На правах рукописи

Поляков Сергей Юрьевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ДОЛГОВЕЧНОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ НА ОРТОТРОПНОЙ ПЛИТЕ МОСТОВ ПО КРИТЕРИЮ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ

Специальность 05.23.11 – «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена на кафедре «Мосты» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО СГУПС)

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Яшнов Андрей Николаевич

Официальные оппоненты: **Телтаев Багдат Бурханбайулы**
доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Республики Казахстан, президент АО «КаздорНИИ» (г. Алматы)

Парфенов Алексей Александрович
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автомобильные дороги» ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

Защита состоится «01» июля 2021 г. в 10-00 на заседании диссертационного совета Д 999.174.02 на базе федеральных государственных бюджетных образовательных учреждений высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» и «Томский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, ауд. 224.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения» и на сайте www.stu.ru

Отзывы на диссертацию и автореферат диссертации с указанием ФИО, почтового адреса, телефона, адреса электронной почты, наименования организации и должности, подписанные и заверенные печатью организации, в двух экземплярах просим направить в адрес диссертационного совета.

Автореферат разослан «30» апреля 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, доцент Ланис Алексей Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Согласно Постановлению Правительства РФ № 658 от 30.05.2017, межремонтные сроки эксплуатации автомобильных дорог федерального значения с усовершенствованным типом покрытия (к которым относится и одежда ездового полотна мостов на федеральных трассах) составляют 12 лет, по капитальному ремонту – 24 года. Но результаты наблюдений в ходе эксплуатации показывают, что дефекты в асфальтобетонном покрытии пролетных строений с ортотропной плитой проявляются уже в первые несколько лет после постройки или капитального ремонта моста, что влияет на безопасность движения и снижает долговечность. Как правило, это продольные и поперечные трещины в местах наибольшей локальной жесткости проезжей части (над стенками главных и, реже, поперечных балок). За рубежом подобные неисправности фиксировались и над стенками продольных коробчатых стрингеров.

Наиболее вероятной причиной возникновения подобных трещин является приложение нагрузки с количеством циклов воздействия, превышающим предельные для материала значения. К этому приводит отсутствие соответствующей нормативной базы относительно расчета покрытия, из-за чего состав одежды ездового полотна назначается конструктивно, без учета особенностей характера ее работы на мосту.

Таким образом, **актуальность исследования** обусловлена необходимостью увеличения бездефектного срока службы одежды ездового полотна на металлических мостах с ортотропной плитой.

Степень разработанности темы исследования. В нашей стране исследованиям характера работы одежды ездового полотна на мостах с ортотропными плитами посвящены работы Р.С. Азояна, И.Д. Сахаровой, Д.И. Гегелия, Н.А. Волкова, В.А. Захарова, А.К. Бобарыкина, Я.Д. Лившица, Д.Ю. Виноградского, Ю.Д. Руденко, А.С. Судомоина, И.Г. Овчинникова, Р.А. Каюмова, Н.Н. Беляева, М.А. Телегина, С.И. Дубины и др.

Аналогичные исследования за рубежом проводятся еще с конца 50-х годов XX века, то есть практически с самого начала масштабного внедрения данного типа проезжей части в инженерную практику. Существенный вклад в установление и изучение особенностей характера работы одежды ездового полотна на искусственных сооружениях внесли Xianhua Chen, Xueyan Liu, Zhendong Qian, Zhang Lei, Sang Luo, Qing Lu, A. Scarpas, M.H. Kolstein, A. Molenaar, S. Bild, C. Seim, T. Ingham, G.H. Gunter, S. Bild, G. Sedlacek, J. Wardenier, H. Kolstein, Ravi Sankar Chamarthi, Tae Woo Kim, Jongeun Baek, Hyun Jong Lee и др.

Изучением влияния условий загружения на механические характеристики асфальтобетона в разное время занимались Papazian, M.Witczak, Van der Poel, T. Hirsch, D. Christensen, T. Pellinen, R. Bonaquist, Al-Khateeb, Н.Н. Иванов, И.М. Руденская, А.В. Руденский, А.В. Смирнов, Н.В. Горелышев, Л.А. Горелышева, Л.Б. Гезенцвей, Н.Н. Беляев, Г.Н. Кирюхин, Б.С. Радовский,

Б.Б. Телтаев, В.А. Золотарев, А.М. Кириллов, А.Г. Щербаков, Ю.М. Сибирякова, О.В. Дровалева и др.

Достигнутые учеными результаты позволяют сделать следующий шаг в развитии представлений о характере работы одежды ездового полотна на искусственных сооружениях, что должно найти свое отражение при проектировании конструкции проезжей части автодорожных мостов.

Объект исследования – асфальтобетонное покрытие одежды ездового полотна на ортотропной плите автодорожных металлических мостов.

Предмет исследования – долговечность асфальтобетонного покрытия одежды ездового полотна на ортотропной плите автодорожных металлических мостов по критерию усталостного разрушения.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния.

Усталость – процесс постепенного накопления повреждений в материале под воздействием повторяющихся нагрузок.

Цель исследования – повышение точности оценки расчетной долговечности асфальтобетонного покрытия на автодорожных мостах по критерию усталостного разрушения за счет учета особенностей совместной работы одежды ездового полотна с ортотропной плитой.

Для достижения цели были решены следующие **задачи**:

- обоснование расчетных допущений при создании математической модели для определения напряженно-деформированного состояния одежды ездового полотна с учетом ее совместной работы с элементами пролетного строения;
- проведение расчетно-экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния одежды ездового полотна на ортотропной плите металлических мостов;
- разработка алгоритма расчета долговечности асфальтобетонного покрытия на ортотропной плите по критерию усталостного разрушения.

Научная новизна работы:

1) уточнена математическая модель, описывающая взаимодействие одежды ездового полотна с несущими конструкциями пролетного строения, путем учета вязкоупругого характера деформирования содержащих органическое вяжущее материалов;

2) разработана новая экспериментальная методика определения напряженно-деформированного состояния асфальтобетонного покрытия на мостах, позволившая выявить качественные и количественные закономерности распределения напряжений в асфальтобетонном покрытии от воздействия временной нагрузки в зависимости от конструкции проезжей части;

3) предложен подход к определению долговечности асфальтобетонного покрытия на ортотропной плите по критерию усталостного разрушения, учитывающий податливость основания, зависимость свойств материала от длительности каждого одиночного воздействия подвижной нагрузки и температуры материала, а также неравномерность накопления дефектов в течение года.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы. Изучены причинно-следственные связи между конструкцией проезжей части, условиями загружения асфальтобетонного покрытия, величиной напряжений в асфальтобетонном покрытии на мостах и возникновением регулярных трещин над стенками главных и поперечных балок и между главными балками. Проведена модернизация существующей математической модели для определения напряженно-деформированного состояния асфальтобетонного покрытия на мостах, обеспечивающая воспроизводимость расчетным путем экспериментально полученных данных по деформациям покрытия при воздействии подвижной нагрузки.

Разработана и внедрена усовершенствованная методика расчета долговечности асфальтобетонного покрытия на мостах по критерию усталостного разрушения, учитывающая зависимость свойств материала от температуры и длительности каждого одиночного воздействия нагрузки, а также неравномерность накопления дефектов в течение года. Методика внедрена при проектировании капитального ремонта моста через левый рукав реки Северная Двина.

Методология и методы исследования. Поставленные в рамках исследования задачи решены посредством применения совокупности теоретических и экспериментальных методов научного познания: наблюдение за состоянием асфальтобетонного покрытия; анализ, сопоставление и синтез имеющихся теоретических и экспериментальных материалов; проведение эксперимента с измерением деформаций асфальтобетонного покрытия; выполнение теоретических исследований на основе экспериментальных данных и математических моделей; математическое моделирование, в частности, численное моделирование методом конечных элементов.

Основные положения, выносимые на защиту:

- математическая модель для определения напряжений в асфальтобетонном покрытии одежды ездового полотна при воздействии подвижной нагрузки, составленная с учетом вязкоупругого характера деформирования содержащих органическое вяжущее материалов;
- впервые полученные экспериментальные данные о напряженно-деформированном состоянии асфальтобетонного покрытия на ортотропных плитах с полосовыми и коробчатыми продольными ребрами при различных величине и длительности однократного воздействия подвижной нагрузки и температуре материала;
- алгоритм по определению долговечности асфальтобетонного покрытия на ортотропной плите по критерию усталостного разрушения, учитывающий податливость основания, зависимость свойств материала от длительности одиночного воздействия подвижной нагрузки и температуры материала, неравномерность накопления дефектов в течение года.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением поверенного измерительного оборудования, сертифицированного расчетного комплекса, сравнением с результатами экспериментальных исследований других авторов. Достоверность подтверждается согласованностью результатов

натурных наблюдений, теоретических и экспериментальных работ, воспроизводимостью результатов исследования в различных условиях.

Апробация основных результатов диссертационного исследования была выполнена на Международной научно-практической конференции «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе» (ПНИПУ, г. Пермь, 14.04.16 г.); Международной научно-технической конференции «Инновационный транспорт-2016: специализация железных дорог» (УрГУПС, г. Екатеринбург, 16.11.16 г.); IX и X Международных научно-технических конференциях «Политранспортные системы» (СГУПС, г. Новосибирск, 18.11.16 г. и 15.11.18 г.); 76-й международной научно-методической и научно-исследовательской конференции (МАДИ, г. Москва, 31.01.2018 г.); XXIX, XXX и XXXI научно-методических и научно-исследовательских конференциях «Ежегодная научная сессия международной ассоциации исследователей асфальтобетона» (МАДИ, г. Москва, 31.01.17 г., 31.01.2018 г. и 28.01.2020 г.); XXI научно-методической конференции (ВИТУ, г. Санкт-Петербург, 16.03.17 г.); XLI и XLII Международных научно-практических конференциях «Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика». (КазАТК, г. Алматы, 03-04.04.17 г. и 18.04.18 г.); Международной научно-практической конференции «Цифровые технологии и инновационные материалы в дорожном и мостовом строительстве». (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, 24-25 сентября 2020 г.).

Внедрение результатов.

Результаты исследований нашли практическое применение при ремонте одежды ездового полотна на Байдаевском мосту через р. Томь в Кемеровской области. Результаты включены в Специальные технические условия на проектирование капитального ремонта моста через левый рукав р. Северная Двина, согласованные Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. Данные, полученные в ходе работы, используются в учебном процессе при подготовке магистров ФГБОУ ВО СГУПС.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 3 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, и одна статья в издании, входящем в базу данных *Web of Science*.

Личный вклад автора заключается в участии на всех этапах процесса научного исследования, непосредственном участии в получении исходных данных и в натурных экспериментах; в обработке и интерпретации экспериментальных данных; в подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем составляет 165 страниц, содержит 82 рисунка, 19 таблиц и 3 приложения. Список литературы содержит 164 источника, из которых 57 – на иностранных языках.

В тексте автореферата используются следующие сокращения: КЭ-модель – конечно-элементная модель; ПС – пролетное строение; ПЧ – проезжая часть; ОП – ортотропная плита; АК – нормативная нагрузка от транспортных средств.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертации приведены результаты обследований одежды ездового полотна нескольких внеклассных искусственных сооружений с ортотропной плитой (ОП) проезжей части (ПЧ). Установлено, что для близких конструктивных решений проявляются схожие дефекты. Как правило, это продольные и, реже, поперечные трещины в местах наибольшей жесткости проезжей части (над стенками главных и поперечных балок, соответственно). Выявляются, но значительно реже, регулярные продольные трещины в покрытии на участке между стенками главных балок.

С целью выяснения причин возникновения подобных дефектов проанализирован отечественный и зарубежный опыт проектирования одежды ездового полотна на ортотропной плите. Установлено, что:

- параметры ортотропных плит отличаются разнообразием. За рубежом полосовые продольные ребра не применяются уже в течение длительного промежутка времени. Жесткость отечественных конструкций с замкнутыми продольными ребрами несколько ниже, чем у иностранных аналогов, вследствие меньшей высоты стрингеров;
- за рубежом на искусственных сооружениях, как правило, укладываются специально запроектированные асфальтобетоны, которые не применяются для дорожной одежды на земляном полотне. Предъявляемые к ним требования учитывают максимальную и минимальную температуры эксплуатации, динамический характер воздействия нагрузки, упругие и пластические свойства материала. Также предусмотрен более строгий режим содержания покрытий;
- положения отечественной нормативной документации по проектированию одежды ездового полотна на ортотропной плите недостаточно эффективны и не отражают всех особенностей характера работы покрытия на пролетном строении. А отсутствие конкретных рекомендаций приводит к тому, что практически на каждом внеклассном сооружении проектируют свою конструкцию одежды ездового полотна, нередко игнорируя при этом имеющийся опыт;
- полученные отечественными исследователями результаты по большей части носят узкую применимость и сложность интерпретирования для аналогичных сооружений;
- существующая методика проектирования нежесткой дорожной одежды на земляном полотне не может быть использована применительно к покрытиям на мостах без корректировки. Характер работы асфальтобетона на проезжей части и на земляном полотне отличен друг от друга по причине абсолютно разной конструкции основания. Кроме того, ортотропная плита – существенно более гибкая конструкция, следовательно, в покрытии на ней будут возникать бóльшие деформации.

Все это приводит к тому, что в покрытии около 30 % больших и средних мостов дефекты появляются уже после первого года эксплуатации, а время до существенных капитальных вложений часто не превышает и пяти лет.

Тот факт, что трещины возникают не сразу, а спустя какое-то время, позволил выдвинуть **гипотезу**, что причина этого - приложение количества циклов нагружения, превышающего предельно допустимое значение, то есть недостаточная долговечность асфальтобетона по критерию усталостного разрушения. Для покрытия в составе автодороги на земляном полотне подобная методика расчета на выносливость уже реализована. Но проведенный анализ показал, что для корректного расчета покрытия на искусственном сооружении дополнительно должны быть учтены или адаптированы применительно к условиям работы одежды ездового полотна на мостах следующие факторы:

1. вязкоупругий характер деформирования материалов одежды ездового полотна, содержащих органическое вяжущее;
2. характер приложения нагрузки от транспортных средств;
3. характер связи асфальтобетонного покрытия с несущими конструкциями проезжей части моста;
4. податливость основания, на которое уложена одежда ездового полотна.

Установлено, что апробированные на практике расчетные модели для вычисления напряжений в асфальтобетонном покрытии на мостах отсутствуют, поэтому в настоящее время получение достоверных результатов затруднительно.

Таким образом, к тому, что первые дефекты в покрытии на мостах появляются уже через несколько лет после начала эксплуатации, в нашей стране приводит несовершенство методики проектирования конструкции проезжей части.

Во второй главе диссертации обоснованы расчетные предпосылки и допущения при определении напряженно-деформированного состояния одежды ездового полотна с учетом ее совместной работы с элементами пролетного строения – значения показателей деформативности материалов, учитывающие вязкоупругий характер деформирования, основные положения конечно-элементного моделирования рассматриваемых конструкций, параметры подвижной нагрузки и характер ее приложения к покрытию.

Асфальтобетон – упруго-вязко-пластичный материал, т.е. характер связи прикладываемой нагрузки и деформации под ее воздействием зависит от температуры, длительности загружения и уровня напряженного состояния материала. Соответственно, эти же факторы должны быть учтены при определении механических характеристик асфальтобетона с целью расчета напряженно-деформированного состояния одежды ездового полотна.

При подготовке диссертационной работы автором было рассмотрено и проанализировано несколько учитывающих это зависимостей, в результате чего принято решение в дальнейшем для вычисления модуля упругости асфальтобетона E использовать модель T. Hirsch, усовершенствованную T. Pellinen, D. Christensen и R. Bonaquist:

$$E = P_c[E_{agg} \cdot (1 - VMA) + E_b \cdot VMA \cdot VFA] + \frac{1 - P_c}{\frac{(1 - VMA)}{E_{agg}} + \frac{VMA}{E_b \cdot VFA}}, \qquad (1)$$

где E_{agg} – модуль упругости каменного материала; E_b – модуль упругости вяжущего; VMA – пористость минерального материала (в долях единицы); VFA – доля межзерновых пор, заполненных вяжущим; P_c - контактная функция, характеризующая связь между компонентами асфальтобетона.

Модуль упругости вяжущего рассчитан по выведенной Б.С. Радовским и Б.Б. Телтаевым зависимости:

$$E_b = E_g \left[1 + \left(\frac{E_g t}{3\eta} \right)^b \right]^{-\left(1+\frac{1}{b}\right)}, \qquad (2)$$

где E_g - мгновенный модуль упругости вяжущего (принимается равным 2460 МПа); η – сдвиговая ньютоновская вязкость, зависящая от типа битума и его температуры; t - длительность воздействия нагрузки, с; b – показатель степени:

$$b = \frac{1}{\frac{1}{\beta} + \frac{\ln(\pi)}{\ln(2)} - 2}, \qquad (3)$$

где β – показатель ($0 < \beta < 1$), который предполагается зависящим только от индекса пенетрации битума.

В соответствии с данной расчетной моделью поперечные деформации материала зависят от его продольных деформаций. Соответственно, величина коэффициента Пуассона должна зависеть от модуля упругости. На основании этого значения коэффициента Пуассона ν определены по зависимости, приведенной в зарубежном Руководстве по механико-эмпирическому проектированию покрытий (Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Part 2. Design Inputs. Chapter 2. Material characterization):

$$\nu = 0{,}15 + \frac{0{,}35}{1 + e^{-12{,}452 + 2{,}291 \cdot \lg 0{,}00689E}}. \qquad (4)$$

Поскольку параметры формулы (1) и входящих в нее зависимостей могут быть получены из отечественных ГОСТов на асфальтобетонные смеси и асфальтобетон, данная расчетная модель пригодна для вычисления модуля упругости и коэффициента Пуассона всех видов асфальтобетона, применяющихся при устройстве одежды ездового полотна в нашей стране.

Характеристики защитно-сцепляющего слоя ввиду отсутствия формализованных данных и после анализа его конструкции принимались аналогично битуму, что позволяет применять формулу (2) для вычисления его модуля упругости. Коэффициент Пуассона согласно исследованиям Б.С. Радовского и Б.Б. Телтаева для битума равен 0,35, что и принято в данной работе. При этом в ходе сравнения результатов экспериментов и расчетов установлено, что малые значения модуля упругости защитно-сцепляющего слоя (менее 20 МПа) приводят к существенному несоответствию напряженно-деформированного состояния одежды ездового полотна эмпирическим данным.

На основании этого установлено минимальное значение модуля упругости защитно-сцепляющего слоя, вводимое в расчет, равное 20 МПа.

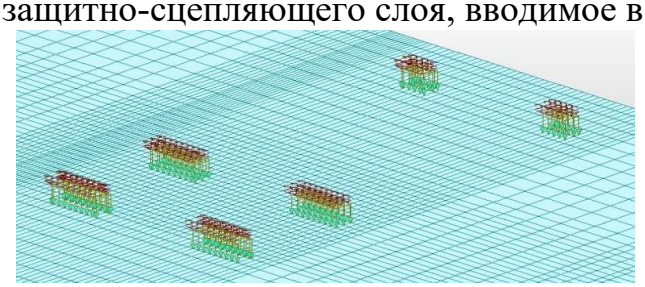

Рисунок 1 – Приложение нагрузки от транспортного средства

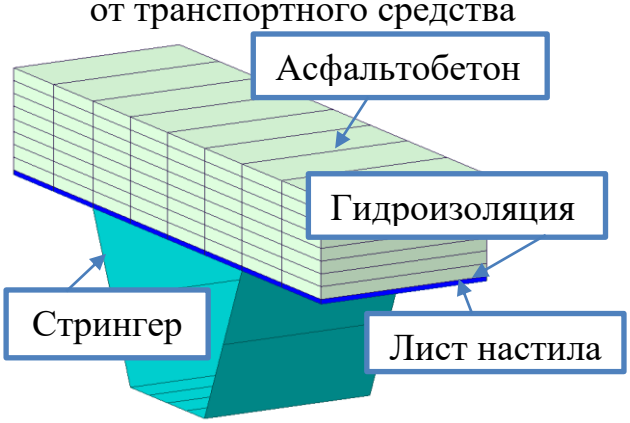

Рисунок 2 – Моделирование проезжей части (фрагмент)

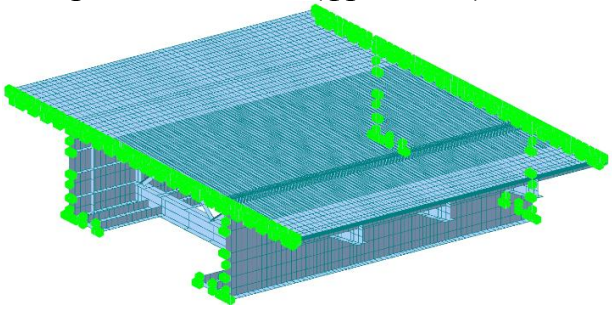

Рисунок 3 – Общий вид КЭ-модели

С целью определения способа приложения нагрузки от транспортных средств на асфальтобетонное покрытие рассмотрены и проанализированы отечественные и зарубежные нормативы и научные работы. По результатам этого предложено прикладывать нагрузку посредством отпечатков размерами 20х30 см для одиночного и 20х60 см для спаренного баллонов (рисунок 1).

Связь асфальтобетонного покрытия с несущими конструкциями проезжей части в наиболее распространенном случае осуществляется через защитно-сцепляющий слой из наплавляемой гидроизоляции. Предложено моделировать данный слой объемным конечным элементом с механическими характеристиками, соответствующими битуму (рисунок 2).

Для учета податливости основания, на которое уложена одежда ездового полотна, построена конечно-элементная модель, описывающая взаимодействие одежды ездового полотна с элементами пролетного строения и учитывающая факторы, отмеченные выше. Расчетная модель представляет собой блок или фрагмент блока пролетного строения с геометрическими характеристиками элементов, соответствующими фактическим (рисунок 3). Несущие металлоконструкции заданы пластинчатыми конечными элементами, одежда ездового полотна – объемными, а поперечные связи – стержневыми конечными элементами. Моделирование участка ПС, а не всей конструкции целиком связано с незначительностью влияния общей работы пролетного строения на возникновение рассматриваемых дефектов, так как причинами возникновения рассматриваемых трещин являются местные деформации ортотропной плиты. В качестве граничных условий наложен запрет на линейные и угловые перемещения всех узлов, по которым проведено отсечение рассматриваемого участка.

Определение напряженно-деформированного состояния одежды ездового полотна выполнялось с учетом следующих исходных предпосылок:

- расчеты выполнены в линейной постановке в упругой стадии работы;
- асфальтобетон представлен как изотропный материал;
- предполагается, что одежда ездового полотна имеет одинаковую температуру по всей высоте ввиду небольшой (6…12 см) общей толщины;
- анализировался только тот компонент тензора напряжений, который вносит наибольший вклад в возникновение того или иного дефекта: поперечные нормальные растягивающие напряжения, приводящие к появлению продольных трещин над стенками главных балок, или продольные нормальные растягивающие напряжения, вызывающие появление поперечных трещин над стенками поперечных балок;
- наличие абсолютно жесткой связи между всеми слоями покрытия и нижнего слоя с листом настила ортотропной плиты, задаваемого путем наличия общих узлов у смежных элементов.

Таким образом, по результатам исследований во второй главе диссертации уточнена математическая модель, описывающая взаимодействие одежды ездового полотна с несущими конструкциями пролетного строения, путем учета вязкоупругого характера деформирования содержащих органическое вяжущее материалов, и обоснованы расчетные предпосылки при определении напряженно-деформированного состояния одежды ездового полотна на мостах.

В третьей главе диссертации представлены результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния одежды ездового полотна под воздействием реально обращающихся транспортных средств. Основная цель проведения экспериментов – установление соответствия фактической работы конструкции принятым расчетным предпосылкам для подтверждения правильности теоретических положений, что позволит в дальнейшем применять их при разработке мер по совершенствованию конструкции проезжей части автодорожных мостов. Оценка соответствия расчетных моделей выполнена по величине конструктивного коэффициента К:

$$\mathrm{K} = \frac{S_e}{S_{cal}}, \qquad (5)$$

где S_e – измеренное значение параметра; S_{cal} – рассчитанное значение параметра.

В процессе экспериментов необходимо было обеспечить изменяемость величины подвижной нагрузки, длительности ее приложения, конструкции проезжей части, температуры асфальтобетона. Это было достигнуто путем проведения экспериментов на нескольких мостовых переходах, имеющих свои конструктивные особенности и в отличных друг от друга климатических условиях: эстакада по ул. Брянская в г. Красноярске (рисунок 4, а), мост через р. Тобол в Тюменской области (рисунок 4, б), мост через р. Преголя в Калининградской области (рисунок 4, в), мост через р. Кондома в Кемеровской области (рисунок 4, г).

Выполнение экспериментов на вводимых в эксплуатацию сооружениях со свежеуложенным покрытием проезжей части позволило избежать влияния

накопленных за срок эксплуатации микродефектов в асфальтобетоне на полученные результаты.

Все параметры, изменяемые в ходе проведения натурных экспериментов на рассматриваемых сооружениях, сведены в таблицу 1.

а) б)

в) г)

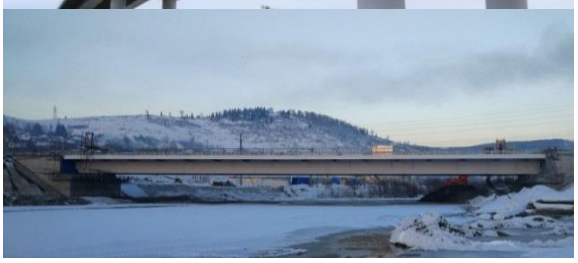

Рисунок 4 – Испытываемые сооружения: а – эстакада по ул. Брянская; б – мост через р. Тобол; в – мост через р. Преголя; г – мост через р. Кондома

Таблица 1 – Параметры, изменяемые в ходе проведения экспериментов

Параметр	Испытываемое сооружение			
	№ 1 (г. Красноярск)	№ 2 (р. Тобол)	№ 3 (р. Преголя)	№ 4 (р. Кондома)
Тип несущих конструкций ПЧ	Ж/б плита толщиной 240 мм	ОП с коробчатыми стрингерами	ОП с полосовыми стрингерами	ОП с коробчатыми стрингерами
Конструкция одежды ездового полотна	«Техноэластмост С» + плотный а/б типа Б марки I толщиной 110 мм	«Техноэластмост С» + плотный а/б типа Б марки I толщиной 60 мм + ЩМА-15 толщиной 50 мм	«Техноэластмост С» + литой а/б тип I толщиной 55 мм на разводном (№ 2) и 95 мм на стационарном (№ 3) ПС	«Мостопласт» + литой а/б тип I толщиной 105 мм
Температура покрытия, ^{0}С	-7	+15…+25	+3	-14
Подвижная нагрузка	Трехосный автосамосвал КамАЗ массой около 27 т	Трехосный автосамосвал *Volvo* массой около 38 т	Трехосный автосамосвал *Volvo* массой около 42,5 т	Трехосный автосамосвал *MAN* массой около 40 т
Варианты загружения сечений	Одно воздействие временной нагрузки длительностью 1,7 с	Двенадцать воздействий временной нагрузки длительностью 3,1…137,5 с	Шесть воздействий временной нагрузки длительностью 1,1…4,6 с	Три воздействия временной нагрузки длительностью 22…85,5 с

В поперечном направлении измерительное оборудование устанавливалось в местах возникновения наибольших поперечных растягивающих напряжений – над стенками главных балок и над стенкой коробчатого ребра жесткости. В ходе этого фиксировались деформации верхней фибры асфальтобетона в поперечном направлении. В продольном направлении измерительное оборудование

устанавливалось в различных местах по длине пролетных строений для оценки степени влияния общей работы пролетного строения на получаемые результаты.

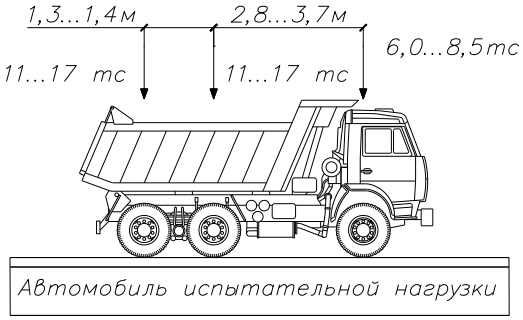

Рисунок 5 – Схема испытательной нагрузки

В качестве нагрузки использовались груженые трехосные самосвалы (рисунок 5). Процесс загружения представлял собой проезды автомобилей над сечениями с различными скоростями и остановки машин над сечениями длительностью до двух минут. Траектория проезда автосамосвалов была назначена, исходя из условия обеспечения максимально возможных деформаций в покрытии и одновременно обеспечения сохранности оборудования.

Измерение напряженно-деформированного состояния покрытия выполнено с использованием многофункционального комплекса «Тензор МС» (Свидетельство Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии об утверждении типа средств измерения RU.C.34.007.A № 32603/1, срок действия до 12 октября 2023 г.). Датчики устанавливались на специально подготовленные места, подготовка заключалась в зачистке покрытия и приклейке с помощью высокопрочного клея металлических марок (рисунок 6).

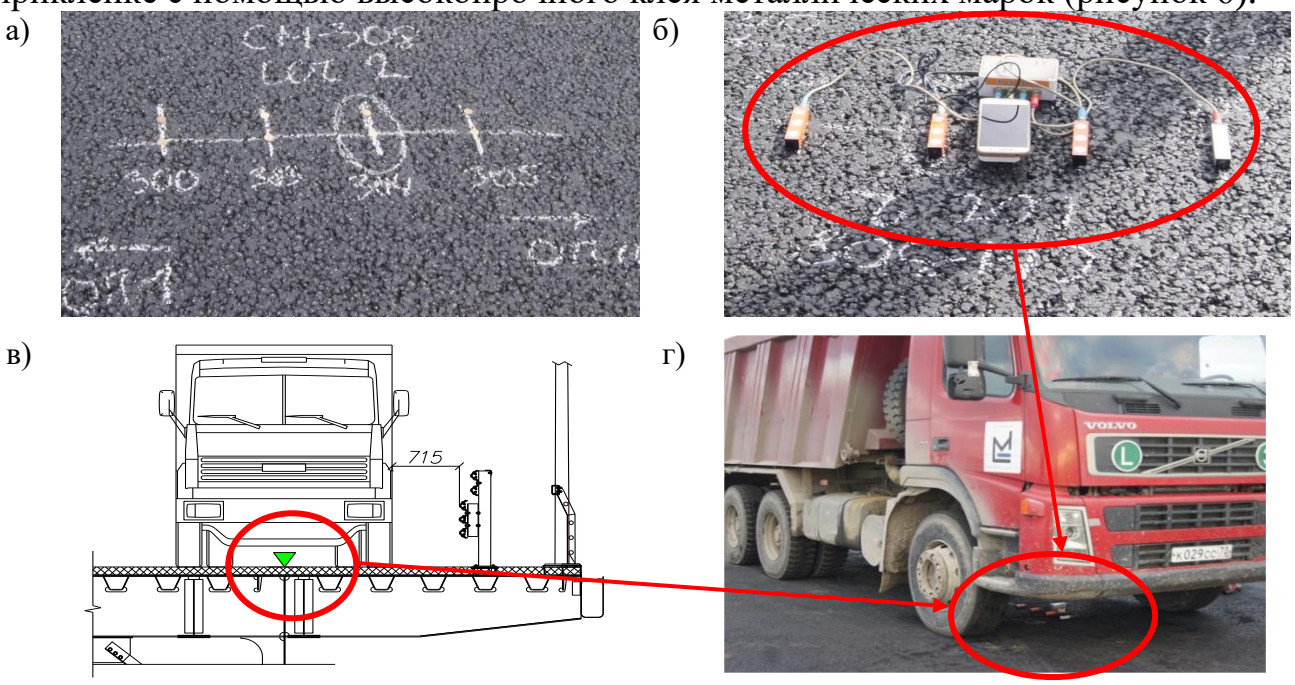

Рисунок 6 – Процесс подготовки и загружения контрольного сечения:
а – подготовленные под тензодатчики места; б – установленные в сечении тензодатчики; в – схема расположения оборудования и нагрузки; г – процесс загружения сечения

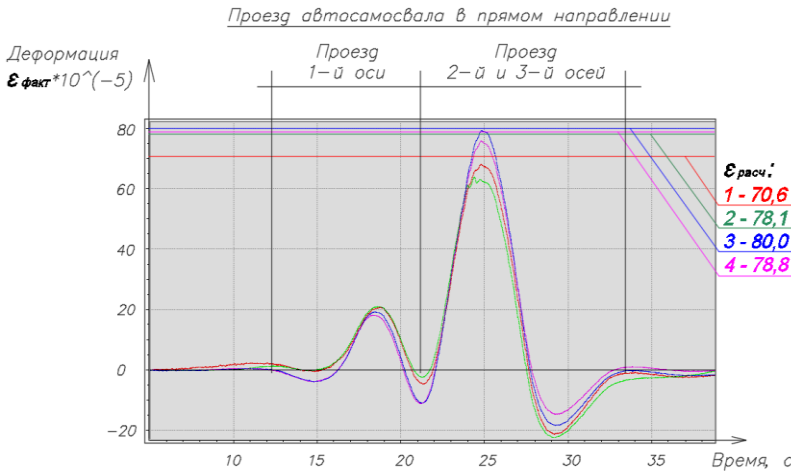

Рисунок 7 – Сравнение фактических и расчетных деформаций покрытия в сечении № 4 моста через р. Тобол

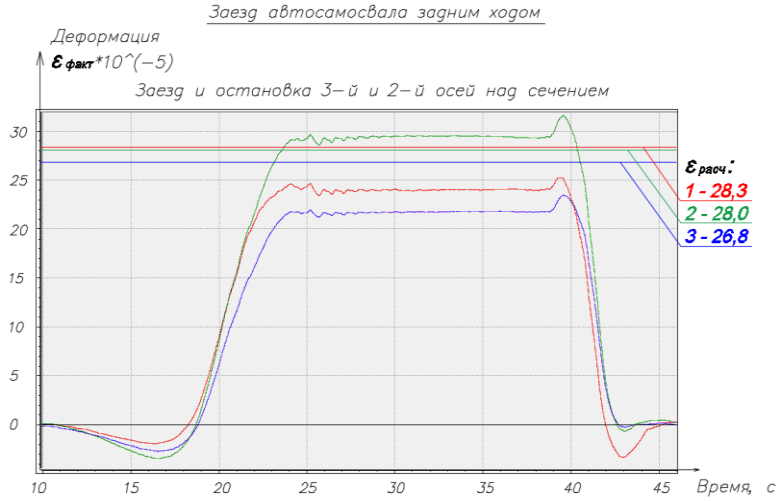

Рисунок 8 – Сравнение фактических и расчетных деформаций покрытия моста через р. Кондома

Результатами проведения экспериментов по определению напряженно-деформированного состояния одежды ездового полотна стали тензограммы деформаций верхней фибры покрытия в поперечном направлении под воздействием подвижной нагрузки. Примеры полученных графиков деформаций покрытия приведены на рисунках 7 и 8.

Полученные результаты позволяют оценить степень включения асфальтобетона в совместную работу с несущими конструкциями проезжей части моста – с этой целью в таблице 2 приведены значения конструктивных коэффициентов при учете и без учета в расчете жесткости одежды ездового полотна в ходе экспериментов по определению деформаций в покрытии моста через р.Кондома (см. рисунок 4, г).

Таблица 2 – Оценка степени включения асфальтобетона в совместную работу с ПС

№ датчика	**С учетом** включения в работу одежды ездового полотна			**Без учета** включения в работу одежды ездового полотна		
	Загружение 1			Загружение 1		
	$\varepsilon_ф \cdot 10^{-5}$	$\varepsilon_р \cdot 10^{-5}$	К	$\varepsilon_ф \cdot 10^{-5}$	$\varepsilon_р \cdot 10^{-5}$	К
1	24,0	28,3	0,848	28,1	73,2	0,383
2	29,5	28,0	1,05	31,3	72,1	0,434
3	21,8	26,8	0,813	23,1	68,6	0,334
Средний К	**0,903**			**0,383**		

Среднее значение конструктивных коэффициентов по результатам экспериментов составило: для покрытия эстакады по ул. Брянской 0,733…1,24; для покрытия моста через р. Тобол 0,744…0,985; для покрытия моста через

р. Кондома 0,897…1,0; для покрытия моста через р. Преголя 0,243…0,290 (ПС 2) и 0,539…0,609 (ПС 3). Получение диапазонов конструктивных коэффициентов, а не привычных всем одиночных значений связано с тем, что согласно принятой расчетной модели модуль упругости асфальтобетона зависит от целого ряда параметров, которые согласно действующим ГОСТам могут варьироваться в установленных пределах. Поэтому в качестве ожидаемых вычислены минимально и максимально возможные значения деформаций материала, с которыми затем произведено сравнение фактических данных.

В ходе экспериментов минимальные значения средних конструктивных коэффициентов по сечениям ни в одном случае не превысили единицы, следовательно, расчетная модель работает «в запас». Обобщенная величина конструктивного коэффициента по всем экспериментам (за исключением покрытия на пролетном строении № 2 моста через р. Преголя) равна **0,844**, что можно назвать удовлетворительным.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов установлена достаточная сходимость ожидаемых данных с фактическими. Разработана новая экспериментальная методика определения напряженно-деформированного состояния асфальтобетонного покрытия на мостах, позволившая выявить качественные и количественные закономерности распределения напряжений в асфальтобетонном покрытии от воздействия временной нагрузки в зависимости от конструкции мостового полотна. Усовершенствованная математическая модель для определения напряженно-деформированного состояния асфальтобетонного покрытия на мостах может быть использована в дальнейшем при расчетах одежды ездового полотна и разработке мер по повышению долговечности асфальтобетона по критерию усталостного разрушения при его работе на искусственных сооружениях.

В четвертой главе диссертации приведены положения разработанного автором алгоритма для расчета долговечности по критерию усталостного разрушения покрытия под воздействием эксплуатационной нагрузки с учетом зависимости показателей деформативности материала от температуры и длительности воздействия нагрузки, а также неравномерности накопления дефектов в течение года, который представлен на рисунке 9 в виде блок-схемы.

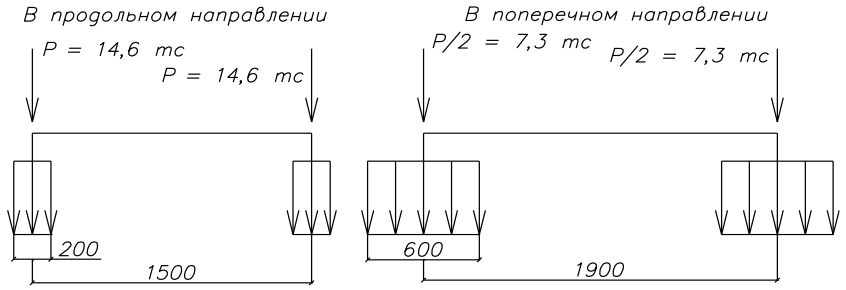

Рисунок 10 – Схема предложенной расчетной нагрузки

Схема предложенной расчетной нагрузки приведена на рисунке 10. Расчет одежды ездового полотна предложено производить на осевую нагрузку нормативной величиной 11,5 тс/ось, как при проектировании нежесткой дорожной одежды на земляном полотне. При этом остальные параметры тележки расчетного транспортного средства следует

принимать как для нагрузки АК при расчете мостов. Переход от нормативной величины к расчетной осуществляется введением коэффициента надежности $\gamma_f = 1$. Учет динамического воздействия транспортного средства на конструкцию обеспечен применением динамического коэффициента $(1+\mu) = 1{,}27$.

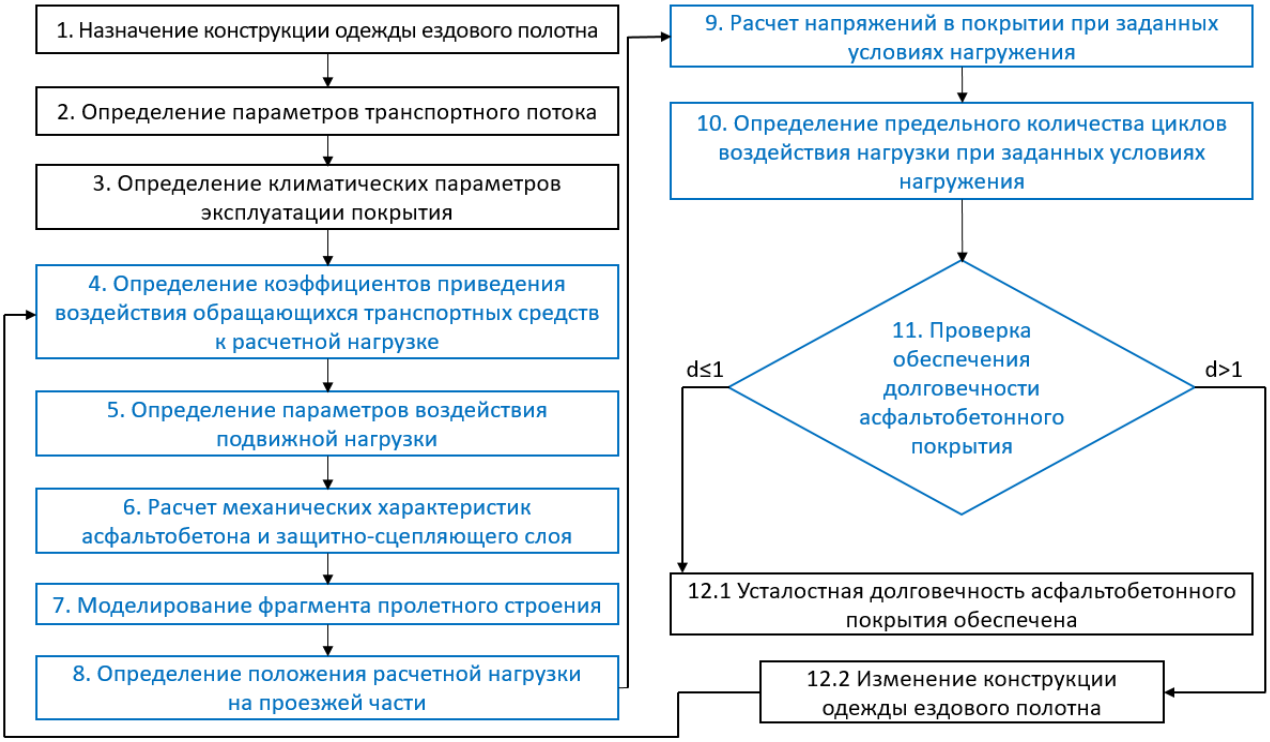

Рисунок 9 – Разработанный алгоритм расчета долговечности по критерию усталостного разрушения асфальтобетонного покрытия на ортотропной плите

Примечание. Цветом выделены позиции, включающие предложенные автором уточнения.

Транспортный поток состоит из автомобилей, отличающихся друг от друга по массе, размерам и компоновке осей и, соответственно, вносящих различный вклад в накопление повреждений в асфальтобетоне. Приведение степени воздействия различных автомобилей к степени воздействия расчетного транспортного средства предложено производить по формуле:

$$К_i = \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_р}\right)^{1/m}, \qquad (6)$$

где σ_i – напряжения в покрытии при воздействии i-го автомобиля; $\sigma_р$ – напряжения в покрытии при воздействии расчетной нагрузки; m – коэффициент усталости или тангенс угла наклона к оси абсцисс графика зависимости количества циклов приложения нагрузки от возникающих в материале напряжений, построенного в двойных логарифмических координатах.

Для определения наиболее невыгодного расположения транспортного средства на проезжей части предложено использовать аппарат поверхностей влияния (рисунок 11). При анализе формы поверхности влияния и загружении ее транспортным средством следует учитывать, что положение нагрузки должно вызывать существенные (но необязательно максимальные) напряжения в сечении и одновременно обеспечивать возможно большее число проездов по

данной полосе наката (как правило, полоса наката располагается в пределах полосы движения).

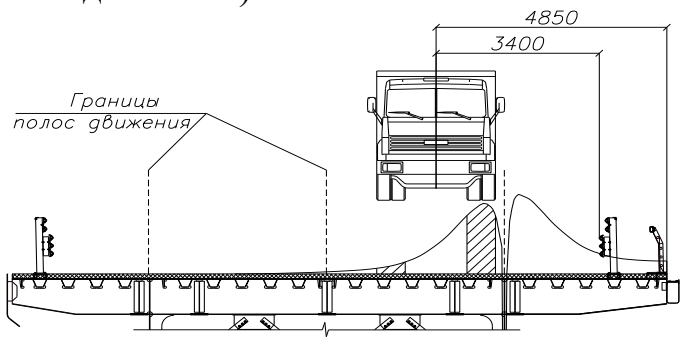

Рисунок 11 - Загружение поверхности влияния поперечных напряжений в верхней фибре асфальтобетона

Помимо этого, даны рекомендации по определению суммарного количества циклов воздействия расчетного транспортного средства на одежду ездового полотна за весь срок службы покрытия, а также по вычислению расчетной длительности приложения нагрузки от автомобиля для использования в формуле (2).

При оценке долговечности по критерию усталостного разрушения асфальтобетона необходимо учитывать, что накопление усталостных повреждений в нем при воздействии одной и той же нагрузки протекает неравномерно вследствие переменчивости климатических условий. Наиболее просто долговечность материала по критерию усталостного разрушения при возникновении в нем повторяющихся напряжений различной величины может быть оценена на основе правила Пальмгрена-Майнера о линейном суммировании повреждений. Если количество приложенных к материалу циклов нагрузки меньше, чем предельное, то произойдет частичное повреждение образца. Повреждения при циклах воздействия с разными уровнями напряженного состояния суммируются. Считается, что разрушение произойдет, когда накопленное от действия напряжений с разными амплитудами повреждение достигнет единицы.

Поскольку для асфальтобетона соотношение между деформациями и возникающими при этом напряжениями, а также долговечность по критерию усталостного разрушения зависят от климатических условий, календарный год необходимо разделить на периоды, в каждый из которых климатические условия можно считать условно неизменяемыми. С учетом этого предложено условие обеспечения долговечности по критерию усталостного разрушения асфальтобетона на мосту за весь срок эксплуатации:

$$d = \sum_{i=1}^{j} \frac{n_i}{N_i} \leq 1. \qquad (7)$$

где d – накопленное повреждение материала после требуемого количества циклов приложения нагрузки; j – количество временных периодов, в каждый из которых климатические условия можно считать условно неизменяемыми; i – порядковый номер этого периода; n_i – количество циклов загружения покрытия в i-й период; N_i – предельное количество циклов до разрушения для условий i-го периода.

Максимальная температура для проведения расчетов ограничена величиной +20 ^{0}С по аналогии с ПНСТ 135-2016, т.к. при дальнейшем возрастании

температуры определяющими будут пластические деформации асфальтобетона. На основании полученных экспериментальных результатов применение разработанного алгоритма ограничено покрытиями общей толщиной шесть и более сантиметров.

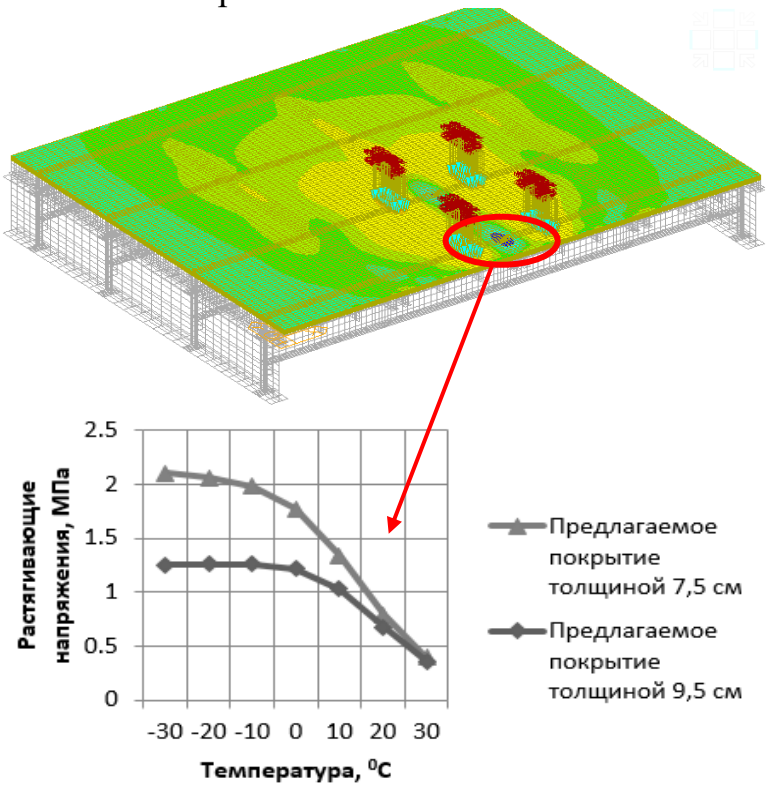

Рисунок 12 – Результаты расчета напряжений в покрытии Байдаевского моста в Кемеровской области

С учетом полученных в ходе исследования результатов в рамках разработки рекомендаций по устройству конструкции одежды ездового полотна на Байдаевском мосту (Кемеровская область) вычислены растягивающие напряжения в верхней фибре асфальтобетонного покрытия различной толщины:

-вариант № 1 – предлагаемая система покрытия общей толщиной 7,5 см;

-вариант № 2 – предлагаемая система покрытия общей толщиной 9,5 см.

Результаты расчетов приведены на рисунке 12. По результатам вычислений с учетом опыта эксплуатации аналогичных конструкций рекомендовано устройство одежды ездового полотна в соответствии с вариантом № 2.

Результаты проведенных соискателем исследований нашли отражение при проектировании конструкции одежды ездового полотна на Краснофлотском мосту через р. Северная Двина. Подъемная система разводного пролетного строения рассчитана на нагрузку от веса одежды ездового полотна толщиной не более 70 мм, устроенной в соответствии с устаревшими нормами. Современные требования устанавливают минимальную толщину покрытия от 80 до 110 мм. Выполненные проектной организацией расчеты показали, что соблюдение данного требования приведет к удорожанию и увеличению сроков выполнения работ, а также к длительному закрытию судоходства. Проведение вычислений в соответствии с разработанным алгоритмом (см. рисунок 9), а также использование инновационных дорожно-строительных материалов (литой асфальтобетон на композиционном резино-полимербитумном вяжущем КРПБВ-60 с модификатором ПОЛИЭПОР-РП) позволили обосновать возможность устройства одежды ездового полотна меньшей толщины.

Рисунок 13 – Дефекты покрытия ПЧ Краснофлотского моста

С целью выявления причин уже имеющихся дефектов в покрытии Краснофлотского моста выполнены соответствующие расчеты напряженно-деформированного состояния существующей одежды ездового полотна. Согласно предоставленным материалам, продольные трещины в асфальтобетоне локализовались не над стенками главных балок, где их образование происходит наиболее часто, а между ними по полосам наката (рисунок 13). Основная их часть расположена по крайним полосам, где движутся тяжелые транспортные средства. Фотографии свидетельствуют, что трещины прерываются по длине, причем эти прерывания регулярны и расположены над поперечными балками, т.е. в местах большей жесткости ОП.

Ортотропная плита Краснофлотского моста запроектирована в конце 1970-х годов и потому является более гибкой конструкцией по сравнению с возводимыми в настоящее время. На основании этого выдвинуто предположение о появлении рассматриваемых дефектов вследствие неспособности асфальтобетона воспринимать возникающие в нем растягивающие напряжения.

Расчеты напряженно-деформированного состояния покрытия показали, что по нижней фибре асфальтобетона в месте контакта с гидроизолирующим слоем имеются области поперечных растягивающих напряжений, и расположены они как раз по полосам наката (рисунок 14). Причина их возникновения – существенно бóльшая податливость защитно-сцепляющего слоя в сравнении с асфальтобетоном, в результате чего при деформировании покрытие «проскальзывает» по гидроизоляции относительно листа настила.

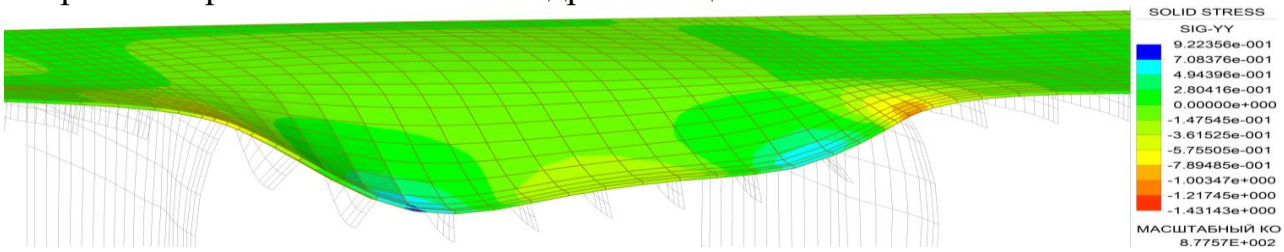

Рисунок 14 – Поперечные напряжения по нижней фибре асфальтобетона

Сопоставление полученных в ходе расчета данных с результатами экспериментов О.В. Дровалевой по определению выносливости асфальтобетона свидетельствовало, что величина напряжений достаточна для проявления усталостных дефектов в течение нескольких лет. Соответственно, наиболее вероятный характер развития имеющихся трещин – их возникновение в нижней фибре покрытия между продольными ребрами ортотропной плиты и дальнейшее «прорастание» снизу вверх.

Полученные в ходе предварительных вычислений результаты позволили перейти к расчетам конструкции одежды ездового полотна на разводном пролетном строении Краснофлотского моста. Контролируемые сечения

назначены в соответствии с опытом эксплуатации подобных сооружений и показаны на рисунке 15.

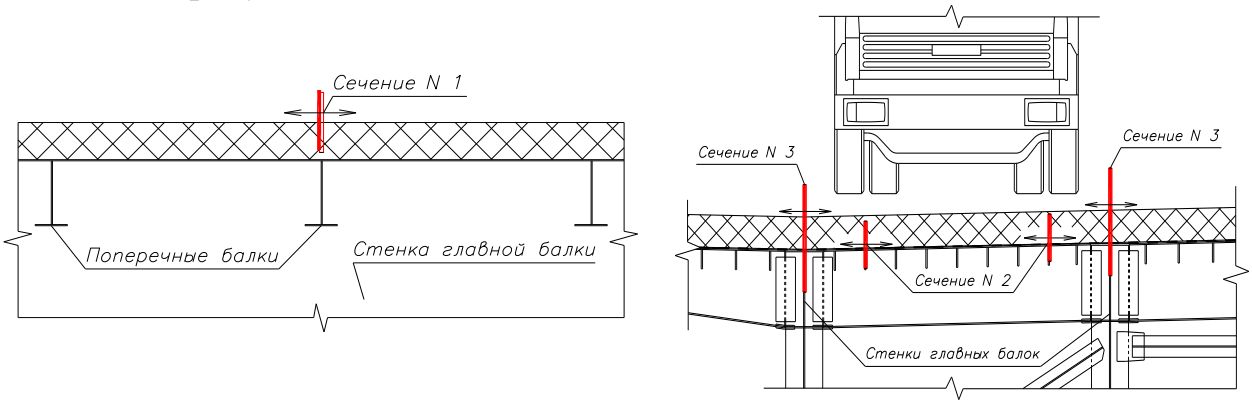

Рисунок 15 – Расположение расчетных сечений

Календарный год условно разделен на четыре температурно-временных периода (зимний с температурой -10 ^{0}С, летний с температурой +20 ^{0}С и два переходных с температурой 0 ^{0}С). Рассчитанные по формулам (1) и (4) показатели деформативности асфальтобетона даны в таблице 3.

Таблица 3 – Рассчитанные показатели деформативности асфальтобетона

Температура, ^{0}С	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона
-10	10090	0,21
0	6950	0,233
+20	133	0,475

Полученные по результатам расчетов напряжения в асфальтобетонном покрытии при различных температурах от воздействия расчетной нагрузки приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Напряжения в расчетных сечениях асфальтобетонного покрытия, МПа

	Сечение № 1	Сечение № 2	Сечение № 3
При -10 ^{0}С	0,60	0,80	1,43
При 0 ^{0}С	0,47	0,63	1,27
При +20 ^{0}С	0,12	0,08	0,22

Суммарное количество циклов воздействия расчетной нагрузки за весь срок службы, принятый равным 12 годам, составляет $N = 267000$ загружений. Ввиду отсутствия достоверных данных принято, что интенсивность движения транспортных средств по сооружению неизменна в течение года. Тогда число приложений расчетной нагрузки для каждого температурно-временного периода неизменно и составляет 267000/4 = 66750 циклов загружения.

Определение предельного количества циклов загружения асфальтобетона для сечения № 1 при заданном уровне напряжений показано на рисунке 16. Согласно рисунку 16, предельное число циклов воздействия нагрузки при заданном уровне нагружения $N_1 = 10^7$, $N_2 = 10^7$, $N_3 = 10^7$. С учетом полученных результатов условие обеспечения долговечности по критерию усталостного разрушения (7) примет вид:

$d = \frac{66750}{10^7} + \frac{66750}{10^7} + 2\frac{66750}{10^7} = 0{,}0267 < 1$. Условие обеспечения долговечности по критерию усталостного разрушения асфальтобетонного покрытия в сечении № 1 выполнено.

Аналогичным образом выполнена проверка обеспечения долговечности по критерию усталостного разрушения для сечений № 2 и № 3.

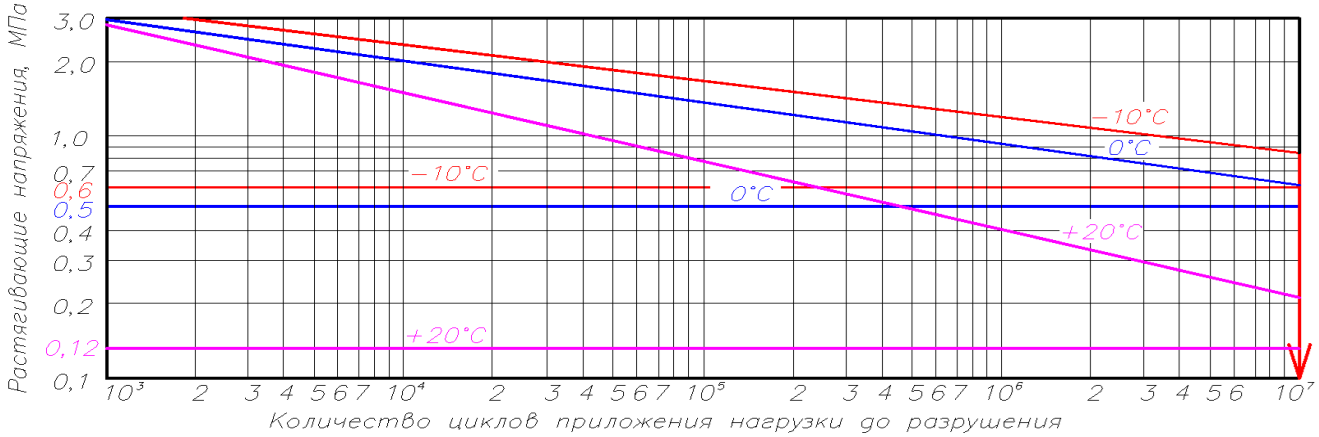

Рисунок 16 – Определение предельного количества циклов воздействия подвижной нагрузки для сечения № 1

По результатам проведенных исследований установлено, что:

- прогнозируемый срок эксплуатации одежды ездового полотна в сечении № 3, когда вероятность появления трещины становится значительной, составляет 7,2 года;

- долговечность по критерию усталостного разрушения асфальтобетонного покрытия в сечениях № 1 и № 2 обеспечена в течение всего межремонтного срока, равного 12 годам.

Несмотря на то, что для сечения над стенкой главной балки получен меньший срок службы, чем требуемый 12-летний межремонтный срок, сделан вывод, что в целом долговечность по критерию усталостного разрушения проектируемой одежды ездового полотна разводного пролетного строения обеспечена. Во-первых, за счет хорошего состояния покрытия после ремонта динамический коэффициент к подвижной нагрузке будет меньшим, чем заложен в расчетах, соответственно, снизится и величина напряжений в покрытии, а допустимое количество циклов нагружения возрастет. Во-вторых, экспериментальные данные, используемые в данной работе, занижают фактическую выносливость асфальтобетона на пролетном строении вследствие особенностей характера деформирования при лабораторных испытаниях. В-третьих, данные получены для асфальтобетона на обычном битуме, а в данном случае планируется применение композиционного резино-полимербитумного вяжущего КРПБВ-60, имеющего лучшие в сравнении с обычным вяжущим свойства, что подтверждено результатами экспериментов. В-четвертых, долговечность по критерию усталостного разрушения покрытия в других сечениях по результатам расчетов обеспечена. При этом вследствие особенностей конструкции рекомендовано установить наблюдение за

состоянием покрытия над стенками главных балок раз в сезон для обеспечения своевременной заделки трещин в случае их возможного появления.

В качестве примера совершенствования конструкции проезжей части на основе разработанных автором рекомендаций рассмотрено пролетное строение моста через р. Тобол, уже упомянутого выше (см. рисунок 4, б). Устроенная на нем конструкция одежды ездового полотна дает основание предполагать скорое возникновение рассматриваемых в данной работе дефектов. Для подтверждения в соответствии с разработанным алгоритмом расчета (см. рисунок 9) проведена оценка долговечности по критерию усталостного разрушения, показавшая, что долговечность по критерию усталостного разрушения материала не обеспечена.

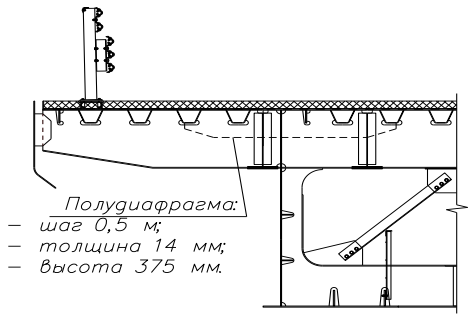

Рисунок 17 - Схема местного усиления ортотропной плиты полудиафрагмами

Далее при помощи экспериментальных данных по выносливости асфальтобетона, полученных О.В. Дровалевой, разработано три способа снижения напряжений в асфальтобетоне до приемлемого уровня – увеличение толщины одежды ездового полотна, изменение конструкции несущих элементов проезжей части и постановка дополнительных полудиафрагм, показанная на рисунке 17 (патент № 173855).

Эффективность каждого из рассмотренных способов оценивалась по требуемым затратам на погонный метр пролетного строения. Наиболее эффективным оказался вариант с постановкой дополнительных полудиафрагм. Кроме того, в этом случае минимально и увеличение постоянной нагрузки на главные несущие элементы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований была достигнута цель и получены следующие основные научные выводы.

1. Построена математическая модель для определения напряжений в асфальтобетонном покрытии одежды ездового полотна при воздействии подвижной нагрузки, учитывающая:

а) вязкоупругий характер деформирования материалов, содержащих органическое вяжущее;

б) характер приложения нагрузки от транспортных средств;

в) характер связи асфальтобетонного покрытия с несущими конструкциями проезжей части моста;

г) податливость основания, на которое уложена одежда ездового полотна.

2. Разработана новая экспериментальная методика определения напряженно-деформированного состояния асфальтобетонного покрытия на мостах, позволившая выявить качественные и количественные закономерности распределения напряжений в асфальтобетонном покрытии от воздействия временной нагрузки при различных конструкциях мостового полотна и условиях загружения. Впервые

получены экспериментальные данные о напряженно-деформированном состоянии асфальтобетонного покрытия на ортотропных плитах с полосовыми и коробчатыми продольными ребрами при различных величине и длительности однократного воздействия подвижной нагрузки и температуре материала. Соответствие принятых расчетных предпосылок фактической работе конструкции подтверждено средним значением конструктивного коэффициента по всем испытаниям **К.к. = 0,844**.

3. Усовершенствован метод расчета долговечности асфальтобетонного покрытия на ортотропной плите по критерию усталостного разрушения путем учета податливости основания, вязкоупругого характера деформирования материалов одежды ездового полотна и неравномерности накопления дефектов в течение года. По результатам этого разработан алгоритм, позволяющий проектировать конструкцию одежды ездового полотна требуемой долговечности по критерию усталостного разрушения.

В качестве примера применения разработанного алгоритма оценена возможность снижения толщины асфальтобетонного покрытия на разводном пролетном строении действующего моста с 80 до 70 мм по условию обеспечения долговечности по критерию усталостного разрушения.

Перспективой дальнейших исследований является разработка инженерных рекомендаций по проектированию конструкции одежды ездового полотна на мостах, учет при расчетах температурных напряжений в покрытии, а также экспериментальное исследование долговечности асфальтобетона по критерию усталостного разрушения в различных внешних условиях.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Материалы настоящего диссертационного исследования опубликованы:

- ***в изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России***:

1. Яшнов, А.Н. Об одном способе назначения конструкции одежды ездового полотна на ортотропной плите металлических мостов / А.Н. Яшнов, С.Ю. Поляков // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. - 2018. - № 4 (47). - С.58-65.

2. Поляков, С.Ю. Проверка выносливости асфальтобетонного покрытия на ортотропной плите с учетом температурного фактора [Электронный ресурс] / С.Ю. Поляков // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». – 2019. - № 3. DOI: 10.15862/09SATS319

3. Поляков, С.Ю. Совершенствование конструкции проезжей части металлических мостов с учетом особенностей характера работы одежды ездового полотна / С. Ю. Поляков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. - 2020. – Т. 22. - № 2. - С.174-184.

- ***в изданиях, входящих в международную базу данных Web of Sciense***:

4. Yashnov, A.N. Experimental determination of stress-strain state of asphalt pavement on metal bridges / A.N. Yashnov, S.Yu. Polyakov // Russian Journal of Building Construction and Architecture. - 2018. - № 3 (39). - С.93-106.

- ***в других изданиях***:

5. Яшнов, А.Н. Особенности расчета нежесткой дорожной одежды применительно к условиям эксплуатации покрытия на ортотропной плите / А.Н. Яшнов, С.Ю. Поляков // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2016. - №1. – С.142-157.

6. Яшнов, А.Н. Проблемы назначения и эксплуатации покрытий на ортотропной плите пролетных строений металлических мостов / А.Н. Яшнов, С.Ю. Поляков // М-лы XLI Межд. науч.-практ. конф. – Алматы: КазАТК им. М.Тынышпаева, 2017. – С.354-358.

7. Яшнов, А.Н. Влияние температуры на напряженно-деформированное состояние асфальтобетона на ортотропной плите / А.Н. Яшнов, С.Ю. Поляков // Инновационный транспорт – 2016: специализация железных дорог: м-лы Международ. науч.-практ. конф. – Екатеринбург: УрГУПС, 2017. – Вып. 8 (227). – С.387-399.

8. Яшнов, А.Н. К вопросу о нормировании свойств асфальтобетонного покрытия на ортотропной плите металлических мостов / А.Н. Яшнов, С.Ю. Поляков // Сборник статей и докладов ежегодной научной сессии Ассоциации исследователей асфальтобетона. - М.: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2016. – С.40-49.

9. Яшнов, А.Н. Анализ расчетных моделей для определения модуля упругости асфальтобетона / А.Н. Яшнов, С.Ю. Поляков // Политранспортные системы: м-лы IX Межд. науч.-техн. конф. по напр. «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке». – Новосибирск: Изд-во СГУПСа, 2017. – С.73-79.

10. Поляков, С.Ю. Экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния асфальтобетона на металлическом мосту / С.Ю. Поляков // Инновационные факторы развития транспорта. Теория и практика: междунар. науч.-практ. конф. (Новосибирск, 19-20 октября 2017 г.). – Новосибирск: изд-во СГУПСа, 2017. – С.164-172.

Поляков Сергей Юрьевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ДОЛГОВЕЧНОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ НА ОРТОТРОПНОЙ ПЛИТЕ МОСТОВ ПО КРИТЕРИЮ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ

Специальность 05.23.11 – «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать «20» апреля 2021 г.
Печ. л. 1,0. Тираж 120 экз. Заказ № 3630
Издательство ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»
630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191. Тел. (383) 328-03-81. e-mail: bvu@mail.ru