

На правах рукописи



Кадыров Георгий Фаррухович

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ
АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СЛОЕВ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД
НА ОСНОВЕ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донской государственный технический университет».

Научный руководитель: **Тиратурян Артем Николаевич**,
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», кафедра «Автомобильные дороги», профессор

Официальные оппоненты: **Бондарев Борис Александрович**,
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет», кафедра «Строительное материаловедение и дорожные технологии», профессор.

Мирончук Сергей Александрович,
кандидат технических наук, федеральное автономное учреждение «Российский дорожный научно-исследовательский институт», управление перспективных методов исследований и испытаний, начальник управления.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород

Защита состоится «28» января 2026 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.02, созданного на базе Воронежского государственного технического университета, по адресу: 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84, корпус 2, ауд. 2228.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного технического университета и на сайте <http://cchgeu.ru>.

Автореферат разослан «27» ноября 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



С. В. Чуйкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Эффективная реализация целей и задач, обозначенных в национальном проекте «Инфраструктура для жизни», невозможна без перехода на современные методы проектирования, строительства и мониторинга состояния автомобильных дорог, а в частности, их главного элемента, определяющего надежность и долговечность в течение всего срока эксплуатации - дорожной одежды. Дорожная одежда представляет собой слоистую среду, которая воспринимает нагрузки от транспортного потока и воздействие природно-климатических факторов. В современных проектах стоимость возведения конструкции дорожной одежды может достигать 70 % от стоимости всех капитальных затрат, что подчеркивает ее важность и значимость в экономическом плане.

Наиболее дорогостоящим элементом дорожных одежд являются асфальтобетонные слои, подверженные в процессе эксплуатации циклическому воздействию транспортных средств, приводящему к появлению такого дефекта, как усталостные трещины. Показатель, характеризующий сопротивляемость асфальтобетонных слоев усталостному разрушению, называют усталостной долговечностью (если он выражается в годах), либо усталостной выносливостью (если речь идет о количестве циклов приложения транспортных нагрузок).

В рамках действующих на текущий момент подходов к оценке усталостной выносливости асфальтобетонов используют преимущественно лабораторные испытания, проводимые на образцах-балочках или образцах цилиндрах. Вместе с тем очевидно, что картина напряженно-деформированного состояния (далее - НДС) асфальтобетонных слоев, работающих под расчетными нагрузками в конструкции дорожной одежды, может значительно отличаться от лабораторного режима испытаний. Изучение НДС асфальтобетонных слоев дорожной одежды требует либо проведения чрезвычайно дорогостоящих работ на реальных объектах, либо создания методологии физического моделирования дорожной одежды, обеспечивающей возможность применения статических и динамических нагрузок близких к расчетным. Также на подобных моделях может быть решена и такая важная задача, как оценка соотношения между модулями упругости асфальтобетонных слоев, полученными на основе натурных испытаний и в лабораторных условиях, что может послужить хорошей основой для перехода на новые механико-эмпирические методы проектирования дорожных одежд, отличающиеся от существующих подходов учетом структурных свойств материалов. Реализация данной задачи позволит повысить точность прогнозирования сроков службы дорожных одежд и обеспечить их соответствие требуемым значениям.

Исследования выполнены в рамках научно-исследовательских работ по заданию Федерального дорожного агентства Министерства транспорта Российской Федерации в период 2019 – 2024 гг.

Степень разработанности темы. Вопросы прогнозирования усталостной долговечности рассматривались в работах как отечественных, так и зарубежных

ученых: Н.Н. Иванова, А.М. Кривисского, М.Б. Корсунского, В.Д. Казарновского, Б.С. Радовского, П.И. Теляева, Е.В. Угловой и др. Hildebrand G., Dawson A.R. Harvey J.T., Sadzik E., Coetzee N.F., Mahoney J.P. Особый акцент в работах отечественных ученых был сделан на развитие традиционного для Советской и Российской школы критерия расчета асфальтобетонных слоев на усталостное разрушение на основе растягивающих напряжений, прочно вошедший в нормативную базу.

В настоящей работе предложена методика для прогнозирования предельного числа приложений расчетных нагрузок в зависимости от величины растягивающих деформаций, изученных как в лабораторных условиях, так и в условиях физической модели дорожной одежды, что способствует развитию методов прогнозирования усталостных повреждений на основе линейных и нелинейных гипотез суммирования повреждений.

Объект исследования Нежесткие дорожные одежды.

Предмет исследования – Усталостная выносливость асфальтобетонных слоев.

Целью диссертационной работы является разработка теоретико-экспериментального подхода к прогнозированию усталостной выносливости асфальтобетонных слоев на основе физического моделирования НДС дорожной одежды.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ теоретических методов расчета и конструирования дорожных одежд в России и за рубежом, и проанализировать существующие подходы к прогнозированию усталостных разрушений в слоях асфальтобетона;

- обосновать преимущества физического моделирования и выполнить научное обоснование конструкции физической модели и ее планировочных решений, позволяющих осуществлять весь спектр необходимых измерений для определения механических параметров модели в целом и отдельных ее слоев.

- определить в ходе испытаний на физической модели дорожной одежды основные механические параметры ее конструктивных слоев и осуществить измерение растягивающих деформаций на нижней границе пакета асфальтобетонных слоев при различных условиях нагружения;

- исследовать механические параметры асфальтобетонов, а также определить параметры их сопротивляемости усталостным разрушениям в лабораторных условиях с применением как традиционного, так и современного лабораторного оборудования;

- осуществить комплексный теоретико-экспериментальный анализ соответствия механических параметров асфальтобетонов, установленных в ходе испытаний на физической модели и в лабораторных условиях;

- разработать расчетную модель для совершенствования метода прогнозирования усталостной выносливости асфальтобетона для конструкций нежестких дорожных одежд.

Научная новизна работы включает в себя:

- разработку и научное обоснование основных планировочных решений физической модели нежесткой дорожной одежды, обеспечивающие возможность осуществления мониторинга НДС различных конструкций дорожных одежд как при статическом, так и при динамическом нагружении;
- комплекс эмпирических моделей для прогнозирования суммарного числа циклов приложений расчетной нагрузки для заданной величины относительной растягивающей деформации, позволяющий осуществлять как сравнительный анализ асфальтобетонов в лабораторных условиях, так и слоев асфальтобетона в составе дорожной одежды;
- полученные качественные и количественные зависимости между лабораторными значениями модулей упругости асфальтобетонов и модулями упругости асфальтобетонных слоев, зарегистрированными в ходе проведения измерений на физической модели, что позволило установить коэффициенты приведения от лабораторных значений к натурным.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты комплексных испытаний асфальтобетонных слоев оборудованием для натурных исследований в условиях физической модели нежесткой дорожной одежды, а также результаты лабораторных испытаний асфальтобетонов по определению их динамического модуля упругости и усталостной выносимости;
2. Экспериментально-теоретический подход к прогнозированию количества циклов приложений нагрузки до момента усталостного разрушения, реализуемый как для образцов асфальтобетона, так и слоев асфальтобетона, функционирующих в составе дорожной одежды;
3. Рекомендации по совершенствованию метода прогнозирования усталостной выносимости нежестких дорожных одежд на основе относительных растягивающих деформаций.

Основные результаты, достигнутые в диссертационном исследовании, соответствуют паспорту научной специальности **2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей, по направлениям п. 6. Совершенствование методов расчета конструкций, сооружений и их элементов: земляного полотна, пути, оснований, опор, дорожного и аэродромного покрытий, пролетных строений, защитных покрытий, тоннельной обделки, несущих, подпорных и ограждающих конструкций, средств организации движения, водопропускных труб, галерей и т.п., на статические и динамические воздействия природного и техногенного происхождения, включая расчеты напряженно-деформированного состояния и водно-теплового режима, грунтовых массивов, металлических, бетонных и железобетонных конструкций, гидравлического и ледового режимов акваторий мостовых переходов и п. 14. Разработка новых и совершенствование существующих методов и средств математического и физического моделирования работы конструкций, технологических процессов, организации и оперативного управления строительным производством, режимов эксплуатации и оценки технических и экологических рисков при**

строительстве, эксплуатации и реконструкции транспортных сооружений, их элементов, объектов и производств.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в усовершенствовании методологии проектирования нежестких дорожных одежд путем определения параметров НДС дорожной одежды на основе физического моделирования и комплекса эмпирических моделей для прогнозирования суммарного числа циклов приложений расчетной нагрузки.

Практическая значимость работы заключается в создании испытательного стенда для физического моделирования нежестких дорожных одежд позволяющий проводить исследования НДС дорожных одежд с применением различных видов материалов и различных типов нагружения.

Достоверность представленных в исследовании положений и выводов подтверждается методологической базой исследований, основанной на фундаментальных теоретических положениях отечественной и зарубежной науки. Это также подкрепляется соблюдением основных принципов физического и математического моделирования, наличием достаточного объема экспериментальных данных, полученных с использованием аттестованного оборудования и поверенных (калиброванных) средств измерения. Совпадение результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также успешные результаты их опытно-производственной проверки подчеркивают надежность полученных выводов.

Внедрение результатов. Результаты исследований использовались при составлении научно-технических отчетов по темам НИОКР Росавтодора 2019-2024 годы, в рамках которых были разработаны:

- национальные стандарты РФ: ГОСТ Р 58401.11-2019, ГОСТ Р 59280-2020;
- предложения по методике учета реальных параметров НДС, возникающих в дорожной одежде;
- предложения по методике прогнозирования накопления усталостных повреждений.

Также результаты исследования применялись при проектировании конструкций на объектах ГК Автодор, в исследованиях по эффективности проектных решений в ООО «ИТЦ», в учебном процессе Академии дорожного хозяйства РУТ (МИИТ) и применялись при разработке ГОСТ Р 71404-2024.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы представлялись и обсуждались на Всероссийских (национальных) научно-практических конференциях «Актуальные проблемы науки и техники» (г. Ростов-на-Дону 2023, 2024), 81-й международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ (2022), Научно-технических советах Федерального дорожного агентства и Государственной компании «Российские автомобильные дороги», Международной научно-практической конференции «Современные проблемы материаловедения» (2024, 2025 Липецк), ряде профильных отраслевых конференций и выставок «Сибирские дороги» (2024), «Асфальтобетон» (2023,2024), «Дорога Экспо» (2022) .

Публикации. Основные положения диссертационного исследования изложены в 10 научных публикациях, из которых 8 опубликованы в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

Личный вклад. Формулировка цели и рабочей гипотезы диссертации, определение задач для достижения цели исследования выполнены непосредственно автором. Самостоятельно сделан анализ источников литературы по теме диссертационного исследования. Выполнена на основе научного подхода к планированию и осуществлению экспериментальная часть работы. Проведен анализ и обобщение полученных экспериментальных и теоретических результатов. Сформулированы выводы и основные положения диссертационного исследования.

Структура и содержание работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 167 страницах, содержит 68 рисунков и 24 таблицы. Список литературы включает 120 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, определены цель и задачи исследований, представлена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе Рассмотрен процесс развития методов проектирования нежестких дорожных одежд в практике СССР и Российской Федерации, а также зарубежных стран. Отмечено, что в основе разработанных методов лежат преимущественно теоретические положения теории упругости, адаптированные для инженерных расчетов путем приведения упругих слоистых сред к однородным или двухслойным полупространствам. Определено, что в основе всех отечественных подходов к прогнозированию усталостной выносливости и усталостной долговечности асфальтобетонных слоев лежат растягивающие напряжения на нижней границе пакета асфальтобетонных слоев. При этом значительно более перспективным для прогноза усталостной выносливости выглядит использование относительной растягивающей деформации, как величины, которая может быть измерена с использованием специализированных датчиков в конструкции дорожной одежды, определена на современных лабораторных установках, и хорошо отражает повышенную усталостную сопротивляемость современных асфальтобетонов.

Определено, что до текущего момента отсутствуют разработанные научно обоснованные рекомендации по физическому моделированию НДС дорожных одежд под воздействием различных видов расчетных нагрузок с целью определения характеристик, влияющих на усталостную выносливость асфальтобетона.

Во второй главе было определено, что научной основой физического моделирования является теория подобия, которая устанавливает условия подобия моделей и оригиналов, даёт возможность обобщать единичные эксперименты, и

распространять найденные зависимости на подобные системы. Учитывая отсутствие системного подхода к физическому моделированию НДС именно дорожных одежд, был разработан теоретический алгоритм разработки испытательного стенда для физического моделирования, включающий следующие операции:

- выбор программного обеспечения для проведения теоретического обоснования планировочных решений испытательного стенда для физического моделирования дорожных одежд позволяющего определять НДС для многослойных конструкций;

- проведение расчетов для дорожной одежды с целью определения зоны действия вертикальных напряжений в теле дорожной одежды при воздействии стандартных расчетных нагрузок;

- обоснование планировочных решений с учетом необходимой точности получаемых результатов и технологических особенностей устройства слоев дорожных одежд, а также разработка макета испытательного стенда для физического моделирования;

- выбор и обоснование системы регистрации параметров НДС физической модели при создании нагрузок установками статического и динамического нагружения.

Для предварительного определения планировочных решений испытательного стенда было выполнено математическое моделирование приложения расчетной нагрузки. В качестве математической модели использована модель слоистого полупространства в осесимметричной постановке (рисунок 1).

Расчетной схемой данной математической модели является упругое многослойное полупространство, нагруженное на внешней поверхности осесимметричной нагрузкой, распределенной по круговому отпечатку.

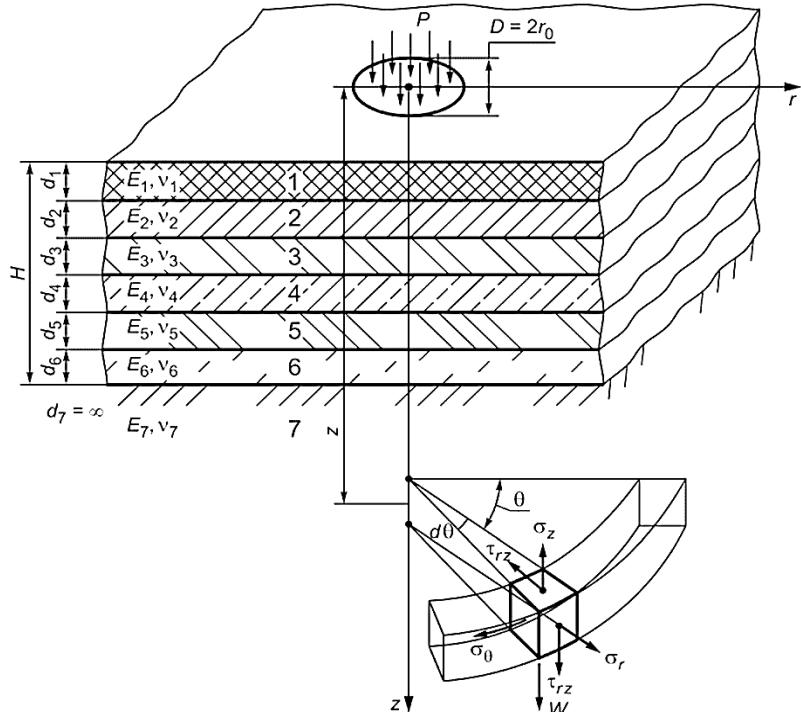


Рисунок 1 - Расчетная схема семислойного полупространства

Для расчета НДС необходимо отыскать в каждом слое решения $\varphi_i(r, z)$, $i = 1, 2 \dots 7$ бигармонического уравнения согласно (1)

$$\nabla^2 \nabla^2 \varphi_i(r, z) = 0, \quad (1)$$

Решение данной бигармонической задачи осуществляется на основе представления Туроверова, при этом граничные условия имеют вид:

На поверхности $z = 0$ предполагаются выполнеными граничные условия (2 и 3):

$$\sigma_{z1}(r, 0) = \begin{cases} p, & r \leq r_0 \\ 0, & r > r_0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\tau_{rz1}(r, 0) = 0 \quad (3)$$

При спаянном контакте на границе $z = h_1$ смежные слои имеют равные напряжения и смещения (4 и 5):

$$\sigma_{z1}(r, h_1) = \sigma_{z2}(r, h_1) \quad \tau_{rz1}(r, h_1) = \tau_{rz2}(r, h_1) \quad (4)$$

$$U_1(r, h_1) = U_2(r, h_1) \quad W_1(r, h_1) = W_2(r, h_1) \quad (5)$$

При гладком контакте на границе $z = h_1$ смежные слои имеют равные вертикальные и касательные напряжения (при этом касательные напряжения равны нулю) и равны вертикальные перемещения (6 и 7):

$$\sigma_{z1}(r, h_1) = \sigma_{z2}(r, h_1) \quad \tau_{rz1}(r, h_1) = \tau_{rz2}(r, h_1) = 0 \quad (6)$$

$$W_1(r, h_1) = W_2(r, h_1) \quad (7)$$

Данное решение реализовано в отечественном программном комплексе «Sigma PRO», реализующем точное решение теории упругости в соответствии с ОДМ 218.3.1.005-2021.

Для выполнения расчетов принята усредненная конструкция дорожной одежды. Основные расчетные параметры представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные параметры усредненной конструкции ДО

№ слоя	Материал	Толщина слоя, м	Расчетный модуль упругости при 10°C, МПа
1	ЩМА на БНД 70/100	0,05	3800
2	А22Н на БНД 70/100	0,06	4150
3	А32О на БНД 70/100	0,08	3250
4	ЩПС 0/45	0,30	275
5	Песок средний	0,40	120
6	Зем. полотно	∞	75

Расчетные характеристики материалов конструкции приняты по актуальному нормативному документу ГОСТ Р 71404-2024.

Давление P , равномерно распределенное по круговому отпечатку диаметром 30 см принято равным 1 МПа. Распределение нормальных вертикальных напряжений по результатам математического моделирования приложения нагрузки представлено на рисунке 2. Красным выделено распределение вертикальных напряжений в дорожной одежде, составляющих $\sim 1\%$ от приложенного к поверхности давления, что соответствует погрешности используемых датчиков (см. таблицу 2).

Таким образом минимальные размеры испытательной секции составили: ширина 1,6 м, длина – 1,6 м, глубина – 1,5 м

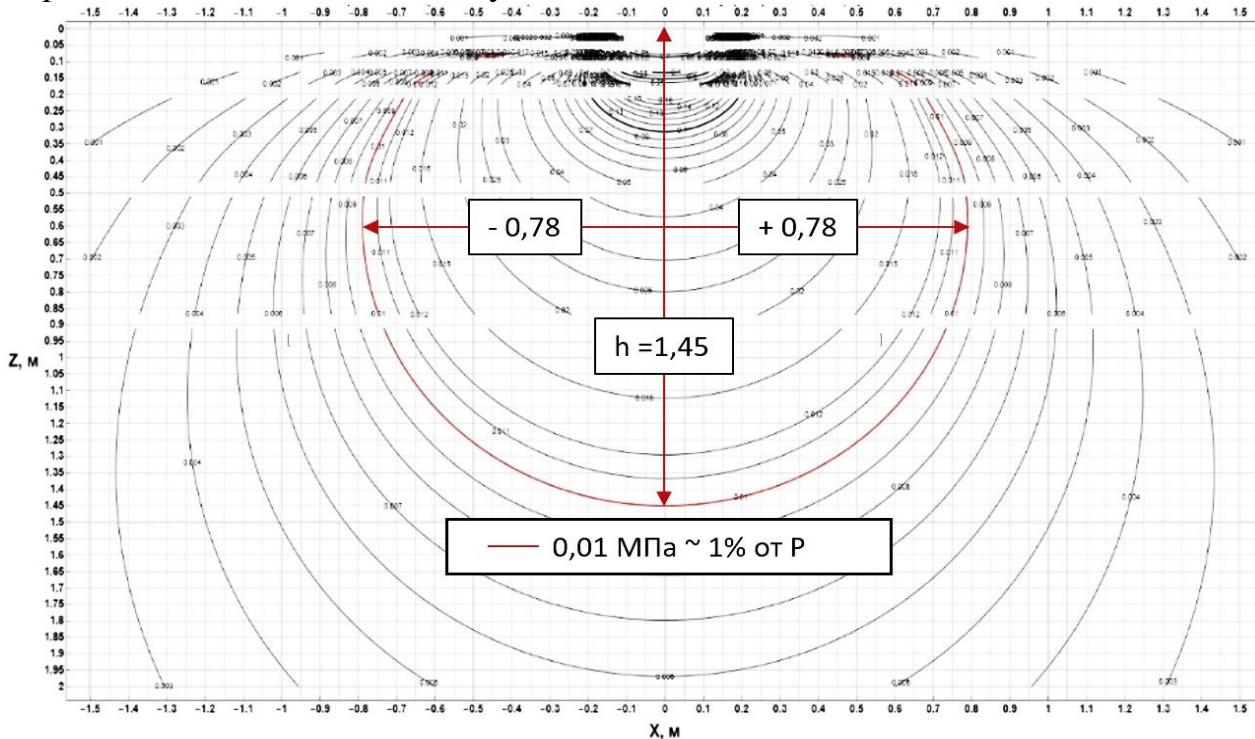


Рисунок 2 – Распределение нормальных вертикальных напряжений в многослойной конструкции усредненной дорожной одежды

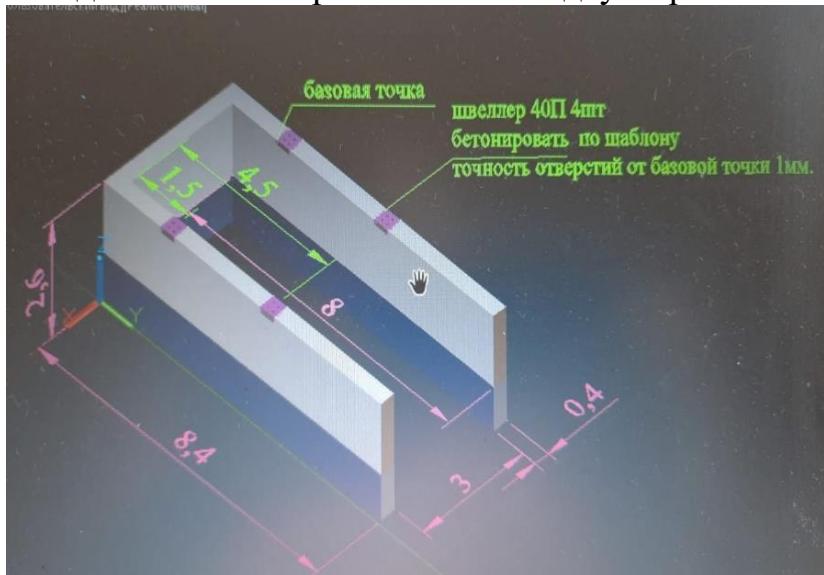
Окончательные размеры испытательного стенда обоснованы следующими факторами:

- возможность устройства до трех измерительных створов с различными конструктивными слоями,
- исключение влияния бетонных стен на НДС дорожных одежд,
- исключение влияния грунта естественного залегания на НДС дорожных одежд,
- возможность создания нагружения с расчетными параметрами (нагрузка, давление, диаметр отпечатка колеса) с использованием современного оборудования (штамповая установка статического нагружения, прицепная установка динамического нагружения FWD),
- возможность устройства различных по капитальности конструкций дорожных одежд (начиная с рабочего слоя земляного полотна и заканчивая слоями из асфальтобетона),
- возможность использования реальной дорожно-строительной техники (виброплиты, катки, погрузчики),
- возможность многократной установки системы определения НДС дорожных одежд (датчиков относительных деформаций и напряжений на границах конструктивных слоев).

Исходя из перечисленных факторов и минимальных размеров испытательной секции, были определены окончательные внутренние размеры испытательного стенда: ширина 3 м, длина – 8 м, глубина – 2,6 м.

Выбранная ширина испытательного стенда соответствует минимально допустимой ширине полосы движения автомобильной дороги.

Для выполнения испытаний статическим штампом, в качестве упора, на испытательном стенде была предусмотрена специальная перемещающаяся вдоль стенда балка из широкополочного двутавра 50Ш1.



Визуальное представление испытательного стенда для устройства слоев дорожной одежды представлено на рисунке 3.

Рисунок 3 – Визуальное представление испытательного стенда

Для регистрации параметров НДС применялись датчики вертикальных напряжений KDA-1MPA и

датчики относительных деформаций KM-100HAS японского производства совместно с системой обработки и программным обеспечением производства компании «TML» Япония. Основные параметры датчиков приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Основные параметры применяемых датчиков

Вид датчика	Основные размеры	Погрешность	Предел измерений
KDA-1MPA	Ø 200 мм	1%	1 МПа
KM-100HAS	L _{базы} 100 мм	1%	±5000 με

Выбранные датчики позволяют регистрировать показатели НДС дорожной одежды в различных слоях с погрешностью 1% от величины прикладываемого давления, что согласуется с измеряемой зоной распространения вертикальных напряжений по результатами математического моделирования.

Помимо этого, во второй главе представлены основные технологические операции по устройству слоев в испытательном стенде в том числе алгоритм монтажа датчиков регистрации параметров НДС дорожной одежды.

В третьей главе выполнено строительство испытательного стенда для осуществления эксперимента по определению модулей упругости слоев и регистрации параметров НДС физической модели дорожной одежды. В рамках работ было устроено две конструкции, представленные в таблице 3. Основное отличие конструкций заключается в материалах, примененных в слое №4.

Таблица 3 - Основные параметры устроенных конструкций

№ слоя	Толщина слоя, м	Конструкция №1	Конструкция №2
1	0,06	ЩМА-16 на ПБВ 60	ЩМА-16 на ПБВ 60

Продолжение таблицы 3

2	0,06	A16Нн на БНД 70/100	A16Нн на БНД 70/100
3	0,07	A22Он на БНД 70/100	A22Он на БНД 70/100
4	0,15	ЩПС укрепленная цементом	Органоминеральная смесь ХО 32 ЭМ
5	0,15	ЩПС 0/45 мм	ЩПС 0/45 мм
6	0,30	ППС (песок средний)	ППС (песок средний)
7	∞	Зем. полотно	Зем. полотно

Оба варианта конструкции устроены размером 3 на 3 метра. Датчики регистрации вертикальных напряжений были заложены в обеих секциях между слоями №4 и №5, а так же №5 и №6. Датчики регистрации относительных деформаций были заложены в обеих секциях между слоями №3 и №4

В процессе устройства каждого слоя измерялись модули упругости на поверхности каждого слоя штамповыми установками и затем определялись модули упругости материала каждого конструктивного слоя методом обратного расчета. Важно отметить, что испытания на асфальтобетонных слоях выполнялись при температуре близкой к 10 °С, являющейся расчетной при проектировании дорожных одежд по критерию упругого прогиба.

Результаты определения модулей упругости материалов при послойных измерениях $E_{сл.}$ представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Результаты определения модулей упругости слоев методом обратного расчета, по результатам послойных измерений

Материал слоя	Тол- щина слоя, м	Конструкция №1		Конструкция №2	
		$E_{сл.}$ при ста- тическом нагруже- нии, МПа	$E_{сл.}$ при ди- намическом нагружении, МПа	$E_{сл.}$ при ста- тическом нагружении, МПа	$E_{сл.}$ при ди- намическом нагружении, МПа
ЩМА-16 на ПБВ 60	0,06	510	6800	510	6700
A16Нн на БНД 70/100	0,06	540	8000	540	8000
A22Он на БНД 70/100	0,07	715	7000	715	6800
Укрепленный слой осно- вания	0,15	1320	3329	763	4700
Щебеноочно-песчаная смесь 0/45 мм	0,15	361	не опреде- лялся	376	не опреде- лялся
ППС (песок средний)	0,30	173	не опреде- лялся	172	не опреде- лялся
Зем. полотно	∞	83	не опреде- лялся	80	не опреде- лялся

Результаты натурных испытаний показали, что модули упругости слоев значительно зависят от времени приложения нагрузки - в статике результаты

значительно ниже, чем в динамике. Так же было выявлено отличие фактических модулей упругости слоев от расчетных, принимаемых при проектировании дорожных одежд. Особенно отличие заметно на укрепленных материалах слоев основания, при том, что при расчете конструкций дорожных одежд для слоя из органоминеральной смеси и слоя из ЩПС укрепленного цементом, в настоящее время принимаются одинаковые модули упругости как при расчете на статику, так и при расчете на динамику, однако в данной работе было выявлено что модули упругости таких материалов в слое могут отличаться на 34 % в динамике и на 53 % в статике.

По окончании устройства всех слоев дорожных одежд были проведены измерения с целью фиксации основных параметров НДС с использованием заложенных между слоями датчиков.

Результаты регистрации основных параметров НДС при статическом и динамическом типе нагружения представлены в таблице 5.

Таблица 5 - Результаты регистрации основных параметров НДС

Параметры НДС	Конструкция №1		Конструкция №2	
	при статическом нагружении	при динамическом нагружении	при статическом нагружении	при динамическом нагружении
Общий модуль упругости на поверхности, МПа	456	1108	536	1109
Давление на поверхности ППС МПа % от давления на поверхности	<u>0,051</u> 6,4	<u>0,014</u> 1,7	<u>0,046</u> 5,7	<u>0,018</u> 2,2
Давление на поверхности рабочего слоя, МПа % от давления на поверхности	<u>0,023</u> 2,8	<u>0,009</u> 1,1	<u>0,025</u> 3,1	<u>0,009</u> 1,3
Относительная растягивающая деформация на границе нижнего слоя из асфальтобетона (ε_r), $\mu\epsilon$	85,1	36,6	64,5	29,3

По результатам анализа полученных данных было подтверждено, что статическое и динамическое нагружение измерительными установками при аналогичных параметрах воздействия (отпечаток колеса и давление на покрытие) оказывает различное воздействие на НДС конструкции. В том числе установлено, что в конструкции №2 с основанием из органоминеральной смеси относительные растягивающие деформации при динамическом нагружении меньше на ~20% чем в конструкции №1.

Помимо эксперимента с послойными измерениями модулей упругости выполнялись также лабораторные испытания для сопоставления значений модулей упругости, определяемых с использованием современной методики на установке АМРТ и по отечественной методике на приборе Щербакова изложенной в ВСН 46-83. Испытания проводились для каждой асфальтобетонной смеси, укладываемой при устройстве слоев физической модели дорожной одежды при температурах: 0, 10, 20, 30, 40 и 50°C. Предварительно для определения модуля

упругости по методике Щербакова определялись пределы прочности при изгибе. Для сопоставления модулей упругости, полученных различными методиками, были построены графики изменения модуля упругости асфальтобетона от температуры, представленные на рисунке 4.

По рисунку 4 видно, что графики модуля упругости всех асфальтобетонных смесей определенные по методике Щербакова при температурах 50 и 40 °C наиболее приближены к графику, полученному с применением методики АМРТ при частоте 5 Гц, при температурах 30, 20 и 0 °C наиболее приближены к графику при частоте 1 Гц, а при температуре 10 °C наиболее приближены к графику при частоте 0,5 Гц. В общем кривую падения модуля упругости на приборе Щербакова для каждого типа асфальтобетонной смеси можно с учетом приемлемой сходимости результатов методик ($\pm 20\%$) охарактеризовать кривой падения модуля упругости, полученной на установке АМРТ при частоте 1 Гц.

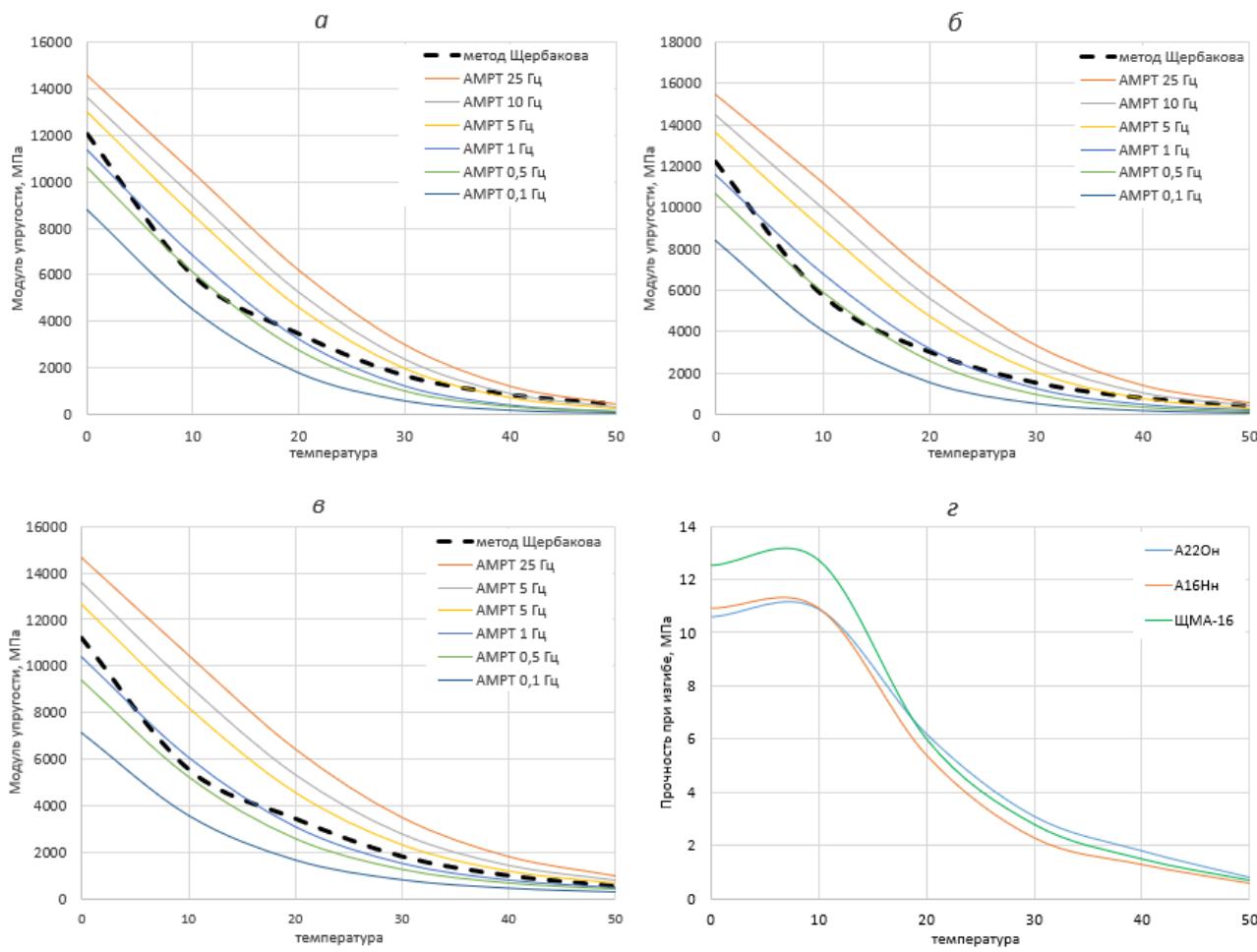


Рисунок 4 - Зависимости между модулем упругости и температурой по методике Щербакова и методике АМРТ асфальтобетонной смеси А22Он (а), асфальтобетонной смеси А16Нн (б), асфальтобетонной смеси ЩМА-16 (в), пределы прочности при изгибе (г)

Также в рамках работы были проведены испытания по определению усталостной выносливости асфальтобетонных смесей в лабораторных условиях и построены регрессионные зависимости изменения относительных растягивающих деформаций от количества циклов приложения нагрузки с применением

устройства для непрямого растяжения цилиндрических образцов (ITFT), представленного на рисунке 5.



1 – нагружающий шток; 2 - датчики деформации LVDT; 3 – ось нагружения (вертикальная); 4 – нагружающие элементы; 5 – стальные пластины для установки датчиков деформации; 6 – испытуемый образец асфальтобетона

Рисунок 5 – Испытательное устройство для непрямого растяжения (ITFT)

Для дальнейших расчетов усталостной выносливости конструкций были построены регрессионные зависимости между относительной начальной деформацией и количеством циклов до момента разрушения (рисунок 6), которые позволяют определять усталостную выносливость асфальтобетонов подставляя в уравнение регрессии различные значения относительных растягивающих деформаций с высокой степенью надежности (коэффициенты детерминации R^2 составляют не менее 0,9).

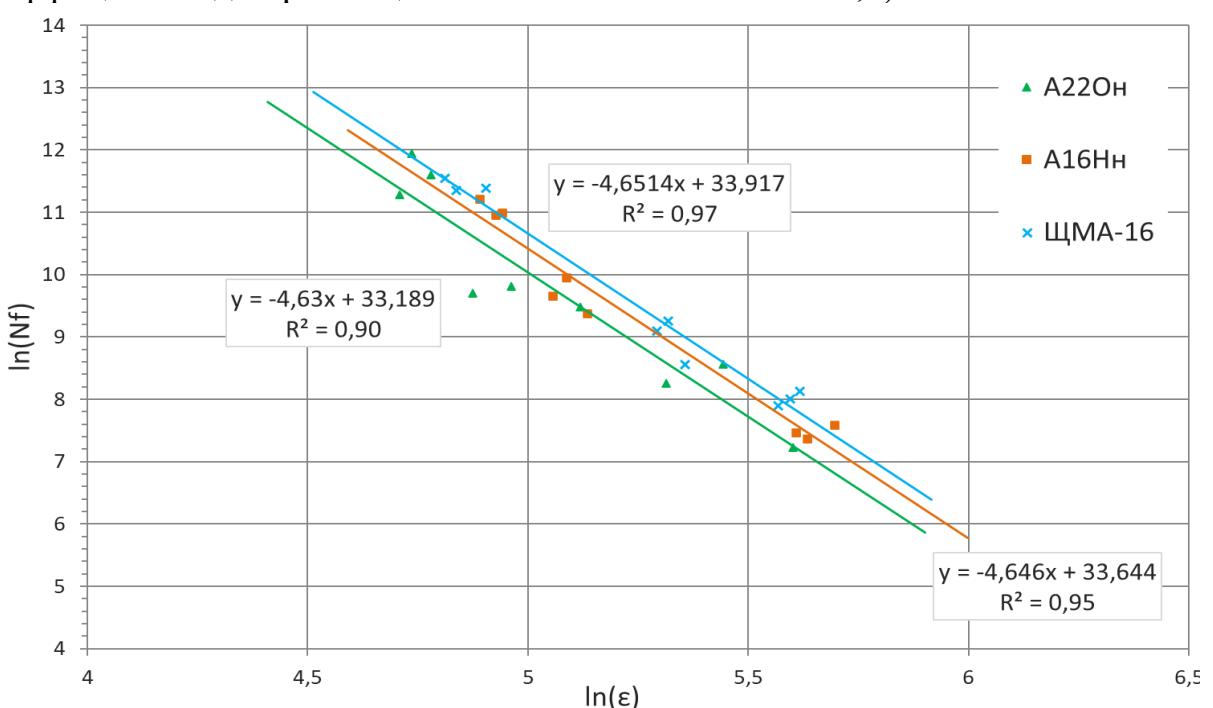


Рисунок 6 - Регрессионные зависимости между относительной начальной деформацией ε и количеством циклов до момента разрушения N_f , полученные по методике непрямого растяжения (ITFT)

В четвертой главе проведено сопоставление растягивающих деформаций на нижней границе пакета асфальтобетонных слоев фактических $\varepsilon_r^{\text{факт}}$, полученных при проведении испытаний на физической модели и расчетных $\varepsilon_r^{\text{расч}}$, полученных путём математического моделирования с применением в расчетах

модулей упругости асфальтобетонов полученных в лабораторных условиях и на физической модели (таблица 6).

Таблица 6 - Сопоставление растягивающих деформаций на нижней границе пакета асфальтобетонных слоев для конструкций №1 и №2

№ варианта	При использовании в расчете модулей упругости полученного различными способами:	$\varepsilon_r^{\text{расч}}$, $\mu\epsilon$	$\varepsilon_r^{\text{факт}}$, $\mu\epsilon$
Конструкция №1	E_{FWD}	40,9	36,6
	$E_{\text{Щерб.}}$	39,6	
	$E_{\text{АМРТ}}$	40,3	
Конструкция №2	E_{FWD}	31,4	29,3
	$E_{\text{Щерб.}}$	29,8	
	$E_{\text{АМРТ}}$	32,0	

В результате было установлено количественное совпадение результатов относительных растягивающих деформаций на нижней границе пакета асфальтобетонных слоев при динамическом типе нагружения физической модели дорожной одежды, при этом погрешность между расчетными и экспериментальными значениями оказалась в пределах 10%. Таким образом можно предполагать, что полученные данные могут быть применены для прогнозирования усталостной выносливости асфальтобетонных слоев.

Учитывая малую погрешность между результатами расчета относительных растягивающих деформаций на нижней границе асфальтобетонных слоев для обеих рассматриваемых конструкций и фактическими значениями относительных растягивающих деформаций зарегистрированных в рамках натурного эксперимента можно констатировать, что определенные на физической модели дорожной одежды модули упругости могут быть использованы в качестве базовых значений к которым целесообразно приводить модули упругости материалов определяемые в лабораторных условиях, в частности на основе испытаний по методике АМРТ и методике Щербакова. Рассчитанные значения коэффициентов приведения для исследованных асфальтобетонов приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Значения коэффициентов приведения модуля упругости от лабораторных испытаний к натурным

Слой дорожной одежды	$K_{\text{пер}}$ для E_{FWD}	$K_{\text{пер}}$ для $E_{\text{Щерб.}}$	$K_{\text{пер}}$ для $E_{\text{АМРТ}}$
ЩМА-16 на ПБВ 60	1,00	1,21	0,74
А16Нн на БНД 70/100	1,00	1,24	0,72
А22Он на БНД 70/100	1,00	1,38	0,87

Зависимость для перевода, при условии принятия в качестве основных расчетных значений модулей упругости слоя будет иметь следующий вид:

$$E_c = E_{lab} K_{ner}$$

Также на основе измерений относительных растягивающих деформаций на физической модели и лабораторных испытаний асфальтобетонных смесей получены эмпирические зависимости позволяющие прогнозировать количество циклов приложений расчетной нагрузки до усталостного разрушения для всех рассматриваемых асфальтобетонов:

Для верхнего слоя основания из асфальтобетона А22От зависимость имеет следующий вид:

$$\ln(N(\varepsilon)) = -4.63 \ln(\varepsilon) + 33.189$$

Для нижнего слоя покрытия из асфальтобетона А16Нт зависимость имеет следующий вид:

$$\ln(N(\varepsilon)) = -4.646 \ln(\varepsilon) + 33.644$$

Для верхнего слоя покрытия из асфальтобетона ЩМА 16 зависимость имеет следующий вид:

$$\ln(N(\varepsilon)) = -4.6514 \ln(\varepsilon) + 33.917$$

После упрощения, в обобщенном виде данные зависимости будут иметь следующий вид:

$$N(\varepsilon) = A \varepsilon^{-k_1} e^{k_2},$$

где:

A - коэффициент приведения от лабораторных режимов нагружения к полевым.

k_1 и k_2 - эмпирические параметры, определяемые в ходе лабораторных испытаний.

Опираясь на полученные зависимости, была рассчитана усталостная выносливость для конструкций дорожных одежд, устроенных на испытательном стенде для физического моделирования. Результаты расчетов представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты прогнозирования усталостной выносливости асфальтобетонных слоев для двух вариантов конструкций

Наименование слоя	Конструкция 1			Наименование слоя	Конструкция 2		
	E_{FWD}	ε_r	$N(\varepsilon)$		E_{FWD}	ε_r	$N(\varepsilon)$
ЩМА-16 на ПБВ 60	6700	-20,0	∞	ЩМА-16 по на ПБВ 60	6700	-20,4	∞
А16Нт на БНД 70/100	8000	13,8	>100 млн	А16Нт на БНД 70/100	8000	8,13	>100 млн
А22Он на БНД 70/100	7000	36,6	17,1 млн	А22Он на БНД 70/100	6800	29,3	52,8 млн
ЩПС, укрепленная цементом	800	-	-	ХО 32 ЭМ	800	-	-

Результаты прогнозирования показали, что суммарное число приложений расчетных нагрузок до момента наступления усталостного разрушения в текущем режиме деформирования на нижней границе пакета асфальтобетонных слоев составляет 17 107 878 циклов для конструкции №1 и 52 796 901 циклов приложений нагрузки для конструкции №2, следовательно можно сделать вывод, что конструкция №2 с основанием из органоминеральной смеси будет в 3,1 раза более выносливой к образованию усталостных дефектов чем конструкция №1 с основанием из ЩПС укрепленной цементом.

Полученные в рамках данной работы результаты при дальнейшем накоплении данных могут послужить экспериментальной и теоретической основой формирования нового «деформационного критерия» усталостного разрушения асфальтобетона, где в основе расчета будут лежать показатели относительной растягивающей деформации и усталостной выносливости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В рамках анализа методов расчета и конструирования дорожных одежд в России и за рубежом, а также анализа состояния экспериментальной базы позволяющей изучать НДС дорожных одежд, установлено, что до текущего момента отсутствуют разработанные научно-обоснованные рекомендации по физическому моделированию НДС дорожных одежд под воздействием различных видов расчетных нагрузок с целью определения характеристик, влияющих на усталостную выносливость асфальтобетона.

2. Впервые с применением математической модели слоистого полупространства в осесимметричной постановке разработана и научно обоснована конструкция испытательного стенда для физического моделирования НДС дорожных одежд, позволяющая устраивать одновременно до трех различных конструкций, исключая влияние подпорных бетонных стен и природных осадков на получаемые результаты.

3. Впервые исследованы механические параметры слоев, устроенных на физической модели. Установлено, что для слоев основания из органоминеральных смесей и ЩПС, укрепленной цементом модули упругости, могут иметь существенные отличия, при том, что по нормативным документам на проектирование их модули принимают абсолютно равными. Также было отмечено, что в конструкции №2 с основанием из органоминеральной смеси относительные растягивающие деформации при динамическом нагружении меньше на 20% чем в конструкции №1.

4. Определены модули упругости асфальтобетонных смесей, а также определены параметры их сопротивляемости усталостным разрушениям в лабораторных условиях, с применением, как традиционного, так и современного лабораторного оборудования. Впервые установлена взаимосвязь между лабораторными модулями упругости, полученными с применением различных традиционных и современных методик. Построены регрессионные зависимости между относительными растягивающими деформациями и количеством циклов приложения нагрузки до наступления момента разрушения. Полученные зависимости

позволяют определять усталостную выносливость асфальтобетонов с высокой степенью надежности.

5. Проведена валидация результатов измерений модуля упругости и относительной растягивающей деформации на физической модели дорожной одежды с результатами математического моделирования. Впервые было установлено количественное совпадение результатов относительных растягивающих деформаций на нижней границе пакета асфальтобетонных слоев при динамическом нагружении физической модели дорожной одежды со значениями полученными расчетным способом, а также получены коэффициенты пересчета от лабораторных модулей упругости асфальтобетона, определенных различными методиками к модулям упругости, полученным при послойных измерениях на физической модели.

6. Предложена методика для прогнозирования выносливости для нежестких дорожных одежд. С применением данной методики проведены сравнительные расчеты устроенных на физической модели вариантов конструкций, которые показали, что конструкции №2 с основанием из органоминеральной смеси будет в 3,1 раза более выносливой, чем в конструкции №1.

Перспективы дальнейшей разработки темы:

- полученные коэффициенты пересчета модулей упругости асфальтобетонов могут позволять усовершенствовать систему проектирования дорожных одежд, перейдя от типовых (табличных значений) моделей упругости к фактическим значениям полученным в лабораторных условиях
- полученные результаты могут позволить усовершенствовать алгоритм оценки прочности дорожных одежд в части расчетов модулей материалов слоев дорожных одежд.
- полученные математические модели по усталостной выносливости могут быть использованы при прогнозировании усталостных повреждений на основе линейных и нелинейных гипотез суммирования повреждений.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ:

1 **Кадыров, Г. Ф.** Актуальные подходы к моделированию напряженно-деформированного состояния нежестких дорожных одежд от статических и динамических нагрузок / Е. Н. Симчук, Г. Ф. Кадыров, М. Ю. Горский [и др.] // Дороги и мосты. – 2025. – № 1(53). – С. 55-71. – DOI 10.70991/1815-896X-2025-1-53-55-71. – EDN DAGHTY.

2 **Кадыров, Г. Ф.** Совершенствование методики расчета упругих параметров многослойных дорожных одежд / М. Ю. Горский, Е. Н. Симчук, Г. Ф. Кадыров, А. В. Бочкарев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2025. – № 4. – С. 56-64. – DOI 10.25791/pribor.4.2025.1578. – EDN WIVXMXZ.

3 **Кадыров, Г. Ф.** Сопоставительные испытания асфальтобетона на усталостную долговечность с применением различных современных лабораторных методов / Г. Ф. Кадыров, Е. Н. Симчук, А. Н. Тиратурян // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2023. – № 4(72). – С. 121-132. – DOI 10.36622/VSTU.2023.72.4.010. – EDN WQKCVM.

4 **Кадыров, Г. Ф.** Исследование модулей упругости щебеночно-мастичного асфальтобетона для расчета конструкций дорожных одежд / Г. Ф. Кадыров, М. Ю. Горский, К. А. Жданов, Е. Н. Симчук // Дороги и мосты. – 2023. – № 1(49). – С. 273-297. – EDN KWNTQW.

5 **Кадыров, Г. Ф.** Совершенствование методики расчета нежестких дорожных одежд с учетом применения решения задачи теории упругости для многослойного полупространства /

М. Ю. Горский, **Г. Ф. Кадыров**, А. В. Стрельцов, Е. Н. Симчук // Дороги и мосты. – 2021. – № 2(46). – С. 53-74. – EDN TPWVZF.

6 **Кадыров, Г. Ф.** Симчук, Е. Н. Совершенствование методов испытаний асфальтобетонных смесей и асфальтобетона в дорожной отрасли РФ / Е. Н. Симчук, Г. Ф. Кадыров, А. Е. Симчук // Путевой навигатор. – 2023. – № 56(82). – С. 52-59. – EDN RCDGTY.

7 **Кадыров, Г. Ф.** Оценка влияния температурных факторов на параметры чаши прогиба нежестких дорожных одежд на основе испытаний прочности установками динамического нагружения / М. Ю. Горский, Е. Н. Симчук, Г. Ф. Кадыров, А. Е. Симчук // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 211-225. – DOI 10.31675/1607-1859-2023-25-4-211-225. – EDN FKONHU.

8 **Кадыров, Г. Ф.** Количественная оценка сцепления асфальтобетонных слоев дорожной одежды / Г. Ф. Кадыров, Е. Н. Симчук, М. Ю. Горский, А.Е. Симчук, А.В. Стрельцов // Журнал наука и техника в дорожной отрасли. – 2023. – № 4 – С. 20-23.

Статьи в изданиях, входящих в Перечень МБД:

9 **Kadyrov G. F.** Comparative testing of asphalt concrete for fatigue life using various modern laboratory methods / G. F. Kadyrov, E. N. Simchuk, A. N. Tiraturyan // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2024. – No. 3(63). – P. 65-75. – DOI 10.36622/2542-0526.2024.63.3.006. – EDN SJFSRZ. Англоязычная версия 1.

10 **Kadyrov, G.F.** Prediction of temperature distribution in asphalt concrete layers / Tiraturyan, A.N., Uglova, E.V., Simchuk, E.N., Kadyrov, G.F., Gorskiy, M.Yu. // Magazine of Civil Engineering. 2024. 17(7). Article no. 13101. DOI: 10.34910/MCE.131.1

Кадыров Георгий Фаррухович

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СЛОЕВ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД НА ОСНОВЕ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 26.11.2025. Формат 60×90 1/16. Бумага писчая.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 3878.

Отпечатано: Отдел полиграфии Научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова 119192 Москва, Ломоносовский проспект 27.