоскостях, поскольку это увеличивает образование микротрещин и впоследствии, приводит к нарастанию дилатации. Тогда поправочные коэффициенты определяются по формулам:

$$k'_{y,c,q} = 1 + (k_{y,c,q} - 1) * (h_n / h_{n,\delta}), \quad (3)$$

где $h_{n,\delta}$ - высота опорной плиты при угле нагрузки $\delta \neq 0$ и h_n - высота подушки при угле нагрузки $\delta = 0$. Значение h_n определяется на первоначальном этапе. В этом случае из формулы (1) получим выражение для определения силы предельного сопротивления:

$$F_{ш.арм.с} = b_{ш} l_{ш} (\gamma_b b_1 N_{\gamma} k_{\gamma} + N_q q k_q + c_{k1} N_c k_c), \quad (4)$$

По результатам было обнаружено, что механические свойства армирующих материалов, такие как линейная твердость, относительное удлинение и сопротивление растяжению и сопротивление выдергиванию, будут иметь немалое значение на работу армированных слоев и конструкции в целом.

В предложенном алгоритме присутствовали отдельные параметры $F_{ш.арм.с}$, отражающие изменение конечной прочности сопротивления за счет механических свойств горизонтальных и вертикальных армирующих материалов (линейная жесткость и ее расположение в массе материала плоского элемента). Этот параметр также отражает переменный шаг, предлагаемый для армирования металлическими и полимерными материалами.

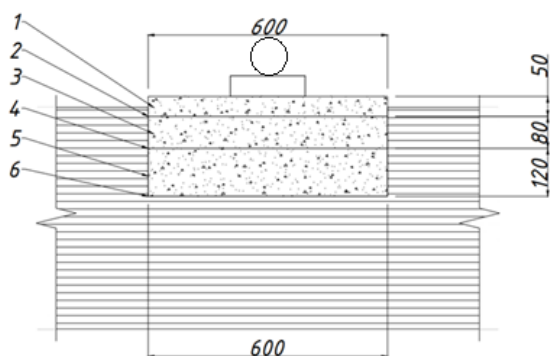


Рис. 8. Схема приложения штамповой нагрузки.

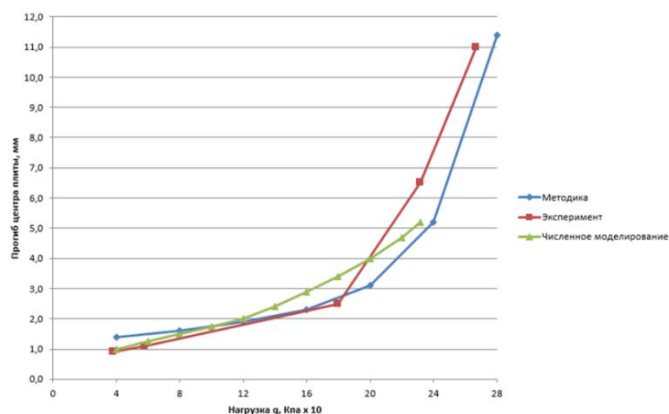


Рис. 9. Зависимость нормального перемещения плиты от различной нагрузки.

Железобетонные плитные элементы предлагается рассматривать в виде совокупности горизонтальных слоев, некоторые из которых содержат элементы армирования. Для многослойной плоской конструкции вычисляются приведенные механические характеристики, например, эффективный модуль деформации, содержащий информацию о каждом изотропном слое:

$$E_{прив.} = n_1 E_1 + n_2 E_2 + \frac{n_1 n_2 E_1 E_2 (\mu_1 - \mu_2)^2}{n_1 E_1 (1 - \mu_2^2) + n_2 E_2 (1 - \mu_1^2)}, \quad (5)$$

где $E_1 E_2$ - модули деформации (упругости) чередующихся изотропных слоев; μ_1, μ_2 - коэффициенты

Проведенные в настоящем разделе исследования и полученные зависимости характеристик, определяющих динамическое поведение конструкций железнодорожного пути, позволяют сформулировать следующие выводы:

Традиционная, квазистатическая постановка задачи не учитывает распространение волн, в таком представлении задачи деформирования основания рельсошпальной решетки железнодорожного пути часто сводится к определению приведенного модуля деформации, при этом рассматриваются только линейные стадии деформирования армированных элементов несущей конструкции. Осадка железнодорожного полотна при такой постановке задачи определяется с точностью 10-15%, что является не всегда достаточным в реальных инженерных задачах. Увеличение точности связано с необходимостью рассмотрения упругопластических задач деформирования основания и использованием численных методов.

В третьей главе разработана математическая модель для плит, испытывающих кратковременные динамические воздействия, позволяющая одновременно учитывать волновые процессы, различие реологических свойств материала и анизотропных свойств конструкции, в том числе и с предварительно напряженной арматурой.

Для определения величин, ответственных за динамическое деформирование элементов конструкции верхнего пути, необходимо составить систему уравнений. Такая система должна

характеризовать поведение колесной пары, конструкции верхнего пути и зоны контакта после начала взаимодействия с подвижным составом.

Построение волновой картины существования упругих волн в плоском элементе основания пути можно представить в виде следующих фаз:

1) В начале после приложения динамической нагрузки в определенной точке в ее окрестностях появляются продольные поперечные волновые поверхности, расширяющиеся с нормальными скоростями (рис.11), начальное количество упругих волн определяется типом метрической анизотропии структурных уравнений.

Имитационное моделирование для разных характеристик показывает, что максимальные напряжения и усилия на данном этапе деформирования возникают непосредственно в области контакта рельса и пути на противоположной стороне плиты основания и в точках встречи прямых и отраженных волн, распространяющихся по толщине плитной конструкции.

2) Совершая определенное количество отражений k , упругие волны, искривляя свои фронты, удаляются от области приложения внешней нагрузки и из преимущественно сферических на расстоянии $\sqrt{k} \approx \sqrt{k+1}$ превращаются в цилиндрические, т.е. зарождение волн-полосок в плоском элементе происходит при условии,

где h — толщина плоского элемента, моделирующего плиту основания железнодорожного пути.

В результате получаем, в этом месте значения напряжения во фронте упругих волн возрастают по мере их приближения к области приложения динамической нагрузки.

3) Волновые поверхности отражаются от нижней поверхности плоского элемента и встречаются с медленными волновыми поверхностями, в результате чего значения напряжений на фронтах совпадают, вызывая локальное увеличение отдельных значений.

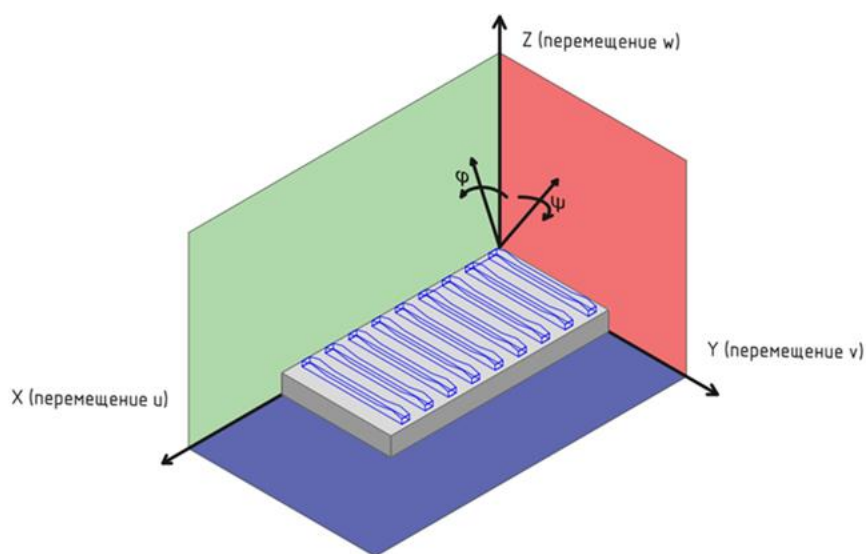


Рис. 10. Расположение координатных осей с учетом анизотропных свойств конструкции.

На первом этапе динамического контакта колесной пары и рельсовой плети образуется пятно контакта с характерным размером в плане r_0 , на втором этапе от границы контактного пятна отрываются и расходятся фронты упругих квазипродольной ($\alpha = 1$) и квазипоперечной ($\alpha = 2$) волн, на которых преобладают напряжения растяжения-сжатия-изгиба и сдвига соответственно. Волновые фронты являются поверхностями сильного разрыва, распространяющимися со скоростями G^α от области контакта и претерпевающими многократные отражения от границ элементов конструкции верхнего строения железнодорожного пути (рис. 11).

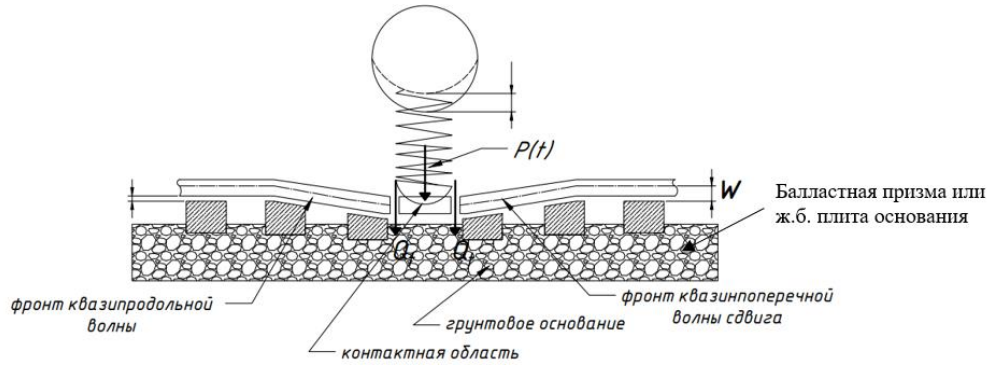


Рис. 11. Схема динамического взаимодействия колеса и верхнего строения пути посредством буфера и последующего распространения волновых поверхностей.

За фронтами волновых поверхностей любая искомая функция $Z(x,t)$ представляется в виде лучевого ряда, вид искомой функции зависит от формы записи определяющих уравнений для мишени, если волновые уравнения записаны в перемещениях, то и Z представляют собой линейные перемещения в направлении координатных осей, а также угловые перемещения вокруг этих же осей, а также условия совместимости.

$$Z(s,t) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} [Z_{\gamma(k)}]_{t=s/G} \left(t - \frac{s}{G}\right)^k H\left(t - \frac{s}{G}\right), \quad G \left[\frac{\partial Z_{\gamma(k)}}{\partial s} \right] = -[Z_{\gamma(k+1)}] + \frac{\delta [Z_{\gamma(k)}]}{\delta t}, \quad (6)$$

в выражениях (6) приняты следующие обозначения: $Z_{\gamma(k)}$ - производная по времени k -ого порядка, квадратные скобки обозначают скачок величины на фронте волновой поверхности, H - функция Хевисайда, s - пространственная координата, ось которой направлена вдоль направления распространения волнового фронта, $\delta / \delta t - \delta$ - производная по времени, при этом само время отсчитывается от момента прихода волны в рассматриваемую точку конструкции. Второе соотношение (6) используется для замена производной по дуге на производную по времени другого порядка. Конструкция основания безбалластного железнодорожного пути представляется в виде плоского анизотропного элемента, динамическое поведение которого в соответствии с рис.10 может быть представлено в виде следующих гиперболических уравнений.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} - \frac{1}{r^2} \frac{c_2}{c_1} \varphi + \frac{c_2 \sigma_r + c_3}{c_1 r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial \theta} - \frac{c_2 + c_3}{c_1 r^2} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} + \frac{12c_4}{c_1} \left(\frac{\partial w}{\partial r} - \varphi \right) &= -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \tau^2}, \\ \frac{c_4}{c_1} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} - \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{c_4}{c_1} \left(\frac{\partial w}{r \partial r} - \frac{\varphi}{r} \right) + \frac{c_4}{c_1} \left(\frac{\partial^2 w}{r^2 \partial \theta^2} - \frac{\partial \psi}{r \partial \theta} \right) &= \frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2} + q_1, \\ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{c_3}{c_1 r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} - \frac{c_2}{c_1 r^2} \frac{u}{r^2} + \frac{c_2 \sigma_r + c_3}{c_1 r} \frac{\partial^2 v}{\partial r \partial \theta} - \frac{c_2 + c_3}{c_1 r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} &= \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{c_2}{c_1 r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{c_3}{c_1} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r^2} \right) + \frac{\sigma_\theta + c_3}{c_1 r} \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial \theta} + \frac{c_2 + c_3}{c_1 r} \frac{\partial u}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 v}{\partial \tau^2},$$

$$\frac{c_3}{c_1} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} - \frac{\psi}{r^2} \right) + \frac{c_2}{c_1 r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} + \frac{\sigma_\theta + c_3}{c_1 r} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r \partial \theta} + \frac{c_2 + c_3}{c_1 r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} + \frac{12c_3}{c_1} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} - \psi \right) = -\frac{\partial \psi}{\partial \tau^2},$$

где $\tau = \frac{t\sqrt{c_1}}{h}$, $w = \frac{w}{h}$, $u = \frac{u}{h}$, $v = \frac{v}{h}$, $r = \frac{r}{h}$, $c_1 = \frac{E_r}{(1-\sigma_r\sigma_\theta)p}$, $c_2 = \frac{E_\theta}{(1-\sigma_r\sigma_\theta)p}$, $c_3 = \frac{G_{r\theta}}{p}$,

$c_4 = \frac{KG_{rz}}{p}$, $c_5 = \frac{KG_{\theta z}}{p}$, $q_1 = \frac{qh}{p c_1}$ q-нагрузка, R1-приведенный радиус контакта.

В определяющих соотношениях (7) c_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5$) представляют собой квадраты скоростей упругих волн, а номер индекса соответствует типу волны и направлению ее распространения (1 и 2 – продольные волны направления скоростей которых совпадают с направлениями γ и φ , 3, 4, 5 – волны сдвига в направлениях трех взаимно ортогональных координатных плоскостей, рис. 10). Схема армирования и механические характеристики арматуры и основного заполнителя оказывают однозначное влияние на эти величины.

Систему уравнений (7) предлагается решать в пространстве изображений, а неизвестные перемещения представить с помощью сферических функций на основе полиномов Лежандра в следующем виде

$$x = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} x_{2n+m} P_{2n+1} \left(\cos \frac{\pi r}{2R} \right) \cos(m\theta), \quad (8)$$

где R – характерный размер конструкции в плане, r_1 – обозначает одно из линейных (u, v, w) или угловых перемещений (ψ, φ), штрих над величиной обозначает переменную в пространстве изображений. Нагрузка q связана с контактной силой $P(t)$ и тоже записывается в пространстве Лапласа. Выражение типа (8) используется для вычисления параметров состояния плиты на некотором удалении от области контакта колеса и рельса (вблизи используются лучевые разложения вида (6)).

В четвертой главе предложенное алгоритмическое и математическое обеспечение позволяет построить волновую картину распространения упругих волн, определить их влияние на деформированное состояние пластины, вычислить расположение точек встречи прямых и отраженных предельных и поперечных волн, которые взаимно усиливают или гасят друг друга. Данный процесс позволяет определить местоположение фронтов волновых поверхностей в любой момент времени после прохода колесной пары в заданной точке ВСП.

Схема армирования области под промежуточными рельсами скрепления. Расположение армирующих элементов соответствует цилиндрической анизотропии и определяется характером распространения фронтов упругих волн.

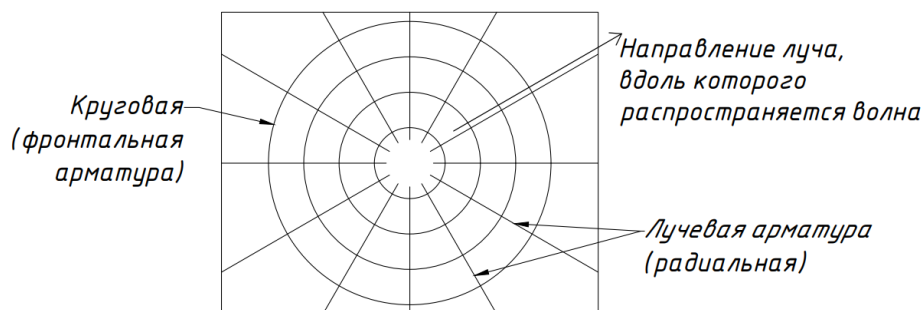


Рис. 12. Схема расположения армирующих элементов.

Данная схема интегрируется в общую схему армирования железобетонных плит транспортных сооружений и располагается по толщине плиты в местах, где сходятся прямые и отраженные волны, и образуются локации с наибольшим напряжением рис. 13. и рис. 14.

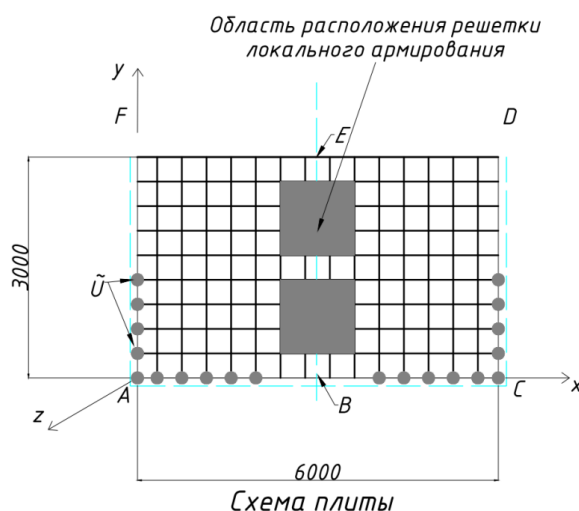


Рис. 13. Область расположения локальной решетки армирования.

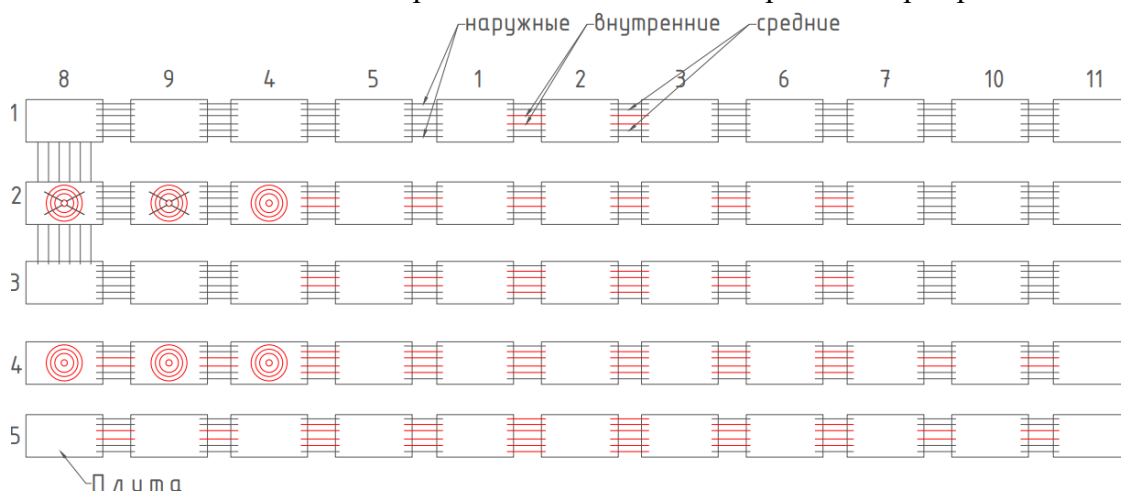


Рис. 14. Общая схема конструкции пути с армированием.

Построена математическая модель распространения волн в упругой среде с учетом рассмотрения волновых процессов после динамического движения на ортотропной пластине колесной пары на ВСП по плоскости железобетонного подрельсового основания (рис. 15).

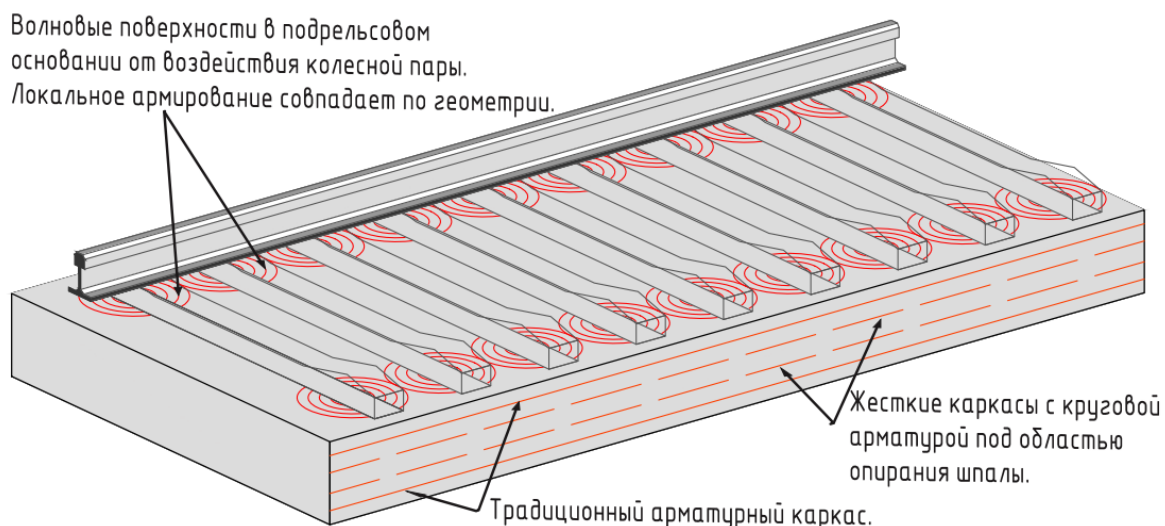


Рис. 15. Модель ж.д. пути с предлагаемой схемой армирования.

Рис. 16 показывает точки встречи прямых и отражённых от границы плиты волн, в которых скорости волновых фронтов со направлены. Предложенные алгоритмы реализованы в виде программного приложения и позволяют учесть параметры реальной железобетонной конструкции безбалластного пути. Количество точек говорит о вычислительной сложности при аналитическом расчете, даже для небольших временных интервалов с момента приложения нагрузки в заданной точке рельсовой плиты.

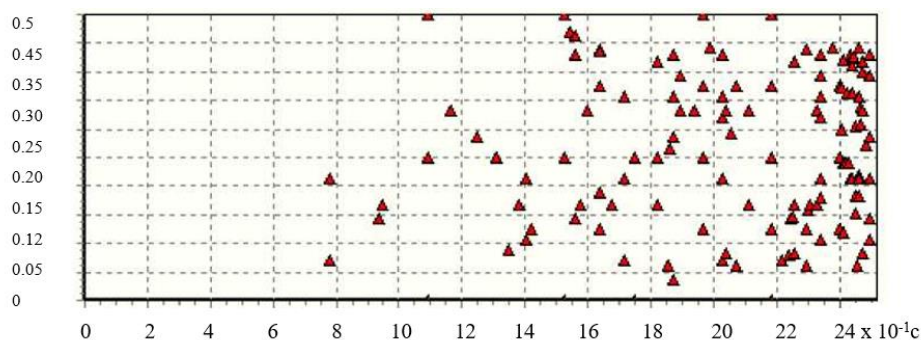


Рис. 16. Точки пересечения прямых и отражённых волн, в которых происходило усиление волновых характеристик за счёт их сонаправленности.

Предлагаемые методы и вычислительные алгоритмы позволяют визуализировать процессы распространения волновых фронтов в плите основания железнодорожного пути после воздействия транспортного средства с учётом множества параметров, которые можно менять в ходе численного эксперимента. Модификация алгоритмического обеспечения позволяет определить местоположение фронтов упругих волн в различные моменты времени и точки схождения отраженных от граней плитного элемента волн различного порядка, где наблюдается локальное увеличение или уменьшение суммарных и эквивалентных напряжений в материале.

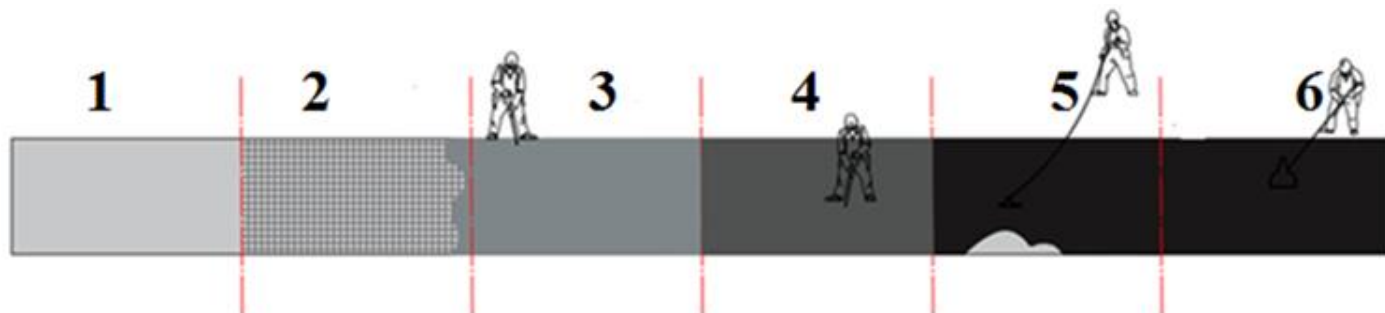
В пятой главе установлено влияние на геометрические (нормальное перемещение, прогиб) и динамические (нормальное напряжение) характеристики деформирования железобетонной плиты основания пути при проезде экипажа анизотропных свойств конструкции в трех основных направлениях. Изучено влияние модулей упругости (в двух направлениях) и модулей сдвига (в трех плоскостях), что позволяет подобрать параметры безбалластной конструкции для различных скоростей экипажа и нагрузки на ось. Предложена технологическая схема армирование безбалластной конструкции пути.

В первую очередь, необходимо определиться с классом безбалластного пути, который можно разделить на готовые железобетонные элементы (плиты) и монолитные плиты с непосредственным формированием и заливкой на строительной площадке при укладке пути рис. 17.



Рис. 17. Основные классы систем безбалластного пути на плитах.

Тип пути на железобетонном монолитном рельсовом фундаменте не требует предварительной сборки путевых элементов. При реализации данной технологии вершины и профили рельсов устанавливаются в рабочее положение. После окончательной центровки вокруг опор рельсов заливается бетонная смесь, которая фиксирует рельсы в требуемом положении рис.18.



1. Подготовка основания; 2. Укладка арматурных сеток; 3. Разравнивание и уплотнение бетонной смеси; 4. Разравнивание и уплотнение бетонной смеси; 5. Вакуумирование бетонной смеси; 6. Разглаживание бетонной поверхности;

Рис. 18. Этапы бетонирования.

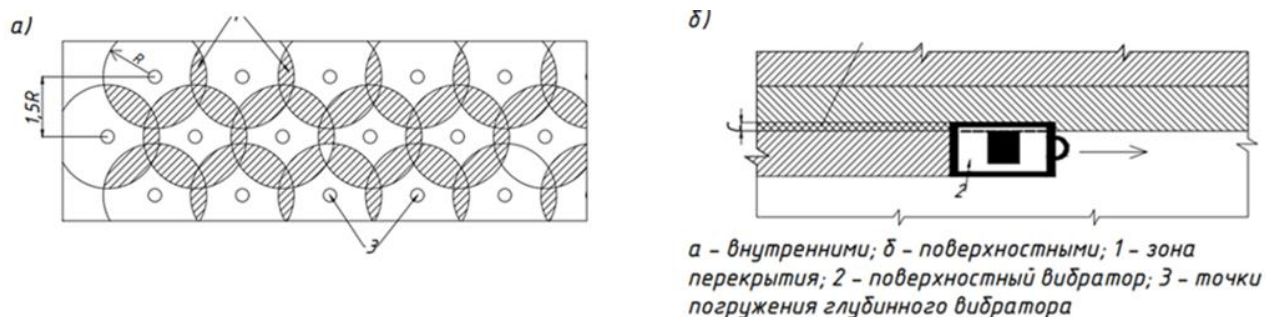


Рис. 19. Правила уплотнения бетонной смеси вибраторами.

Под воздействием вибрации бетонная смесь переходит из рыхлого состояния в жидкое структурное состояние и приобретает подвижность за счет уменьшения трения между частицами, заполняющими все изгибы опалубки, что позволяет обеспечить беспустотное заполнение формы и плотный охват арматуры рис. 19.

Для построения полного портрета динамического поведения всей конструкции железнодорожного пути требуется определить напряжения, возникающие между различными элементами конструкции пути. В настоящем исследовании в качестве сечения, в котором определяются силовые факторы, предлагается взять область сопряжения рельса и подрельсового основания. Представляемый подход к бетонированию позволяет приблизить свойства реальной конструкции из железобетона к свойствам разработанной математической модели составной конструкции, при этом на различных этапах строительства возможно выполнение верификационных процедур, которые позволяют учесть изменение механических характеристик анизотропного материала на различных этапах выполнения строительно-монтажных работ и позволяют вносить оперативные изменения в конструкцию при необходимости увеличения эксплуатационных характеристик будущего железнодорожного пути.

Принимаемые величины в расчетной модели соответствуют реальным строительным материалам, а параметры грунтового основания берутся по результатам диагностики и мониторинга реальных участков железнодорожного пути, по которым в будущем пройдут высокоскоростные железнодорожные магистрали (скорость движения свыше 250 км/ч), на некоторых участках, параметры которых использовались в настоящей работе, уже организовано скоростное движение (скорости от 120 до 250 км/ч), но используются еще конструкции железнодорожного пути, проложенного на балластной призме.

Разработанные технологические процессы соответствуют всем нормам техники безопасности и уменьшают время нахождения работников в потенциально опасных зонах, а также уменьшают количество задействованных работников, что в совокупности с другими рассмотренными факторами позволит приблизиться к целям концепции «нулевого травматизма», что также очень важно, учитывая намечающиеся стройки ВСЖМ Москва – Санкт-Петербург и Москва – Казань, а также реконструкцию транспортной инфраструктуры для нужд проектов МЦД в рамках Московского транспортного узла.

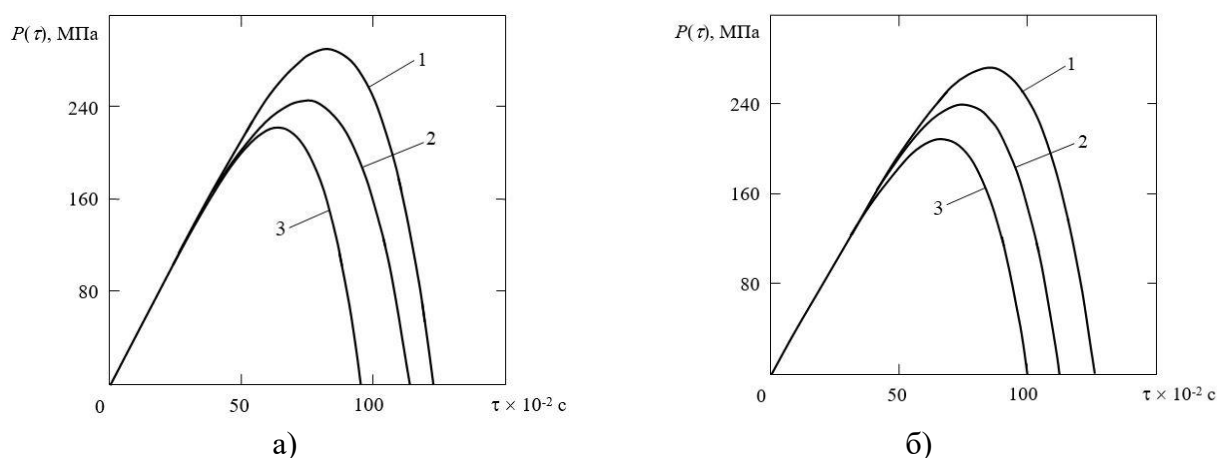


Рис. 20. Зависимость напряжения в месте сопряжения рельса и подрельсового основания от времени для различных значений соотношения а) E_{θ}/E_r , б) $G^{(2)}/G^{(1)}$.

Рис. 20 показывает зависимость напряжения между рельсом и подрельсовым основанием безбалластного пути от времени для различных приведенных значений пути: кривая 1 соответствует $=0.3$,

кривая 2 - $=1$ (трансверсально-изотропная плита основания), кривая 3 - $=2$, другие параметры конструкции и начального воздействия на нее принимают следующие значения: нагрузка на ось 25 тс, толщина бетонной плиты основания 0.4 м, промежуточное рельсовое скрепление АРС – 4, скорость движения экипажа 80 км/ч.

На рис. 20 б) показаны напряжения между рельсом и подрельсовым основанием безбалластного пути от времени для плиты основания, которая моделируется трансверсально-изотропной пластинкой ($E_\theta/E_r=1$), для различных модулей сдвига в направлении, перпендикулярном плоскости пластины (меняются значения G_{tz}). Переходя к безразмерным величинам, т.е. рассматривая изменение соотношений скоростей квазипродольной и квазипоперечной упругих волн: кривая 1 построена при $G^{(2)}/G^{(1)}=0.1$, кривая 2 - $G^{(2)}/G^{(1)}=0.3$, кривая 3 - $G^{(2)}/G^{(1)}=0.5$ (изотропная пластинка).

Из рис. 20 видно, что с увеличением значений соотношений E_θ/E_r и $G^{(2)}/G^{(1)}$ напряжение в области сопряжения рельсовой плети и подрельсового основания уменьшается. Можно отметить, что поведение напряжения в первые моменты времени воздействия колеса на рельс в рассматриваемом сечении практически не зависит от отношения упругих характеристик железобетонной плиты, фактически параметры ее армирования в эти моменты времени нивелируются, но они существенно влияют на максимальное значение напряжения и время, в которое первичные напряжения остаются положительными, отодвигая область разгрузки далее вправо. Этот факт можно объяснить, т.к. отрезок степенного ряда для силовой характеристики приложения нагрузки (будь-то контактная сила или напряжение) начинается с коэффициента, линейно зависящего от временного параметра, а параметры армирования плиты начинают входить в определяющие соотношения при четвертой и более старших степенях времени.

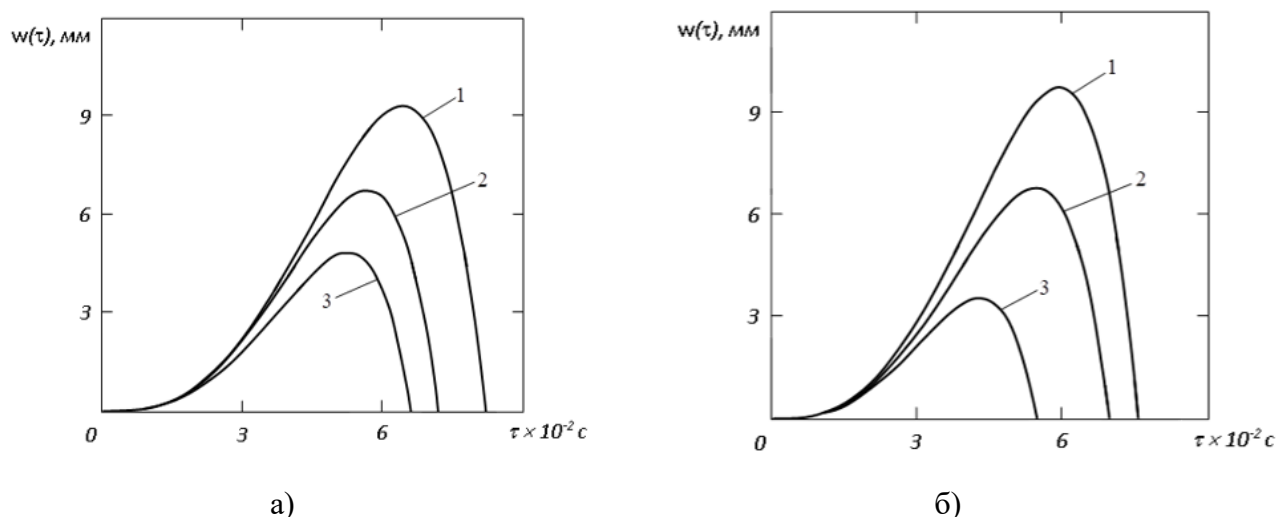


Рис.21 Зависимость вертикальных динамических перемещений в месте сопряжения рельса и подрельсового основания от времени для различных значений соотношения а) E_θ/E_r , б) $G^{(2)}/G^{(1)}$.

Одним из основных параметров динамического поведения железнодорожного пути под подвижной нагрузкой являются вертикальные перемещения элементов верхнего строения пути в различных уровнях, прогибы, осадки, просадки являются частными случаями таких перемещений и фиксируются в ходе проведения работ по диагностике и мониторингу. Используя соотношения для вертикального динамического перемещения, построим графики зависимостей данной величины от времени для различных механических характеристик, отражающих анизотропные свойства железобетонной плиты основания железнодорожного пути.

На рис. 21 а) приведены зависимости нормального динамического перемещения точек, расположенных между рельсом и подрельсовым основанием безбалластного пути, от времени для различных приведенных значений E_θ/E_r пути: кривая 1 соответствует $E_\theta/E_r=0.5$, кривая 2 - $E_\theta/E_r=1$ (трансверсально-изотропная плита основания), кривая 3 - $E_\theta/E_r=3$, другие параметры конструкции и начального воздействия на нее принимают те же значения, что и при построении графиков на рис. 20. Можно отметить, что увеличение соотношения E_θ/E_r приводит к уменьшению вертикального перемещения, что иллюстрирует факт уменьшения абсолютной величины последнего слагаемого при росте величины $E_\theta/E_r > 1$.

Рис. 21 б) иллюстрирует вертикальные динамические перемещения точек в сечении между рельсовой плетью и подрельсовым основанием, с условием, что рассматривается трансверсально-изотропная плита основания ($E_\theta/E_r=1$) с различными модулями сдвига в вертикальной плоскости, ориентированной вдоль рельсов (меняются значения G_{rz}). Учитывая безразмерный формат величин в результирующих соотношениях, отношение модуля сдвига и модуля упругости сводится к отношению скоростей фронтов квазипродольной и квазипоперечной упругих волн: кривая 1 получена если $G^{(2)}/G^{(1)}=0.3$, кривая 2 - $G^{(2)}/G^{(1)}=1$, кривая 3 - $G^{(2)}/G^{(1)}=2$. Визуальный анализ рис. 21 б) показывает, что увеличение величины $G^{(2)}/G^{(1)}$ приводит к уменьшению вертикального перемещения и уменьшению времени нахождения конструкции в деформированном состоянии (рассматриваются перемещения, направленные вертикально вниз).

Из рис. 21 видно, что с увеличением значений соотношений E_θ/E_r и $G^{(2)}/G^{(1)}$ вертикальное перемещение точек в области сопряжения рельсовой плети и подрельсового основания уменьшается, причем более интенсивно, чем значения напряжений при похожих упругих характеристиках материала конструкции на рис. 20. Можно отметить, что отрезок степенного разложения для вертикального динамического перемещения начинается с коэффициента при третьей степени времени (t^3), этим можно объяснить форму кривых на рис.21 в первые моменты динамического воздействия со стороны колеса, напоминающую кубическую параболу. Механические характеристики, учитывающие анизотропные свойства конструкции входят в коэффициенты при t^4 и t^5 , поэтому они начинают оказывать активное воздействие на динамические функции перемещений во второй и третьей трети первичного деформированного состояния плиты (до того момента, когда перемещение-прогиб станет положительным). Таким образом, армирование оказывает существенное влияние на вертикальное перемещение с момента времени около 0.02 с, а до этого на величину перемещения существенно влияют упругие характеристики в системе контакта «колесо-рельс-подкладка скрепления».

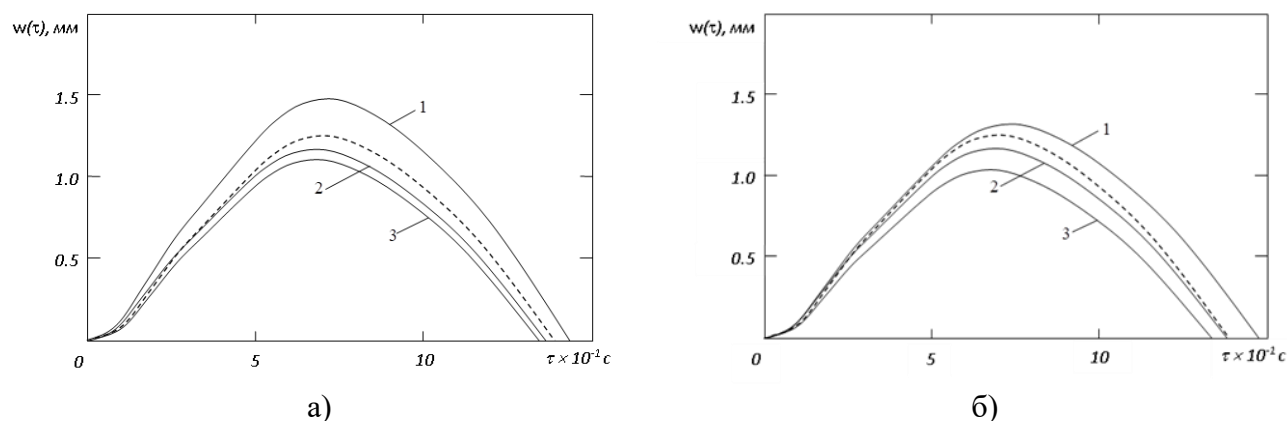


Рис. 22. Зависимость динамического прогиба плиты основания под область контакта колеса и рельса от времени для различных значений а) E_θ/E_r , б) $G_{rz}, G_{\theta z}, G_{r\theta}$.

Анализируя графики динамического вертикального перемещения, можно подобрать анизотропные свойства плиты (или элементов ее армирования), таким образом, чтобы добиться нормативных значений осадки для требуемых скоростей движения экипажей и нагрузок на ось.

Еще одним важным параметром, характеризующим динамическое поведение верхнего строения железнодорожного пути, испытывающего воздействие со стороны подвижного состава, является вертикальное перемещение точек нижней грани железобетонной плиты безбалластной конструкции (фактически прогиб плиты, опирающейся на упругий слой подготовки), данную величину можно напрямую определить с помощью геодезического мониторинга и косвенно найти, обрабатывая результаты измерений вагона-путеизмерителя. С помощью выражения для динамического прогиба, полученного выше и представляющего собой отрезок степенного ряда, построим кривые на рис. 22 определяющие зависимость прогиба железобетонной плиты от времени для различных значений модулей упругости рис.22 а) и различных значений модулей сдвига в трех основных плоскостях анизотропии рис.22 б). Сплошные линии соответствуют расчетным значениям, полученным при армировании по предложенной методике, а пунктирная линия соответствует традиционному армированию по действующим нормативным документам.

Полученные на рис. 22 а) кривые, характеризующие динамический прогиб соответствуют следующим значениям модулей упругости: кривая 1 - $E_\theta = 15$ МПа, $E_r = 35$ МПа; кривая 2 - $E_\theta = 20$ МПа, $E_r = 35$ МПа; кривая 3 - $E_\theta = 35$ МПа, $E_r = 35$ МПа, другие параметры конструкции и начального воздействия на нее принимают те же значения, что и при построении графиков на рис. 20, а значения модулей сдвига одинаковы ($G_{rz} = G_{\theta z} = G_{r\theta} = 12$ МПа).

На рис. 22 б) графики соответствуют следующим значениям: кривая 1 - $G_{rz} = 14$ МПа, $G_{\theta z} = 14$ МПа, $G_{r\theta} = 3$ МПа; кривая 2 - $G_{rz} = 14$ МПа, $G_{\theta z} = 3$ МПа, $G_{r\theta} = 14$ МПа; кривая 3 - $G_{rz} = 14$ МПа, $G_{\theta z} = 14$ МПа, $G_{r\theta} = 14$ МПа, другие параметры конструкции и начального воздействия на нее принимают те же значения, что и при построении графиков на рис. 20, а значения модулей упругости одинаковы ($E_\theta = E_r = 38$ МПа).

Визуальный анализ показывает, что уменьшение значений E_r и E_θ приводит к увеличению максимума динамического прогиба и времени деформирования плиты (оно увеличивается не так интенсивно как максимальное значение прогиба), можно также отметить, что значение E_r сильнее влияет на прогиб чем E_θ . Когда модуль сдвига уменьшается, прогиб увеличивается настолько, насколько это возможно, как можно отметить из рис. 22 б), модуль сдвига $G_{\theta z}$ наиболее значим для вертикальных перемещений низа плиты. Сравнивая результаты численно-аналитического моделирования для различных значений механических характеристик анизотропной железобетонной плиты с результатами, полученными при наличии армирования, рассчитанного традиционными методами, видно, что, изменяя модули сдвига и упругости можно и увеличить, и уменьшить осадку верхнего строения пути при динамических воздействиях на него. Достаточно точное совпадение результатов применения предлагаемой методики армирования и традиционных подходов для устройства железобетонной плиты ВСП позволяет утверждать о возможности использования результатов данной диссертационной работы в реальной проблематике устойчивой эксплуатации современных железных дорог, проектирования высокоскоростных железнодорожных магистралей и транспортных систем городских агломераций.

Особенностью представляемых в данном разделе результатов является их многофакторность и совмещение различных подходов к моделированию и расчету напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций. Представлены результаты использования предложенной методики для вычисления силы, передаваемой на плиту подрельсового основания, и нормального перемещения данной железобетонной плиты при действии внешнего динамического воздействия со стороны движущегося экипажа, представлены результаты использования традиционных методик для расчета армирования и расположения армирующих элементов в массиве бетонной матрицы. Результаты, представленные в виде графических кривых и аналитических зависимостей позволяют не только оценить вклад параметров анизотропии и волновых явлений в итоговые динамические характеристики, но и совершить предельные переходы между различными типами конструкции основания безбалластного пути: бетонная плита без армирования, железобетонная плита с традиционным армированием, многослойная конструкция из бетонных и композитных слоев, железобетонная конструкция с армированием по предложенной схеме с подобранными механическими характеристиками в трех основных направлениях анизотропии. Такой подход позволяет оценить ремонтпригодность предлагаемой конструкции основания пути и установить возможные ослабления при проведении ремонтных работ с целью установки временных ограничений на скорость состава, нагрузку на ось и общий вес снаряженного поезда.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложены критерии классификации подходов динамического деформирования плоских элементов при действии нагрузки от транспортных средств: модель контактного взаимодействия колеса-рельса, модель деформирования плоского элемента (с учетом стационарных или нестационарных процессов), реологические и анизотропные свойства материала плиты. Разработанная система классификации позволяет более точно представить и решить инженерные задачи деформирования ВСП.

2. Разработана математическая модель для плит, испытывающих кратковременные динамические воздействия, позволяющая одновременно учитывать волновые процессы, различие реологических свойств материала и анизотропных свойств конструкции, в том числе и с

предварительно напряженной арматурой. Предложенная модель адаптирована для проектирования плитного основания безбалластного железнодорожного пути и позволяет увеличить точность определения геометрических и динамических свойств деформирования на 10-15% по сравнению с имеющимися алгоритмами и подходит для расчета безбалластных конструкций.

3. Предложенное алгоритмическое и математическое обеспечение позволяет построить волновую картину распространения упругих волн, определить их влияние на деформированное состояние пластины, вычислить расположение точек встречи прямых и отраженных предельных и поперечных волн, которые взаимно усиливают или гасят друг друга. Данный процесс позволяет определить местоположение фронтов волновых поверхностей в любой момент времени после прохода колесной пары в заданную точку ВСП.

4. Предложена схема армирования железобетонной плиты основания безбалластной конструкции железнодорожного пути, учитывающая общие процессы деформирования макросегмента пути и характер распространения волновых поверхностей вблизи области контакта подрельсового основания и плитного основания. Предложенная схема объединяет прямоугольный традиционный каркас плиты и локальные сетки с круговой и радиальной арматурой и позволяет более полно учитывать свойства используемых материалов, более точно прогнозировать динамическое поведение итоговой композитной конструкции.

5. Установлено влияние на геометрические (нормальное перемещение, прогиб) и динамические (нормальное напряжение) характеристики деформирования железобетонной плиты основания пути при проезде экипажа анизотропных свойств конструкции в трех основных направлениях. Изучено влияние модулей упругости (в двух направлениях) и модулей сдвига (в трех плоскостях), что позволяет подобрать параметры безбалластной конструкции для различных скоростей экипажа и нагрузки на ось.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

Scopus

- 1) Локтев, А.А. Моделирование поведения сегмента рельсовой плети при динамическом воздействии [Текст] / А. А. Локтев, Е. А. Гридасова, Л. А. Илларионова // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки. – 2020. – № 4 (91). – С. 24-41.
- 2) Loktev A., Korolev V., Shishkina I., Illarionova L., Loktev D., Gridasova E. Dynamic behavior model of the ballastless railroad track segment considering wave processes // E3S Web of Conferences, 2020, 164, 03035
- 3) . Loktev A., Korolev V., Shishkina I., Illarionova L., Loktev D., Gridasova E. Perspective constructions of bridge crossings on transport lines // Advances in Intelligent Systems and Computing . – 2020. – Vol. 1116 AISC. – P. 209-218.

а. Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

- 4) Илларионова Л.А. Возможность учета влияния траектории движения транспортно-технологических средств на подвижные процессы [Текст] / Л.А. Илларионова, В.А. Кочнев // Наука и техника транспорта-2022 №1. - С. 65-69.
- 5) -Локтев, А. А. Возможности вибродиагностики низководных мостовых переходов [Текст] / А. А. Локтев, Л.А. Илларионова, А. Баракат // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева Серия: Механика предельного состояния. 2021. №4 (50). - С. 40–51.
- 6) Локтев, А.А. Влияние волновых процессов на армирование плиты основания безбалластного железнодорожного пути [Текст] / А. А. Локтев, Л. А. Илларионова // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15. Вып. 12. – С. 1632–1643. – DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1632-1643.
- 7) Локтев А. А. Моделирование анизотропной плиты основания безбалластного железнодорожного пути при динамических воздействиях [Текст] / А. А. Локтев, Л. А. Илларионова, // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15. Вып. 8. – С. 1105–1114. – DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1105-1114.

а. Статьи и материалы конференций

- 8) Дмитриев, В.Г. Исследование особенностей деформирования монолитных и составных железобетонных конструкций каркасного типа при комбинированных нагружениях [Текст] / В. Г. Дмитриев, Л. А. Дмитриева, А. И. Роффе, А. А. Судьин // Внедрение современных

- конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2016. – Т. 10. № 10 (10). – С. 52-63.
- 9) Дмитриев, В. Г. Об одной математической модели упруго-пластического деформирования арок и панелей при больших перемещениях и углах поворота [Текст] / В. Г. Дмитриев, С. И. Жаворонок, Л. А. Илларионова, Л. Н. Рабинский // В сборнике: Материалы XX Юбилейной Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным системам (ВМСППС'2017). – 2017. – С. 228-229.
- 10) Дмитриев, В. Г. Геометрически и физически нелинейное деформирования арочных и оболочечных конструкций при статических нагрузках [Текст] / В. Г. Дмитриев, С. И. Жаворонок, О. В. Егорова, Л. А. Илларионова // В книге: Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Материалы XXIV международного симпозиума имени А.Г. Горшкова. – 2018. – С. 89-90.
- 11) Илларионова, Л. А. Моделирование сегмента безбалластного железнодорожного пути с применением инновационной технологии армирования [Текст] / Л. А. Илларионова, А. А. Локтев // В сборнике: Системы управления, сложные системы: моделирование, устойчивость, стабилизация, интеллектуальные технологии. материалы VI Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора А. А. Шестакова. Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина. Елец, – 2020. – С. 424-431.
- 12) Илларионова, Л.А. Моделирование поведения ледового покрова в сезонных конструкциях транспортной инфраструктуры [Текст] / Л. А. Илларионова, А. А. Локтев // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2021. – Т. 17. № 17. – С. 68-72.
- 13) Илларионова, Л. А. Анизотропные конструкции при строительстве и ремонте железнодорожной инфраструктуры [Текст] / Л. А. Илларионова, А. А. Локтев // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2021. – Т. 17. № 17. – С. 55-60.
- 14) Локтев, А.А. Моделирование сегмента плиты основания безбалластного пути с учетом собственных колебаний и возможности замены при ремонте [Текст] / А. А. Локтев, Е. В. Запольнова, Л. А. Илларионова // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2019. – Т. 14. № 14 (14). – С. 51-56.
- 15) Локтев, А.А. Модель плиты основания безбалластного пути с учетом различных граничных условий [Текст] / А. А. Локтев, Е. В. Запольнова, Л. А. Илларионова, Д. А. Локтев // В сборнике: Современные проблемы железнодорожного транспорта. Сборник трудов по результатам международной интернет-конференции. В 2-х томах. Под общей редакцией К.А. Сергеева. – 2019. – С. 546-553.
- 16) Локтев, А.А. Влияние волновых процессов от динамической нагрузки при проектировании плитного основания безбалластного пути [Текст] / А. А. Локтев, Л. А. Илларионова // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2020. – Т. 16. № 16 (16). – С. 5-14.
- 17) Илларионова Л.А., Определение несущей способности плавающих ледовых пластин, испытывающих статическую вертикальную нагрузку [Текст] / Л.А. Илларионова, А. А. Локтев // В сборнике: Системы управления, сложные системы: моделирование, устойчивость, стабилизация, интеллектуальные технологии. материалы VII Международной научно-практической конференции. Елец, - 2021. С. 311-315.