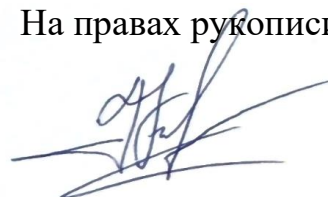


**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук,

доцент

Тиратурян Артем Николаевич

Ростов-на-Дону, 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	11
1.1 Обзор методов расчета и проектирования нежестких дорожных одежд, применяемые в РФ.	11
1.2 Обзор методов расчета и проектирования нежестких дорожных одежд, применяемые за рубежом.	31
1.3 Современные подходы к прогнозированию усталостных повреждений.....	50
1.4 Определение цели и задач исследования	58
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД И РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД.....	61
2.1 Теоретические предпосылки к определению усталостной выносливости асфальтобетонных слоев на основе физического моделирования	61
2.2. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния дорожной одежды для обоснования планировочных размеров испытательного стенда.	64
2.3 Разработка конструкции испытательного стенда для регистрации параметров деформирования слоев асфальтобетона при воздействии динамических и статических нагрузок	67
ГЛАВА 3. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСФАЛЬТОБЕТОНА НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ.....	94
3.1 Послойное устройство асфальтобетонных слоев на испытательном стенде с исследованием параметров напряженно-деформированного состояния	94

3.2 Описание методик определения расчетных характеристик асфальтобетонов в лабораторных условиях	112
3.3 Проведение комплекса исследований по определению расчетных характеристик асфальтобетонов примененных при устройстве конструкций дорожных одежд на физической модели	123
ГЛАВА 4. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СЛОЕВ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД	134
4.1 Модель анализа напряженно-деформированного состояния слоистой среды на основе точного решения теории упругости	134
4.2 Расчет напряженно-деформированного состояния дорожных одежд с учетом модулей упругости слоев асфальтобетона, установленных в ходе испытаний на физической модели.....	135
4.3 Коэффициенты пересчета лабораторных значений модулей упругости материалов конструктивных слоев дорожных одежд в модули упругости слоя дорожной одежды.	143
4.4 Рекомендации по совершенствованию методов прогнозирования усталостного разрушения асфальтобетонных слоев.	144
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	149
БИБЛИОГРАФИЯ.....	151
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акты внедрения диссертационных исследований.....	165

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. 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 течении 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.

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, и ее планировочных решений, позволяющих осуществлять весь спектр необходимых измерений, для определения механических параметров конструкции в целом, и отдельных ее слоев.

- определить в ходе испытаний 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 в условиях физической модели, лабораторных испытаниях на традиционном оборудовании, и лабораторных испытаний на современном оборудовании;

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

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 поспособствует развитию методов прогнозирования усталостных повреждений на основе линейных и нелинейных гипотез суммирования повреждений.

Объект исследования: Нежесткие дорожные одежды.

Предмет исследования: Усталостная выносливость асфальтобетонных слоев.

Методы исследования: Результаты диссертационного исследования методами физического моделирования напряженно-деформированного состояния нежестких дорожных одежд, инструментальными натурными и лабораторными средствами измерений, а также методами математического моделирования.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработаны и научно обоснованы основные планировочные решения физической модели нежесткой дорожной одежды, обеспечивающие возможность осуществления мониторинга НДС секций с различной конструкцией дорожных одежд как при статическом, так и при динамическом нагружении;

- получен 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;

- определены качественные и количественные зависимости между экспериментальными лабораторными значениями модулей упругости асфальтобетонов и модулями упругости асфальтобетонных слоев, зарегистрированными в ходе проведения инструментальных измерений на физической модели, что позволило установить коэффициенты приведения от лабораторных значений к натурным.

Достоверность результатов, 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 исследовательских выводов и рекомендаций.

Теоретическая значимость работы заключается в усовершенствовании методологии проектирования нежестких дорожных одежд путем определения параметров НДС дорожной одежды на основе физического моделирования и комплексе 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.

На защиту выносятся:

1. Результаты комплексных испытаний асфальтобетонных слоев оборудованием для натурных экспериментов в условиях физической модели нежесткой дорожной одежды, а также результаты лабораторных испытаний асфальтобетонов для определения их динамического модуля упругости и сопротивляемости усталостным разрушениям;
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 выносливости нежестких дорожных одежд на основе относительных растягивающих деформаций.

Реализация результатов работы. 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.

Так же 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 исследования. 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 объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации составляет 167 страниц, 68 рисунков, 24 таблицы, библиографический список из 120 наименований, 1 приложение.

Благодарность: Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю доктору технических наук, доценту Артему Николаевичу Тиратуряну за внимание, помощь, ценные советы и замечания в процессе работы над диссертацией.

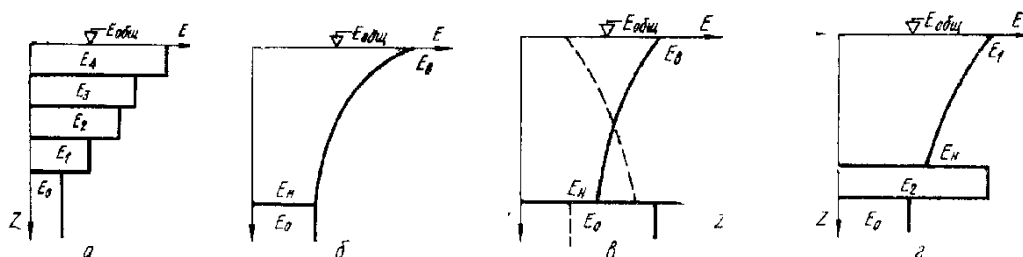
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Обзор методов расчета и проектирования нежестких дорожных одежд, применяемые в РФ.

1.1.1 В нашей стране практически все распространенные методы расчета дорожных одежд базируются на одних и тех же предпосылках, разработанных Ивановым Н.Н. и его учениками. Отличия, методов главным образом заключались в основном различием расчетных схем, как показано на рисунке 1). Исследования, направленные на создание метода расчета дорожной одежды, были начаты в 1926 году группой специалистов под руководством проф. Н.Н. Иванова.

На первом этапе исследований решались две основные задачи:

- выявить закон распределения давления от колеса по глубине многослойной дорожной одежды и подстилающего грунта,
- определить безопасное давление на грунт основания и на отдельные слои дорожной одежды.



а – схема СоюздорНИИ, МАДИ, используемая в действующем методе расчета; б – схема Бируля-Когана (ХАДИ); в – схема «скачок» (схема Калужского); г – схема с «жесткой» промежуточной прослойкой (схема Калужского-Плевако-Никитина)

Рисунок 1 – Расчетные схемы дорожных одежд

В тридцатых годах XX века Н.Н. Ивановым была сформулирована третья задача, которая заключалась в исследовании влияния интенсивности и характера движения на прочность и устойчивость дорожных одежд, что приведено в [36, 37, 38].

Уже в конце 30-х годов были проведены большие экспериментальные исследования напряженного состояния в грунтовых основаниях дорожных

одежд [39, 49, 47, 57, 61, 55]. При этом данные экспериментов сопоставлялись с результатами расчетов по формулам, полученным еще в 1885 году Буссинеском для упругого изотропного полупространства при действии на его поверхности сосредоточенной силы или нагрузки, равномерно распределенной по кругу. Согласование данных опыта и теоретического расчета производили либо путем введения в расчетные формулы коэффициента концентрации напряжений [65], либо приведением толщины слоев дорожной одежды к условной толщине с деформационными характеристиками подстилающего грунта методом «эквивалентного слоя» [29]. Уточненные таким способом теоретические формулы позволяли вычислять лишь вертикальные напряжения и перемещения по оси действия нагрузки. В то время это уже можно было считать значительным шагом вперед, поскольку позволило предложить дорожникам один из первых методов расчета дорожной одежды – метод СоюздорНИИ.

Данный метод был разработан в 1943 г. в СоюздорНИИ под руководством проф. Иванова Н.Н. и на протяжении многих лет был наиболее распространенным методом расчета нежестких дорожных одежд в СССР. В разработке теоретических основ и выполнении экспериментальных исследований принимали активное участие такие специалисты как: Покровский Г.И., Иноземцев А.А., Бабков В.Ф., Якунин М.И., Гербурт-Гейбович А.В., Булычев В.Г., Троицкая М.Н., Кривисский А.М., Корсунский М.Б. и др.

Первично опубликованный в 1943 году метод СоюздорНИИ постоянно совершенствовался на основе получаемых экспериментальных данных, что впоследствии вылилось в разработку первого официального документа по проектированию дорожной одежды – ВСН 46-60 [9].

По своим основным предпосылкам он близок к зарубежным методам расчета, который можно отнести к группе «Г». Метод основывается на нормировании величины предельных деформаций, вызывающих разрушение дорожных одежд.

Метод СоюздорНИИ основан на следующих трех допущениях:

1) Зависимость между нагрузкой и деформацией для дорожных одежд в целом, а также для материалов отдельных конструктивных слоев и для грунтов земляного полотна является линейной, вследствие чего по аналогии с модулем упругости за характеристику их прочности принимается модуль деформации E . При нагрузке на покрытие, передающейся через круглую площадку (штамп) по формуле (1):

$$E = \alpha \frac{P \cdot D}{l} \quad (1)$$

где P — удельное давление колеса на покрытие, кгс/см²;
 D — диаметр площадки (штампа), передающей давление на покрытие, см;
 l — деформация, см;
 α — коэффициент, равный 1 для однородных сред и $\frac{\pi}{2}$ — для слоистых сред.

2) Критерием прочности дорожной одежды является ее критический прогиб $l_{кр}$, при этом $l_{кр}$ — величина практически постоянная,

3) Влияние повторности нагружения аналогично увеличению статической нагрузки и может быть учтено для всех типов одежд и режимов движения при помощи введения так называемого коэффициента повторности или коэффициента запаса, определяемого по формуле (2):

$$K_s = \frac{P_s}{P} = a + b \lg N \quad (2)$$

где P — удельное давление колеса на покрытие, кгс/см²;
 P_s — удельная нагрузка, разрушающая дорожную одежду при статическом испытании, кгс/см²;

- N — число приложений нагрузки P , приводящее к разрушению дорожной одежды;
- a, b — постоянные величины.

Указанные допущения потребовали проверки, уточнения и обобщения в связи с развитием автомобильных перевозок, увеличением веса самих автомобилей, возрастанием скорости и интенсивности движения, появлением автопоездов, а также появлением новых материалов и конструкций.

Для этого в ДОРНИИ в 1948-1951 гг. были проведены специальные работы по исследованию модуля деформации, критического прогиба и коэффициента повторности.

Кратко принципы теории расчета по методу СоюздорНИИ можно изложить в следующих основных положениях:

1) Прочность дорожных одежд характеризуется предельно допустимой деформацией (осадкой), возникающей в результате воздействия вертикальных повторяющихся нагрузок. Здесь предельной допустимой деформацией считается такая деформация, при которой нарушается линейная зависимость между вертикальным давлением от колеса автомобиля и вертикальной деформацией дорожной одежды,

2) Прочность отдельных слоев и одежды в целом характеризуется модулями деформации, определяемыми по кривой осадки штампа от прикладываемого давления. Величину модуля деформации вычисляют при определенной величине относительной деформации ($1/D$),

3) В методе СоюздорНИИ сделано предположение, что с точки зрения распределения напряжений двухслойную систему можно заменить однослойной (по Покровскому Г.И.) с заменой толщины верхнего слоя (h_B) на некоторую эквивалентную толщину ($h_{\text{ЭКВ}}$), определяемую по формуле (3):

$$h_{\text{ЭКВ}} = h_B \sqrt[3]{\frac{E_B}{E_H}}, \quad (3)$$

где E_B — модуль верхнего слоя;

E_n — общий модуль нижележащих слоев.

В данном методе для учета пластических свойств материалов коэффициент (b) принимается равным 2,5.

Дорожную одежду конструируют исходя из условий, чтобы эквивалентный (общий) модуль деформации запроектированной конструкции $E_{\text{экв}}$ был не менее требуемого модуля деформации дорожной одежды $E_{\text{тр}}$, вычисляемого по формуле (4):

$$E_{\text{тр}} = \frac{\pi P k}{2 \lambda} \quad (4)$$

где P — удельное давление на покрытие колеса расчетного автомобиля,
 k — коэффициент запаса на повторность приложения нагрузки,
 $\lambda = \frac{l}{D}$ — относительная допускаемая деформация дорожной одежды.

Интенсивность движения в данном методе была учтена путем введения эмпирического коэффициента запаса на повторность (k), определяемого по формуле (5):

$$k = 0,5 + 0,65 \lg N \gamma, \quad (5)$$

где N — перспективная суммарная интенсивность движения расчетного автомобиля в сутки по одной полосе,
 γ — коэффициент, учитывающий влияние ширины проезжей части на повторность приложения нагрузок (при двухполосном движении $\gamma = 1$, при однополосном движении $\gamma = 2$).

Распределение напряжений в двухслойной системе было принято согласно закону Буссинеска для однородного массива. При этом формула

Буссинеска была заменена экспериментально полученной зависимостью Якунина М. И.

Для определения эквивалентного модуля деформации двухслойной одежды предложена формула (6):

$$E_{\text{экв}} = \frac{E_{\text{н}}}{1 - \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\left(\frac{E_{\text{в}}}{E_{\text{н}}}\right)^{1,4}}\right) \arctg \left(\frac{h_{\text{в}}}{D} \left(\frac{E_{\text{в}}}{E_{\text{н}}}\right)^{0,4}\right)} \quad (6)$$

где $E_{\text{экв}}$ — эквивалентный модуль деформации дорожной одежды,

$E_{\text{н}}$ — модуль деформации грунтового основания,

$E_{\text{в}}$ — модуль деформации слоя дорожной одежды,

$h_{\text{в}}$ — толщина верхнего слоя дорожной одежды.

При вычислении общего (эквивалентного) модуля деформации многослойных дорожных одежд последовательно рассматривается каждая пара смежных слоев.

Для конструирования нежесткой дорожной одежды авторы метода давали только два ограничения:

- модуль деформации нижележащего слоя должен быть меньше модуля деформации вышележащего слоя (для иных расчетных схем метод не применим),

- жесткость смежных слоев, не воспринимающих растягивающие напряжения, должна отличаться не менее чем в 1,5 раза (по экономическим соображениям), и не более чем в 3,5 раза. Численная реализация точного решения теории упругости для двухслойной системы [31, 43, 68] дала возможность сопоставить общие модули упругости (модули деформации) для различных соотношений $\frac{E_{\text{в}}}{E_{\text{н}}}$ и $\frac{h}{D}$, получаемых по этому решению, с общими модулями, полученными по методу СоюздорНИИ. Выяснилось, что значение общего модуля деформации $E_{\text{общ}}$ начинает отличаться уже при соотношении

модулей упругости системы более 3,5. Поэтому был сделан вывод, что при $\frac{E_B}{E_H} > 3,5$ в напряженно-деформированном состоянии системы начинает играть важную роль растягивающие напряжения и при этом в дискретных материалах возможны местные сдвиги, приводящие к понижению общего модуля упругости (модуля деформации).

Этот метод имел несомненные преимущества перед существовавшими в то время зарубежными методами расчета благодаря тому, что был четко сформулирован критерий предельного состояния дорожной одежды. Метод дал возможность учитывать особенности местных природных условий, вводя в расчеты дифференцированные значения модулей деформации грунтов и материалов. Учитывался также состав и интенсивность движения по дороге. За счет изменения в формуле (13) значений относительного прогиба λ было возможно проектировать дорожные одежды с различными степенями капитальности.

Тем не менее в ряде случаев расчет по методу СоюздорНИИ давал неудовлетворительные результаты. Данный факт, прежде всего, объясняется:

- несовершенством определения численных значений расчетных параметров и характеристик,
- ограниченностью применения самой расчетной схемы и учетом лишь одного критерия прочности дорожной одежды (допустимой деформации).

Кроме того, данный метод встречал большие возражения в связи с принятием за предельные деформации условных величин, получаемых при длительном нагружении с усилием, значительно превышающим нагрузки от колес расчетных автомобилей. Для практической проверки прочности дорожных одежд по методу СоюздорНИИ требуются прессы, позволяющие передать нагрузку на штамп до 20 тонн, в противном случае необходима экстраполяция кривой зависимости деформации конструкции от нагрузки, что, безусловно, приведет к ошибочным данным, тем большим, чем ниже нагрузка,

развиваемая прессом. Величина предельной (критической) деформации соответствует разрушению дорожной одежды и в зависимости от типа покрытия может составлять от 1 до 2 см.

В последующие годы стало очевидным, что одежды с покрытиями капитального типа на дорогах высших категорий, к которым предъявляются высокие требования в отношении ровности и долговечности должны проектироваться таким образом, чтобы в слабосвязных слоях и земляном полотне не возникали остаточные деформации под действием эксплуатационных нагрузок. В связи с этим введен новый критерий, позволяющий исключить сдвиг в грунтовых основаниях и слоях из слабосвязных материалов (метод разработан в Ленинградском филиале СоюздорНИИ под руководством Кривисского А.М.) [50, 48]. Основными расчетными показателями являются: сопротивление сдвигу грунта земляного полотна и малосвязных конструктивных слоев дорожной одежды и предельное растягивающее напряжение при изгибе в монолитных слоях.

Исследования, проведенные А.М. Кривисским [50], показали, что дорожная одежда работает под действием повторных нагрузок в стадии обратимых деформаций, если ни в одном из элементов конструкции не достигается местное предельное равновесие по сдвигу. В противном случае конструкция переходит из упругой стадии работы в упругопластическую стадию, и на поверхности покрытия начинают накапливаться остаточные деформации, вызванные пластическими смещениями в толще дорожной конструкции. Поэтому в качестве критерия предельного состояния при расчете дорожных одежд принимается достижение местного предельного равновесия по сдвигу в подстилающем грунте или в материале одного из конструктивных слоев дорожной одежды. В этом заключается первая особенность данного метода расчета.

Вторая особенность заключается в использовании при оценке напряженно-деформированного состояния дорожной конструкции решений задачи теории упругости для слоистого полупространства.

То обстоятельство, что за критерий предельного состояния дорожной одежды принимается реальное физическое явление – достижение местного предельного равновесия по сдвигу, а при оценке НДС конструкции используется решение задачи о напряжениях и деформациях слоистого упругого полупространства, значительно повышает роль теории в обосновании проектных решений и позволяет более точно учесть влияние различных факторов на работу конструкции.

При расчете по критерию сдвигоустойчивости грунта используется теория наибольших касательных напряжений. Основной формой нарушения сплошности грунтов под действием внешних нагрузок является сдвиг. Предельное состояние по прочности в какой-либо точке массива наступает, когда касательное напряжение, действующее по площадкам скольжения, достигает величины сопротивления грунта сдвигу. Исходя из этого в качестве условия прочности в грунтах принимается условие предельного равновесия при сдвиге. К грунтам, работающим, как правило, в условиях сжатия применена теория прочности Мора. Условие прочности исходя из теории Мора имеет вид, представленный в формуле (7):

$$|\tau_n| = f(\sigma_n) \quad (7)$$

где τ_n — касательное напряжение на площадке скольжения,
 σ_n — нормальное напряжение на площадке скольжения.

В настоящее время считается допустимым для практических расчетов принимать в соответствии с законом Кулона, что сопротивление сдвигу растет пропорционально увеличению нормального давления по формуле (8):

$$|\tau_n| = c + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi \quad (8)$$

где c — сцепление,

φ — угол внутреннего трения.

Условие предельного равновесия в точке при плоском напряженном состоянии представлено в формуле (9):

$$\frac{1}{2 \cdot \cos \varphi} [(\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 + \sigma_3) \cdot \sin \varphi] = \max[|\tau_n| - \sigma_n \operatorname{tg} \varphi], \quad (9)$$

где σ_1, σ_3 - главные максимальные и минимальные напряжения, которые определяются из решений теории упругости для многослойных сред.

Левая часть формулы (9) является максимальным активным напряжением сдвига $\tau_{a \text{ м}}$.

Расчетную величину активного напряжения сдвига в нижнем слое от собственного веса дорожной одежды $\tau_{a \text{ в}}$ вычисляется по формуле (10):

$$\tau_{a \text{ в}} = \frac{\gamma h}{2 \cos \varphi} [1 - \varepsilon - (1 + \varepsilon) \sin \varphi] \quad (10)$$

где h — толщина конструкции над расчетной точкой,
 γ — средний объемный вес материалов дорожной одежды над расчетной точкой,
 ε — коэффициент бокового давления в материале нижнего слоя, равный $\frac{\nu_2}{1 - \nu_2}$.

Предельное равновесие не возникнет, если максимальное активное напряжение сдвига не превысит величины сцепления в соответствии с формулой (11):

$$\tau_{a \text{ max}} = \tau_{a \text{ м}} + \tau_{a \text{ в}} \leq K c \quad (11)$$

где K — комплексный коэффициент.

Эффективность данного критерия подтверждена многими экспериментами, а также данными учета опыта службы дорог в эксплуатации.

1.1.2 В 1952 году в Ленфилиале СоюздорНИИ под руководством М.Б. Корсунского на основе теории изгиба плит на упругом основании (решения Р.М. Раппопорт, развитого К.К. Туроверовым для многослойного полупространства) был разработан метод расчета дорожных одежд по предельному растягивающему напряжению при изгибе (предельному относительному удлинению) в монолитных слоях. В качестве расчетной схемы использовалась модель слоистого упругоизотропного полупространства. Фактические напряжения в слоях дорожной одежды определяются на основе решений теории упругости для двухслойных и трехслойных полупространств, нагруженных осесимметричной нагрузкой, равномерно приложенной по поверхности круга [43]. При этом двухслойная модель используется для расчета растягивающих напряжений в слоях покрытия, а трехслойная модель – в промежуточном слое основания.

Предельным состоянием монолитных материалов, которые должны работать в стадии обратимых деформаций, является начальная стадия изменения структуры материала, когда нарушаются отдельные связи под действием растягивающих напряжений.

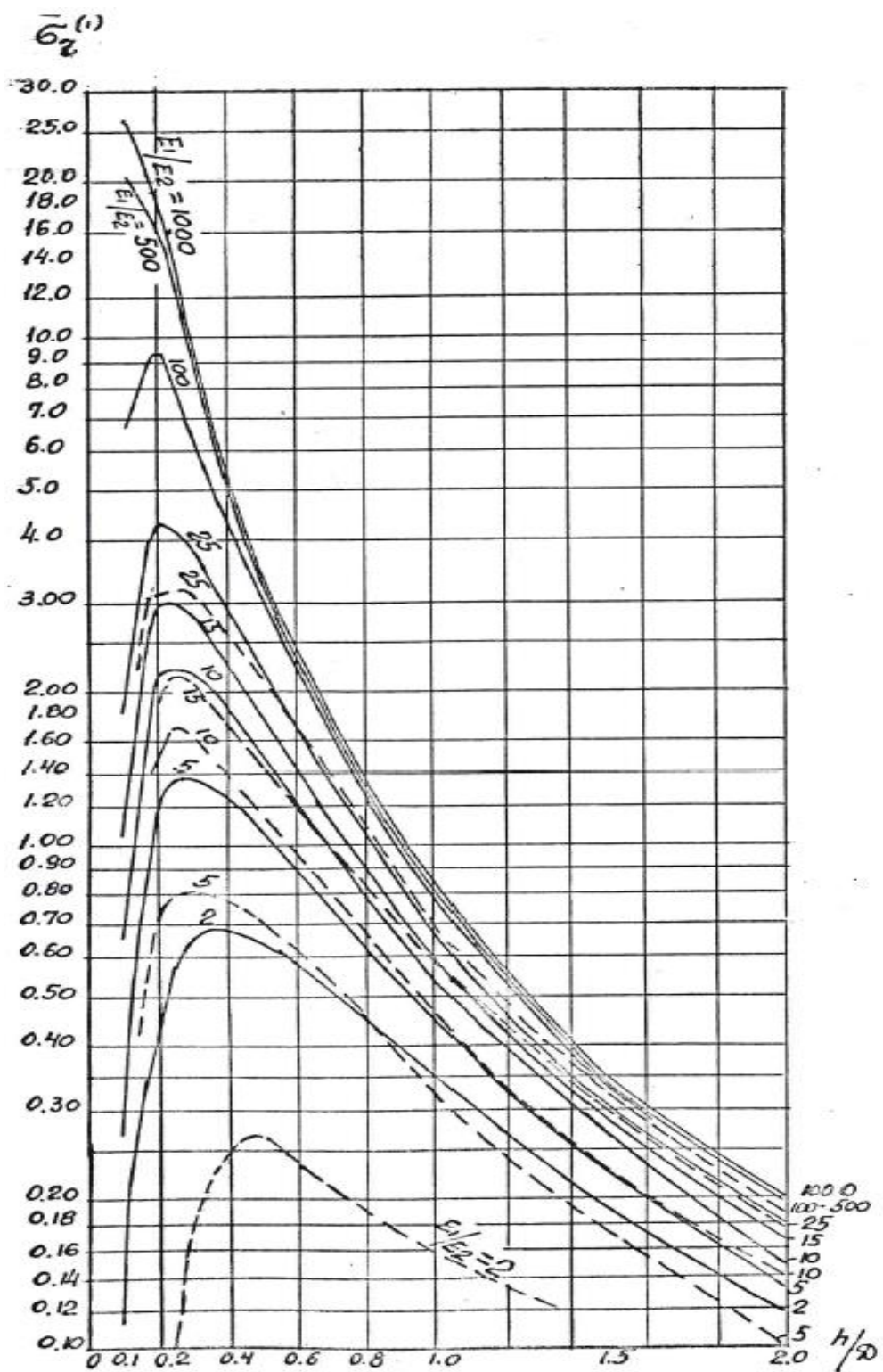
Расчет слоев из монолитных материалов сводится к удовлетворению неравенств (12) и (13):

$$\sigma_r \leq R_{\text{изг}} \quad (12)$$

или

$$\varepsilon \leq \varepsilon_{\text{пр}} \quad (13)$$

где	σ_r	–	расчетное наибольшее растягивающее
(ε)			напряжение (относительное удлинение) в
			подошве расчетного слоя, МПа,
	$R_{\text{изг}}$	–	допустимое растягивающее
(ε _{пр})			напряжение (относительное удлинение) при
			изгибе для материала слоя с учетом
			усталостных явлений, МПа.



сплошная линия – при свободном перемещении слоев на границе раздела;

пунктирная линия – при совместном неразрывном перемещении слоев на границе раздела

Рисунок 2 - График, показывающий влияние условий на контакте на наибольшие растягивающие напряжения в верхнем слое двухслойной системы

Необходимо отметить, что А.М. Кривисский и М.Б. Корсунский – авторы двух вышеуказанных критериев прочности указывают на влияние условий

сопряжения слоев на контактах (спаянные или гладкие) на возникающие в слоях напряжения и деформации.

М.Б. Корсунский показал, что условия на контакте практически не влияют на величины вертикальной составляющей напряжения (σ_z) и перемещения (U_z). Однако они сильно влияют на величины σ_r и σ_θ и тем более τ_{rz} , равном нулю по всей поверхности гладкого контакта. По данным М.Б. Корсунского (рисунок 2), максимальные растягивающие напряжения $\max \sigma_r$ в монолитных покрытиях нежестких дорожных одежд при $\frac{h_1}{D} < 0,6 \dots 1,0$ при прочих равных условиях всегда больше при свободном взаимном перемещении слоев (гладкий контакт), чем при спаянном контакте. В промежуточных же монолитных слоях $\frac{h_1+h_2}{D} > 0,6 \dots 1,0$ величины $\max \sigma_r$ больше при невозможности взаимного перемещения слоев на контакте (спаянные слои).

Для расчета активных напряжений сдвига, возникающих в нижнем слое двухслойной системы по методу А.М. Кривисского, при содействии П.И. Теляева [68] и А.Г. Булавко предложение по точному решению Б.И. Когана для двухслойной системы было доведено до численных значений. В результате были предложены две номограммы: для случая совместного смещения слоев на контакте и свободного смещения. Отмечено, что в реальных дорожных одеждах напряжения имеют промежуточные значения между вычисленными по этим номограммам. Когда дорожная одежда подстилается связными грунтами (суглинистыми, супесчаными), фактические напряжения ближе к вычисленным к вычисленным при совместном смещении слоев, а при слабосвязных грунтах (песчаных и подобных им грунтах и материалах) напряжения ближе к вычисленным при свободном смещении слоев на контакте.

Как уже отмечалось выше, дорожные одежды капитального, облегченного и в ряде случаев переходного типов, как правило, работают в упругой стадии. При этом деформации измеряются миллиметрами и долями

миллиметра. На этом основании МАДИ удалось разработать натурный метод оценки прочности дорожных одежд путем измерения упругих деформаций в период наибольшего увлажнения, а также связать его с теоретическим обоснованием для расчета по упругим деформациям, установив зависимость допускаемого упругого прогиба от типа покрытия, нагрузок и состава движения.

Основные положения метода расчета нежестких одежд по величине упругого прогиба (МАДИ):

- расчет одежды производится исходя из предельно допускаемой величины вертикальной обратимой (упругой) деформации,
- распределение и величина деформаций в одежде и земляном полотне принимается по формулам и уравнениям, полученным Б.И. Коганом для упругой двухслойной системы, на поверхность которого действует вертикальная нагрузка, распределенная по площади круга,
- деформации грунта земляного полотна и дорожной одежды под воздействием внешних нагрузок оцениваются их модулями упругости,
- требуемый общий модуль упругости дорожной одежды определяется из формулы (14):

-

$$E_{\text{тр}} = \frac{pD}{l_{\text{доп}}} \quad (14)$$

где p — удельное давление колеса на поверхность дороги, кгс/см²,
 $l_{\text{доп}}$ — допускаемая упругая деформация, см.

Величина $E_{\text{тр}}$ назначают в зависимости от типа покрытия дорожной одежды, категории дороги, коэффициента надежности, принятой расчетной нагрузки, интенсивности движения и допускаемого прогиба.

В общем случае упругий нормативный прогиб (l) для двухслойной конструкции определяется следующей зависимостью:

$$l = f\left(\frac{h}{D}; \frac{E_B}{E_H}\right) \quad (15)$$

где h — толщина верхнего слоя (покрытия) дорожной одежды,
 D — диаметр круга, равновеликого по площади отпечатку пневматика,
 E_B — модуль упругости верхнего слоя дорожной одежды,
 E_H — модуль упругости нижнего слоя дорожной одежды.

В методе ХАДИ тесно связаны такие процессы как расчет дорожной одежды на прочность и ее конструирование. В нем предусматривается «активное» конструирование, направленное на совершенно определенное расположение слоев в конструкции [48]. Автор метода А.К. Бируля считает, что правильно запроектированной конструкцией можно считать такую, в которой прочность отдельных слоев соответствует действующим напряжениям, и эпюра модулей слоев по глубине соответствовала эпюре вертикальных напряжений сжатия под точкой приложения силы. Метод ХАДИ разработан применительно к дорожным одеждам только I-III технических категорий для районов недостаточного увлажнения (IV и V дорожно-климатические зоны) и участков с I и II типами местности по увлажнению.

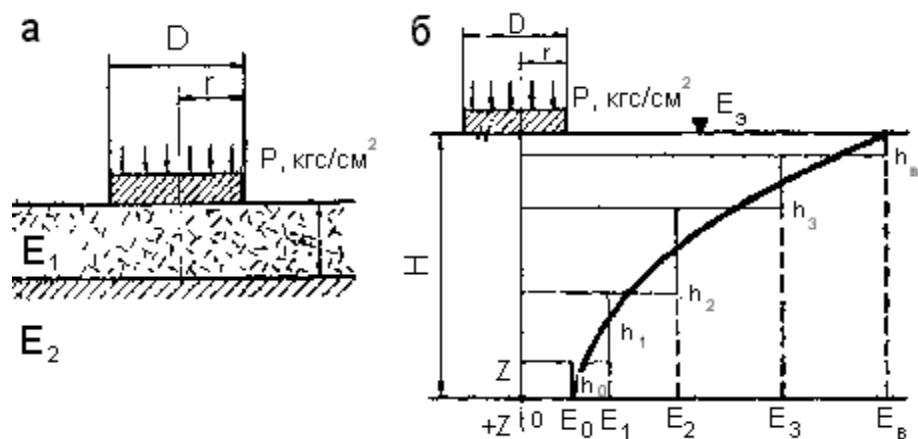
Основные положения этого метода:

1) Дорожные одежды с усовершенствованными покрытиями капитального типа должны работать в упругой стадии, т.е. без образования и накопления остаточных деформаций (подход МАДИ). Показателем прочности дорожной одежды по деформациям является эквивалентный модуль упругости, характеризующей общую жесткость одежды,

2) Конструированию и расчету подвергается дорожная конструкция (дорожная одежда + земляное полотно), причем слои одежды по своим деформационным характеристикам должны переходить плавно к деформационным характеристикам слоев земляного полотна (рисунок 10 б),

3) Для создания равнопрочной по глубине конструкции, наиболее рационально использующей прочность материалов слоев, слои многослойной системы следует располагать в соответствии с действующими напряжениями. Так как напряжения убывают с глубиной, то и слои необходимо располагать с плавным убыванием их деформативных характеристик (рисунок 10 б). Толщина слоев назначается практически в соответствии с технологическими и экономическими соображениями и наличием материалов,

4) В основу расчета положено решение теории упругости в системе с закономерно убывающим по глубине модулем упругости, предложенное Б.И. Коганом, согласно расчетной схеме (рисунок 3а) [48].



а) двухслойная система, б) многослойная система (число слоев более двух)

Рисунок 3 - Расчетные схемы нежестких дорожных одежд (метод ХАДИ)

Задача о напряженно-деформированном состоянии такой системы решена с применением функции напряжения и представлением функции распределения нормальной нагрузки на поверхности верхнего слоя при помощи интеграла Фурье - Бесселя. Каждый из слоев характеризуется толщиной h , модулем упругости E и коэффициентом Пуассона ν .

Для определения осадки многослойной системы расчетная схема многослойной дорожной одежды построена по закону плавного убывания модулей упругости сверху вниз (рисунок 3 б). Причем для известных величин модулей упругости верхнего слоя и грунтового основания ($E_{\max}$ и $E_{\min}$),

толщины конструкции и глубины слоя Z , выражение для закона построения эпюры принято согласно формулам (16) и (17):

$$E_z = E_{\min} e^{bz} = E_{\min} e^{\frac{z}{h} \lg \frac{E_{\max}}{E_{\min}}} \quad (16)$$

$$\frac{E_z}{E_0} = \left(\frac{E_B}{E_0} \right)^{-\frac{z}{h}} \quad (17)$$

Для расчета дорожных одежд данным методом предложены номограммы.

Особый интерес представляют расчетные зависимости для определения общего прогиба дорожной одежды по схеме «скачок» (рисунок 1в), которые были получены в ХАДИ под руководством проф. Я.А. Калужского. В отличие от А.К. Бируля отмечается возможность и целесообразность применения дорожных одежд с немонотонным изменением модулей упругости (линзообразное или в виде «скачка») [6]. Получено точное решение теории упругости для разработки аппроксимирующего его решения, разработаны соответствующая номограмма и метод расчета дорожных одежд по указанной схеме.

При проверке сдвигающих напряжений в грунтовом основании и растягивающих напряжений в монолитных слоях используются решения Плевако В.П. и Медведовской Н.А. При этом утверждается, что такие конструкции, встречающиеся часто при усилении старых дорожных одежд, позволяют добиться более интенсивного падения значений всех компонентов тензора напряжений слоистой системы.

Исследования, проведенные в ХАДИ, а также работы других ученых свидетельствуют о том, что наличие «жестких прослоек» существенно изменяет напряженно-деформированное состояние слоистой системы и

перераспределение напряжений создает благоприятные условия для работы всех слоев.

Решение задачи о НДС слоистой системы с «жесткой прослойкой» (рисунок 8 г) впервые было разработано Калужским Я.А. и Плевако В.П. Путем аппроксимации точных решений теории упругости многочленом второй степени была получена расчетная номограмма для определения общего модуля упругости слоистой системы.

Плевако В.П., рассматривая дорожную одежду как слоистую плиту на упругом полупространстве, вывел упрощенные зависимости для решения НДС системы со схемой «жесткая прослойка» (рисунок 8 г). Приближенная теория обеспечивает высокую точность в том случае, когда модуль упругости нижнего слоя слоистой системы более чем в два раза превышает модуль полупространства.

На базе предложенного В.П. Плевако решения был разработан метод расчета дорожных одежд с «жесткими прослойками».

Эта точка зрения развивалась О.Ф. Никитиным [56]. В его работах экспериментально показано, что введение в грунтовое полупространство тонких более жестких прослоек, например, из цементогрунта, уменьшает деформативность системы.

Именно на основе методов МАДИ и Ленинградского филиала СоюздорНИИ в нашей стране были разработаны практические методы расчета нежестких дорожных одежд.

Величину минимального требуемого общего модуля упругости вычисляют эмпирическим методом в зависимости от суммарного расчетного числа приложений нагрузки за срок службы дорожной одежды. Суммарное расчетное число приложений нагрузки к точке на поверхности конструкции рассчитывается с учетом интенсивности движения, состава транспортного потока, коэффициентов приведения к расчетной нагрузке, количества расчетных дней в году, соответствующих определенному состоянию деформированности конструкции и ряда дополнительных коэффициентов.

Общий расчетный модуль упругости определяется при помощи номограмм, основанных на теории упругости для модели многослойной среды. При проведении расчетов и использовании номограмм, необходимо использовать расчетные значения модулей упругости для различных видов грунтов и дорожно-строительных материалов, из которых возводят конструктивные слои нежестких дорожных одежд.

Расчет конструкции на прочность на сопротивление монолитных слоев усталостному разрушению на растяжение при изгибе заключается в определении отношения прочности материала слоя на растяжение при изгибе с учетом усталостных явлений к наибольшему расчетному растягивающему напряжению в рассматриваемом слое. При расчетах используются значения модулей упругости материалов и слоев на растяжение при изгибе.

Расчет конструкции по условию сдвигоустойчивости подстилающего грунта и песчаных слоев заключается в определении отношения предельной величины активного напряжения сдвига, превышение которой вызывает нарушение прочности на сдвиг, к расчетному активному напряжению сдвига. При проведении расчета так же учитываются значения модулей упругости материалов и конструктивных слоев.

Отличительной особенностью подхода к расчету на прочность в отечественном методе является использование фундаментальных теоретических представлений классических теорий сопротивления материалов, механики грунтов, реологии, теории усталости и длительной прочности. В соответствии с этим расчет строится на использовании теоретически обоснованных параметров: сцепления, угла внутреннего трения, модуля упругости, прочности на растяжение при изгибе и т.п. Это принципиально отличает отечественный метод от большинства зарубежных, где в качестве прочностной характеристики грунта и материалов часто используется весьма условный параметр — калифорнийское число несущей способности (CBR).

По мнению ученых [72] в нормативном документе ОДН 218.046-01 [59] сделана попытка преобразования расчета дорожной одежды по допустимому напряжению при изгибе в монолитных слоях в расчет монолитных слоев на усталостное сопротивление с учетом количества приложений транспортной нагрузки за срок службы. Критерий расчета на сопротивление монолитных слоев усталостному разрушению от растяжения при изгибе обеспечивается при выполнении условия:

$$\sigma_r < \frac{R_N}{K_{\text{пр}}^{\text{тр}}}$$

где $K_{\text{пр}}^{\text{тр}}$ – требуемый коэффициент прочности с учетом заданного уровня надежности;

R_N – прочность материала слоя на растяжение при изгибе с учетом усталостных явлений;

σ_r – наибольшее растягивающее напряжение в рассматриваемом слое, устанавливаемое расчетом.

Наибольшее растягивающее напряжение при изгибе в монолитном слое предложено определять на основе расчетов двухслойной модели при действии расчетной нагрузки. Модули упругости асфальтобетона принимают при расчетной низкой весенней температуре.

При этом в последние годы интерес к развитию отечественных методов расчета дорожных одежд и анализа их напряженно-деформированного состояния проявляется в трудах многих специалистов-дорожников [28, 51, 60, 73, 74, 86, 88, 99, 102, 115]. Нужно отметить, что основная направленность этих работ связана с учетом механических и физико-механических свойств материалов конструктивных слоев, а также применении современных математических моделей и методов, отражающих сложные вязкоупругие и вязкопластические свойства асфальтобетонных смесей.

1.2 Обзор методов расчета и проектирования нежестких дорожных одежд, применяемые зарубежом.

Методы расчета нежестких дорожных одежд, применяемые зарубежом, хотя по своему существу и отличаются друг от друга, но их можно объединить в четыре основные группы.

1.2.1 Группа А - эмпирические методы, не использующие результатов предварительных испытаний грунтов.

В этих методах толщина дорожной одежды определяется на основе опыта эксплуатации дорог при аналогичном составе и интенсивности движения, одинаковых грунтах, классифицированных по гранулометрическому составу, значениям предела текучести и числа пластичности. В основе этих методов лежит положение, что толщина дорожной одежды и ее прочность могут быть определены на основании данных о разновидности грунта, его влажности, степени уплотнения. Наиболее типичным из этой группы является метод групповых показателей (метод Стила), предложенный дорожно-исследовательским бюро США. Этот метод основывается на условном показателе несущей способности грунта (групповом индексе), вычисляемом по эмпирической формуле, с учетом границы текучести и числа пластичности грунта, а также содержания в нем частиц размером менее 0,075 мм. Толщина одежды назначается в зависимости от величины группового индекса подстилающего грунта по графику, на котором имеется ряд полученных из опыта кривых для различной интенсивности движения грузовых автомобилей.

Следует отметить, что данный метод расчета является приближенным, и поскольку при проектировании в результаты расчета вводятся необходимые уточнения в соответствии с данными опыта и конкретными условиями, применять его могут только опытные специалисты.

1.2.2 Группа Б - эмпирические методы, учитывающие данные испытаний грунтов.

К числу таких испытаний относятся методы пробных нагрузок, позволяющие определить сопротивление грунтов вдавливанию штампов. Показатели испытаний используются для назначения толщины дорожной одежды по аналогии с одеждами, ранее построенными на подобных грунтах. В США и других странах прочность грунта характеризуется числом CBR (несущая способность по калифорнийскому числу). Число CBR представляет собой усилие, необходимое для вдавливания штампа диаметром 5 см со скоростью 1,25 мм/мин на глубину 2,5 мм в образец грунта или другого дорожно-строительного материала, помещенного в цилиндр высотой 20 см и диаметром 20 см, выраженное в процентах от усилия, требуемого для погружения такого же штампа в уплотненный мелкий щебень на ту же глубину. Прочность щебня принимается равной 70 кгс/см². Модуль деформации щебня, кгс/см², при этом рассчитывается по формуле (18):

$$E = \frac{P \cdot D}{l} \quad (18)$$

Испытуемый грунт предварительно в течение четырех суток капиллярно насыщают снизу водой (в ряде стран изменен способ увлажнения грунта применительно к своим климатическим и гидрогеологическим условиям). Срок пребывания образца в воде выбран из предположения, что большая часть грунтов за этот срок приближается к полному насыщению на глубину активной зоны.

На протяжении многих лет сотрудники французской Центральной лаборатории мостов и дорог испытывали более 1000 образцов грунта и пришли к выводу, что показатель CBR характеризует только грунт, уплотненный до 95 % по видоизмененному методу Проктора (примерно 104 % по стандартному уплотнению) [81, 3]. Причем, как считают французские специалисты, для значений CBR до 20 его можно вычислить по пределам текучести и пластичности грунта по формуле (19):

$$CBR = \frac{4250}{(LL \cdot IP)} \quad (19)$$

где LL – предел текучести грунта,

IP – число пластичности грунта.

Калифорнийский метод предложен для расчета нежестких дорожных одежд. Однако его иногда используют и для расчета цементобетонных покрытий.

Общую толщину одежды определяют в зависимости от величины CBR подстилающего грунта по графику, на котором нанесены полученные экспериментальным путем кривые для различных расчетных нагрузок на колесо. Пользуясь тем же графиком в пределах полученной общей толщины, назначают толщину отдельных слоев из разных материалов, исходя из значений CBR материала, подстилающего каждый слой.

Канадский метод разработан в Министерстве транспорта Канады под руководством Н. Мак Леода [30]. Сопротивление грунта нагрузкам определяется испытаниями, проводимыми в полевых условиях штампом диаметром около 30 см. В качестве расчетной характеристики грунтов принимается нагрузка, вызывающая после определенного числа ее воздействий, деформацию, равную 9 мм. Необходимую толщину одежды вычисляют по эмпирической формуле, в которую входят: показатель несущей способности грунта основания, нагрузка на колесо расчетного автомобиля и, кроме того, коэффициент, зависящий от свойств материала, используемого для возведения дорожной одежды.

Метод расчета дорожных одежд, основанный на результатах испытания грунта в стабилометре, разработан Хвимом в Дорожном управлении штата Калифорния [56]. Образец грунта, предварительно уплотненный многократными приложениями нагрузки, помещают в камеру прибора для трехосного сжатия. По измеренной величине бокового давления и изменению объема образца под действием вертикального давления, равного 11,2 кгс/см²

вычисляют условный показатель несущей способности – так называемый показатель сопротивления, в зависимости от величины которого по эмпирической формуле устанавливают необходимую толщину дорожной одежды. При расчете толщины одежды наряду с величиной расчетной нагрузки учитывают также интенсивность движения, вводя в формулу коэффициент, пропорциональный логарифму числа автомобилей, проходящих по дороге за 10 лет. Предложены коэффициенты для приведения автомобилей разных марок к расчетному автомобилю.

Метод Шук и Финн (Бюро общественных дорог, США) [30] основан на анализе экспериментов AASHO. В зависимости от величины CBR и суммарного числа прохода расчетных автомобилей определяется величина приведенной толщины $H_{пр}$ дорожной одежды (рисунок 4). Толщину конструктивных слоев, $H_{пр}$, см, устанавливают по формуле (20):

$$H_{пр} = a_1 h_1 + a_2 h_2 + a_3 h_3 \quad (20)$$

где a_1, a_2, a_3 – Безразмерные эмпирические коэффициенты, отражающие прочностные свойства покрытия, верхнего и нижнего слоев основания ($a_1=2, a_2=1, a_3=0,75$);

h_1, h_2, h_3 – толщины покрытия, верхнего и нижнего слоев основания.

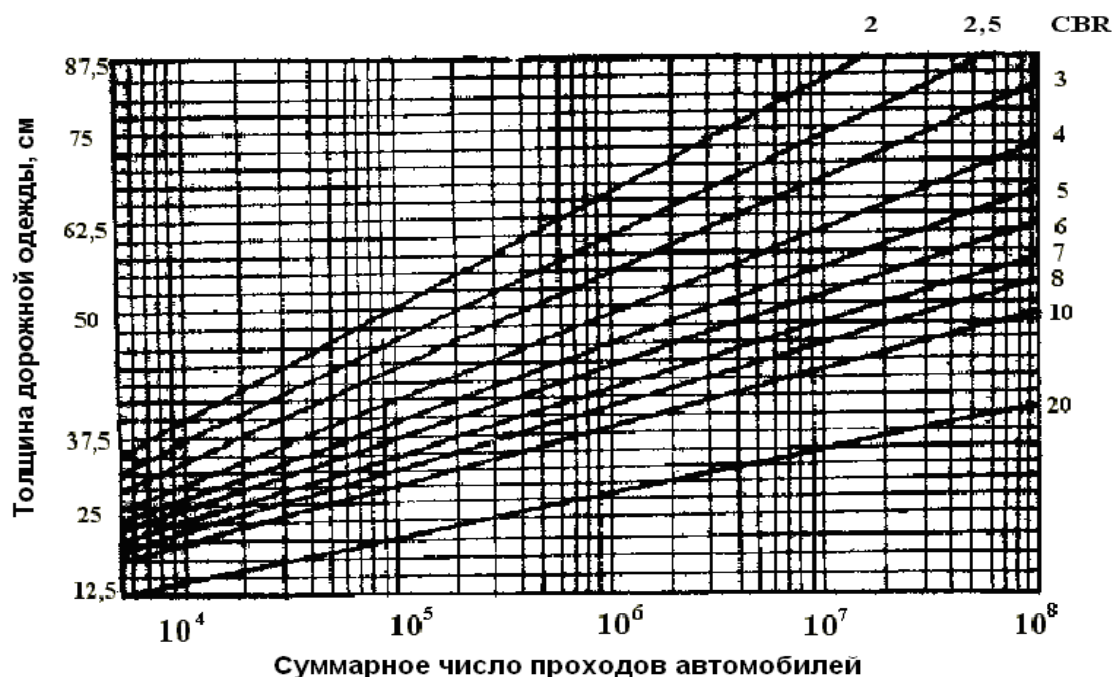


Рисунок 4 – График для расчета толщины дорожной одежды по методу Шук и Финн

Метод Лидл (Асфальтовый институт, США) [30] предусматривает определение приведенной толщины одежды по той же формуле (3). Коэффициенты a_1, a_2, a_3 и их соотношения различны в зависимости от того, что принимается в основу определения качества покрытия – состояние покрытия (трещины, выбоины и т.п.) или определенный прогиб под колесом расчетного автомобиля. Величину $N_{пр}$ устанавливают в зависимости от суточной интенсивности движения при нагрузке 8,2 т на расчетную ось. Сначала находят предварительное значение $N_{пр}$, затем – уточненное (учитываются климатические условия).

Метод Асфальтового института (США) обосновывается экспериментами AASHO и опытами Асфальтового института. В этом методе рассчитывают общую толщину дорожной одежды с некоторыми поправками для слоев, обработанных вяжущими материалами.

Последовательность расчета:

- среднесуточное движение автомобилей приводят к расчетному автомобилю с нагрузкой на ось 8,2 т. Причем интенсивность движения приводят к одной наиболее нагруженной полосе. Увеличение интенсивности

движения за срок службы учитывается повышающими коэффициентами,

– определяют толщину дорожной одежды (H) при условии, что все слои обработаны органическими вяжущими. Если предполагается применение необработанных слоев, то для верхнего слоя искусственного основания применяют коэффициент 2, а для нижнего – 2,7. Авторы полагают, что их метод содержит элементы теории, хотя, по существу, он чисто эмпирический.

В методе дорожной исследовательской лаборатории (Англия) толщину дорожной одежды назначают по эмпирическим данным, основываясь, в частности, на определении показателя CBR. Однако считают необходимым учитывать также напряжения в отдельных слоях и величину упругих деформаций всей конструкции. В отдельных случаях принимают во внимание возможность возникновения предельных растягивающих напряжений в слоях, обработанных вяжущими материалами.

Для определения модулей упругости материалов дорожно-исследовательская лаборатория разработала методы, основанные на измерении скорости распространения волн в различных материалах при разных частотах колебаний. Это позволило решить ряд задач, в том числе установить разницу в воздействии на дорожную одежду статической и динамической нагрузки.

1.2.3 Группа В – методы, базирующиеся на теоретических исследованиях и экспериментальных данных.

Основные зависимости между нагрузкой и деформацией подстилающего грунта, а иногда и материалов несущих слоев определяют штамповыми испытаниями или испытаниями на сдвиг. Результаты исследований используют в формулах упрощенной или видоизмененной теории распределения напряжений. В этих методах вводят известные допущения и пренебрегают некоторыми факторами, при этом получают упрощенные аналитические выражения, удобные для практического использования. Например, во многих методах этой группы толщину дорожной

одежды определяют исходя из того, что давление от колеса распространяется через основание под постоянным углом 45° и равномерно распределяется по поверхности подстилающего грунта. Одними из типичных методов этой группы являются методы, основывающиеся на решении Буссинеска о распределении напряжений в упругом полупространстве [80]. При расчетах по этим методам исходят из предпосылки, что грунт земляного полотна, основание дорожной одежды и покрытие являются бесконечным полупространством, обладающим свойствами упругого изотропного тела, и давление от колеса приложено к круговой площадке, равновеликой площади контакта колеса с покрытием. Упругое вертикальное смещение точки, расположенной на поверхности покрытия под центром приложенной нагрузки, определяется по формуле Буссинеска.

Метод инженерного корпуса (США) основан на опытах, проведенных специалистами инженерного корпуса и теоретических соображениях, полученных независимо от экспериментов AASHO [30]. Общая толщина дорожной одежды, лежащей на грунте с тем или иным показателем CBR, определяется по формуле (21):

$$H_0 = P \left[\frac{1}{8,1 \cdot \text{CBR}} - \frac{1}{q \cdot \pi} \right] \quad (21)$$

где P — нагрузка на колесо;

q — давление воздуха в пневматике транспортного средства.

Если число повторений нагрузок в сутки больше 5000, то толщина дорожной одежды определяется по формуле (22):

$$H = H_0 (0,177 + 0,223 \lg N) \quad (22)$$

К этой группе методов можно отнести и расчет дорожных одежд

жесткого типа, предложенный Уэстергардом [56].

Необходимо отметить, что в перечисленных и ряде других аналогичных методах расчета отсутствуют ясно выраженные критерии прочности. Для определения толщины дорожной одежды используются полученные из опыта эмпирические зависимости, связывающие величину допускаемой нагрузки на колесо, а также интенсивность движения с условными характеристиками подстилающего грунта. Поэтому удовлетворительные результаты применения этих методов возможны лишь в тех условиях, для которых действительны вышеуказанные связи, установленные экспериментально.

Основным недостатком вышеуказанных методов расчета является отсутствие теоретически обоснованной связи между действующими на покрытие нагрузкой и физическим состоянием дорожной одежды. В результате становится практически невозможным оценить влияние на работу дорожных одежд таких параметров и факторов, как свойства и толщина материалов слоев, условия передачи нагрузки на покрытие, например, величина напряжений, площадь передачи нагрузки колеса на покрытие и т.д. Предпринятые попытки учесть отдельные факторы путем введения в расчетные формулы различных эмпирических коэффициентов не в состоянии охватить все многообразие возможных случаев, при этом они действительны лишь только в условиях, для которых получены из опыта.

1.2.4 Группа Г - методы, основанные на математическом анализе напряжений и деформаций дорожной одежды и грунтового основания.

В последнее время за рубежом наметился переход от эмпирических к механико-эмпирическим методам проектирования нежестких дорожных одежд. Основным в этой группе методов является метод расчета, предложенный Д. Бурмистером [81]. Он произвел анализ напряжений и деформаций в двухслойной системе, состоящей из упругой бесконечной плиты, расположенной на упругом полупространстве, имеющем меньший модуль упругости, чем плита. На плиту передается нагрузка, равномерно распределенная по площади круга. Д. Бурмистер установил зависимость для

определения вертикальной осадки под центром приложенной нагрузки для двух случаев: при отсутствии трения между слоями и при весьма шероховатых поверхностях контакта плиты и основания, препятствующих взаимным смещениям. Величина смещения поверхности (S) двухслойной системы вычисляется по формуле (23):

$$S = F_m \frac{1,5 \cdot P \cdot r}{E_z} \quad (23)$$

где P — величина равномерно распределенной нагрузки, кгс/см²,
 r — радиус окружности, которая соответствует отпечатку пневматика, см,
 E_z — модуль деформации нижнего слоя, кгс/см²,
 F_m — коэффициент осадки, определяемый по графикам.

Автором метода предложены графики для определения коэффициентов осадки (F_m) для различных соотношений модулей деформации верхнего и нижнего слоев и разных толщинах верхнего слоя.

В 1941 г. Д. Бурмистер (США) предложил метод расчета, базирующийся на решениях теории упругости для двухслойного упругого полупространства. В качестве критерия прочности принят допускаемый упругий прогиб на поверхности покрытия [23, 82].

Метод, разработанный нефтяной компанией «Шелл» (авторы Дормон и Эдвардс) [30], основан на опытных данных AASHO. Одновременно учитываются теоретические разработки Джонса о работе многослойной системы. Для упрощения многослойная система приводится к трехслойной: первый слой, материалы которого обработаны органическими вяжущими, второй слой — из дискретных материалов и третий слой — грунт земляного полотна. Грунт характеризуется модулем упругости или показателем CBR, первый слой — динамическим модулем упругости, слой основания — модулями упругости, отношения которых для смежных слоев должны быть не более 3-

4, причем модуль верхнего слоя должен превышать модуль нижнего слоя. Между модулем упругости и величиной CBR установлены соотношения, представленные в таблице 1:

Таблица 1 – Соотношения между модулем упругости и величиной CBR

CBR	< 4	от 4 до 40	>40
E	150 CBR	100 CBR	50 CBR

Расчет ведется по упругому допустимому прогибу, а также по допустимому относительному удлинению верхнего слоя с учетом коэффициента усталости от повторных нагрузок. Допустимый прогиб и допустимое удлинение устанавливают в зависимости от числа проходов расчетных автомобилей с нагрузкой на ось 10 т (рисунки 5 и 6).



Рисунок 5 – Допустимое удлинение асфальтобетона в зависимости от повторяемости нагрузки (модуль упругости асфальтобетона $E = 65000$ кгс/см²)

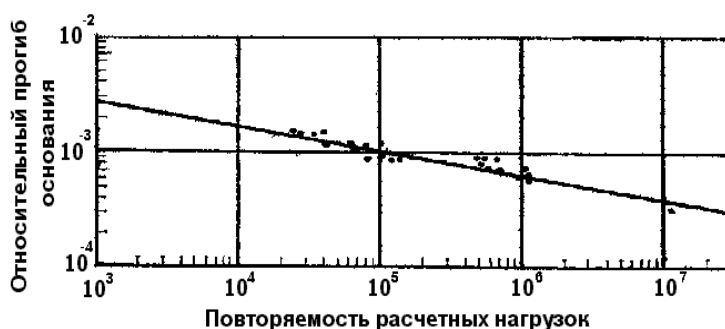


Рисунок 6 – Зависимость допустимого относительного прогиба от повторяемости нагрузки

Из данных графиков видно, что допустимые удлинения и прогибы уменьшаются примерно в 2 раза при увеличении движения в 10 раз.

Приведение различных типов автомобилей к расчетному с нагрузкой на ось 10 т выполняют по графику, представленному на рисунке 7.

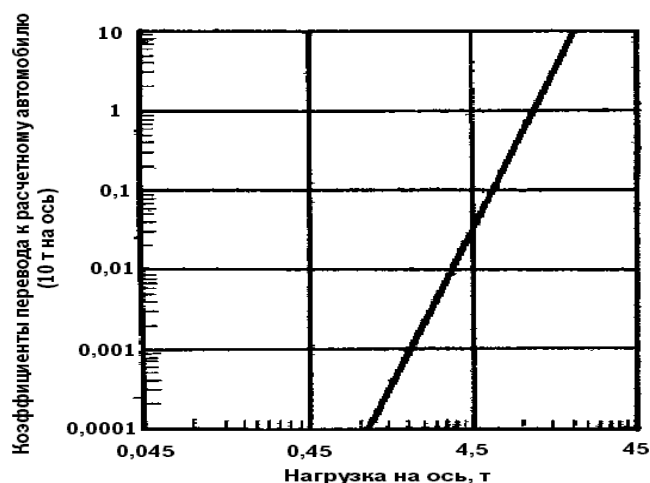


Рисунок 7 – График для приведения нагрузок к расчетной нагрузке (10 т на ось)

На основе изложенных предпосылок построена номограмма для определения толщины слоев, обработанных органическими вяжущими, и слоев основания при различных модулях упругости грунта земляного полотна и разных интенсивностях движения (рисунки 8 и 9). Данный метод положен в основу финских норм проектирования.



Рисунок 8 – График расчета толщины дорожной одежды по методу Шелл при различных модулях упругости грунта земляного полотна и суммарном движении по одной полосе $N = 10^7$ автомобилей



Рисунок 9 – График для расчета толщины дорожной одежды по методу Шелл для разной интенсивности движения по одной полосе при модуле упругости грунта земляного полотна $E = 320 \text{ кгс/см}^2$ ($CBR = 3$)

Рассмотренные графики дают возможность вести расчет по этапам. Как видно, этот метод аналогично другим методам расчета дает много возможных вариантов для выбора конструкции дорожной одежды.

В другом методе расчета дорожных одежд конструктивные слои, имеющие определенную толщину, заменяются эквивалентной толщиной слоя грунта основания (h_c) по формуле (24):

$$h_c = h \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{24}$$

где E_1 и E_2 - модули упругости слоев, МПа,

h_c и h - толщины слоев, см.

Вертикальное смещение u_z на глубине z от поверхности упругого полупространства под действием нагрузки, равномерно распределенной по площади круга, определяется формулой (25):

$$y_z = \frac{1,5 \cdot P \cdot Q^2}{E (R^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (25)$$

Для определения величины осадки двухслойной системы авторами метода предложена формула (26):

$$y = \frac{1,5 \cdot P \cdot R}{E_y} F_w \quad (26)$$

где F_w — коэффициент осадки, аналогичный коэффициенту осадки (F_w) в формуле Буссинеска.

В 2008 году в США разработано «Руководство по проектированию дорожных одежд на основе механико-эмпирического метода» [81], в котором напряженно-деформированное состояние конструкции оценивается по точному решению теории упругости для многослойной конструкции. Расчеты параметров напряженно-деформированного состояния конструкции выполняются с помощью специально разработанного программного комплекса. В методе увязаны между собой нагрузки, свойства материалов и толщины слоев дорожной одежды. Основным показателем является число проездов расчетных автомобилей с нагрузкой на ось, равной 82 кН за расчетный период эксплуатации. При проектировании дорожной одежды учитываются природно-климатические условия: влажность грунта и температура покрытия. Особенностью данного метода проектирования нежестких дорожных одежд является определение критериев эксплуатационных характеристик дорожной одежды на конец расчетного периода: колееобразование, усталостное трещинообразование, температурное трещинообразование, международный показатель ровности.

В большинстве штатов США, а также в Австрии, Бельгии, Франции, Италии и Германии при проектировании дорожных одежд толщины слоев и

требования к их материалам определяют по каталогам (альбомам типовых конструкций).

В германском каталоге RStO 12 [110] толщину покрытия предписано выбирать в зависимости от приведенной интенсивности движения расчетной нагрузки за 30-летний период, глубины промерзания, толщины морозозащитного слоя, вида и толщины основания, наличия укрепляющих прослоек и др. факторов. Германский каталог пересматривается и переиздается не реже, чем каждые 10 лет. Рассматривая германский каталог (рисунок 10), можно увидеть, что на уровне поверхности земляного полотна и на уровне поверхности дополнительного слоя основания дорожной одежды заданы общие модули подстилающей конструкции. Их значения зависят от модуля грунта земляного полотна, модуля и толщины слоя дополнительного основания, причем общий модуль определяется расчетным путем.

Использование альбомов типовых конструкций оправдано в случаях, когда набор применяемых дорожно-строительных материалов сравнительно небольшой. Но постепенно происходит накопление опыта службы дорожных одежд. Стали появляться новые материалы и вяжущие (модифицированные полимерные битумы), новые технологии (устройство тонких слоев асфальтобетона, применение асфальтобетонных оснований под цементобетонными покрытиями, прослойки из геосинтетических материалов). Для оценки целесообразности вложения средств в разработку новых технологий и материалов возникла необходимость определения соотношения стоимости материалов и их вклада в повышение прочности и долговечности конструкции дорожной одежды.

В связи с этим в некоторых странах было принято решение при проектировании дорожных одежд в дополнение к типовым альбомам использовать расчеты на прочность. Во Франции с учетом появления новых материалов и технологий в 1988 году был пересмотрен каталог типовых конструкций дорожных одежд.

Во Франции, Англии, Нидерландах нежесткие дорожные одежды

рассчитывают на основе полученного Д. Бурмистером решения для слоистой упругой системы с помощью ЭВМ, применяя для этого программу ALIZE-LCPC.

В конце 90-х годов XX века дорожники ряда европейских стран решили обобщить накопленный ими опыт проектирования дорожных одежд и провели исследования по плану AMADEUS (Advanced Models for Analytical Design of European Pavement Structures). Одной из целей выдвигалась в перспективе разработка объединенного европейского метода расчета. В исследованиях по плану AMADEUS участвовали дорожники 15 стран: Австрии, Англии, Бельгии, Германии, Нидерландов, Дании, Испании, Финляндии, Швеции и др. [77]. Исследования проводились в 1998-99 гг. и координировались Бельгийским Дорожным исследовательским центром под руководством Л. Франкена.

В большинстве стран – участницах при расчете дорожных одежд используются теоретические методы, базирующиеся на решениях теории упругости для слоистого полупространства. В качестве критериев предельного состояния, как правило, принимаются горизонтальная относительная деформация растяжения по подошве нижнего асфальтобетонного слоя (для ограничения возникновения трещин в покрытии от усталости при повторном изгибе) и максимальная вертикальная деформация сжатия на поверхности грунта земляного полотна (для ограничения появления чрезмерной колеи). В большинстве европейских стран расчетный период составляет 20 лет, в Румынии – 15, во Франции, Германии – 30, в Англии – до 40 лет при условии доказанной экономической целесообразности.

(Dickeangaben in cm; ∇ E_{v2} -Mindestwerte in MN/m²)

Zeile	Bauklasse	Bk ₁₀₀	Bk ₃₂	Bk ₁₀	Bk _{3,2}	Bk _{1,8}	Bk _{0,3}	Bk _{0,3}
	B [Mio]	> 32	> 10 - 32	> 3,2 - 10	> 1,8 - 3,2	> 1,0 - 1,8	> 0,3 - 1,0	≤ 0,3
	Dicke des frostsich. Oberbaues ¹⁾	55 65 75 85 55 65 75 85	55 65 75 85	55 65 75 85	45 55 65 75 45 55 65 75	45 55 65 75 45 55 65 75	35 45 55 65 35 45 55 65	35 45 55 65 35 45 55 65
1	Asphalttragschicht auf Frostschuttschicht							
	Asphalttragschicht							
2.1	Asphalttragschicht und Tragschicht mit hydraulischem Bindemittel auf Frostschuttschicht bzw. Schicht aus frostunempfindlichem Material							
	Asphalttragschicht							
2.2	Asphalttragschicht und Tragschicht mit hydraulischem Bindemittel auf Frostschuttschicht bzw. Schicht aus frostunempfindlichem Material							
	Asphalttragschicht							
2.3	Asphalttragschicht und Tragschicht mit hydraulischem Bindemittel auf Frostschuttschicht bzw. Schicht aus frostunempfindlichem Material							
	Asphalttragschicht							
3	Asphalttragschicht und Schottertragschicht auf Frostschuttschicht							
	Asphalttragschicht							
4	Asphalttragschicht und Kiestragschicht auf Frostschuttschicht							
	Asphalttragschicht							
5	Asphalttragschicht und Schotter- oder Kiestragschicht auf Schicht aus frostunempfindlichem Material							
	Asphalttragschicht							

1) Bei abweichenden Werten sind die Dicken der Frostschuttschicht bzw. des frostunempfindlichen Materials durch Differenzbildung zu bestimmen, siehe auch Tabelle 8

2) Mit rundkörnigen Gesteinskörnungen nur bei örtlicher Bewehrung anwendbar

3) Nur mit gebrochenen Gesteinskörnungen und bei örtlicher Bewehrung anwendbar

4) Nur ausführen, wenn das frostunempfindliche Material und das zu verfestigende Material als eine Schicht eingebaut werden

5) Bei Kiestragschicht in Bauklassen Bk₁₀ bis Bk₁₀₀ in 40 cm Dicke, in Bauklassen Bk_{3,2} und Bk_{1,8} in 30 cm Dicke

6) Tragschicht, siehe auch Abschnitt 3.3.3

7) alternativ: Abminderung der Asphalttragschicht um 2 cm bei 20 cm dicker Schottertragschicht und E_{v2} ≥ 180 MN/m² (in Bauklassen Bk_{1,8} bis Bk₁₀₀) bzw. E_{v2} ≥ 150 MN/m²

Рисунок 10 – Страница из немецкого каталога типовых конструкций дорожных одежд (RStO 12)

В математическом обеспечении методов расчета дорожных одежд весьма важной частью является программа для вычисления напряжений, деформаций и перемещений. В отчете AMADEUS оценивалась работа нескольких таких программ. На строгом аналитическом решении теории

упругости (Д. Бурмистера) для многослойной среды основаны следующие сравнивавшиеся программы:

- CHEVRON (первая версия этой программы была разработана в 1963 г. в научно-исследовательской лаборатории одноименной нефтяной компании в Калифорнии; позднее использована как блок американской программы VESYS для расчета дорожных одежд),

- BISAR (первую версию разработал D.L. De Jong (1973 г.) в научной лаборатории нефтяной компании Shell в Амстердаме; ей предшествовала разработанная там же программа BISTRO),

- ELSYM5 (разработал G. Ahlborn (1972 г.) в Калифорнийском университете Беркли),

- WESLEA (DOS - версию разработал F. Van Cauwelaert (1985 г.) в Католическом университете г. Монс в Бельгии),

- KENLAYER (разработал Y.H. Huang (1985 г.) в университете штат Кентукки).

Все перечисленные программы, кроме KENLAYER, позволяли определять напряженно-деформированное состояние пятислойного полупространства (4 слоя на однородном полупространстве). Программа KENLAYER давала возможность рассчитывать системы с числом слоев до 19.

Программы тестировали для трехслойной дорожной одежды с такими параметрами: первый слой: $h_1 = 26$ см, $E_1 = 5000$ МПа, $\nu_1 = 0,35$ (асфальтобетон); второй слой: $h_2 = 50$ см, $E_2 = 200$ МПа, $\nu_2 = 0,40$ (щебень), третий слой: $h_3 = \infty$ см, $E_3 = 50$ МПа, $\nu_3 = 0,45$ (грунт земляного полотна). Нагрузку на одиночное колесо принимали равной 50 кН с давлением 0,7 МПа, распределенным по кругу диаметром 30,16 см. Например, максимальная горизонтальная относительная деформация по подошве асфальтобетонного покрытия получена по программе BISAR равной $\varepsilon_r = 100,5 \times 10^{-6}$, по ELSYM5 – $\varepsilon_r = 99,7 \times 10^{-6}$, по CHEVRON (VESYS) – $\varepsilon_r = 99,4 \times 10^{-6}$, по WESLEA – $\varepsilon_r = 100,4 \times 10^{-6}$.

В ходе проведения исследований было установлено, что эти программы дают близкие значения напряжений и деформаций, за исключением точек, расположенных неглубоко от поверхности покрытия, и точек вблизи границы нагруженной области. Так, под центром круговой площадки с приложенным равномерным давлением 0,7 МПа программы CHEVRON, BISAR, ELSYM5 и WESLEA дали равное ему вертикальное напряжение $\sigma_z = 0,700$ МПа, но по KENLAYER – $\sigma_z = 0,817$ МПа. На границе нагруженной круговой площадки, где заданное давление имеет скачок от 0,0 до 0,7 МПа, эти программы дали: CHEVRON (VESYS) – $\sigma_z = 0,372$ МПа, BISAR – $\sigma_z = 0,350$ МПа (т.е. полусумму давлений слева и справа), ELSYM5 – $\sigma_z = 0,342$ МПа, WESLEA – $\sigma_z = 0,000$ МПа, а KENLAYER – $\sigma_z = 0,319$ МПа. Приведенные результаты счета свидетельствует о недостаточно тщательной отработке вычислений в алгоритмах этих программ в тех случаях, когда вычисляемые интегралы плохо сходятся или имеют особенности.

Важным этапом работ по AMADEUS было испытание дорожных одежд с измерением напряжений и деформаций и их сопоставлением с вычисленными. Испытания проводили на кольцевом стенде в Мадриде и прямолинейных стендах в Делфте (Нидерланды) и в Лозанне (Швейцария). Выяснилось, что вычисленные горизонтальные относительные деформации в покрытии сравнительно неплохо согласуются с измеренными. Однако все программы дают заниженные примерно на 50 % значения вертикального напряжения и вертикальной относительной деформации на поверхности грунта земляного полотна по сравнению с измеренными их значениями.

В заключительном отчете по AMADEUS отмечено, что все проанализированные европейские методы рассматривают только два вида разрушения (усталостные трещины от растяжения по подошве покрытия и колея от накопления остаточных перемещений в грунте), хотя на самом деле их гораздо больше: распространение трещин сверху вниз, колея за счет остаточных деформаций покрытия, температурные трещины и т.д.

Подчеркнута целесообразность прогнозирования накопления повреждений во времени.

Можно отметить такую тенденцию: чем больше территория страны и разнообразнее ее природные условия, тем больше специалисты стремятся к созданию теоретически обоснованных методов взамен эмпирическим методам, в особенности – для дорогостоящих объектов.

К похожему выводу пришли в США в ходе эксплуатации дорог, запроектированных по эмпирическому методу AASHO. Спустя 40 лет стало ясно, что построенный на основе испытаний AASHO, казалось бы, надежный эмпирический метод можно применять только в тех условиях и для тех материалов и конструкций, которые подвергались испытаниям.

Для опытов AASHO характерны:

- один и тот же грунт земляного полотна (суглинок),
- один и тот же щебень в основании дорожной одежды,
- один и тот же песчано–гравийный материал в дополнительном основании,
- одна и та же горячая асфальтобетонная смесь в покрытии,
- одни и те же природные условия (температура, влажность, глубина промерзания),
- концентрированное во времени движение грузовых автомобилей или автопоездов при полном отсутствии более легких нагрузок,
- лишь 1 млн. проездов осевых нагрузок, а для дальнейшего прогноза изменения состояния дорожной одежды использовали экстраполяцию.

В итоге дорожники пришли к выводу, что в связи с большой территорией США, разнообразием природных условий и прогрессом в технологиях стране нужен теоретически обоснованный метод расчета с соответствующей базой данных о природных условиях и программное обеспечение, чтобы дорожную одежду на любом объекте можно было рассчитать на прочность. С этой целью в 1989 г. были начаты многолетние испытания на опытных участках дорог в разных регионах для накопления экспериментальных данных о поведении

дорожных одежд с периодическим обследованием участков по единой методике, а в 1998 г. приступили к разработке метода и к началу 2004 г. предложили его первую версию в виде Руководства по механико-эмпирическому методу проектирования дорожных одежд – сокращенно MEPDG [101].

Анализ методов расчета нежестких дорожных одежд, применяемых за рубежом, особенно в странах Западной Европы и Америки, показал, что большинство из них исходят из эмпирического и в определенной степени условного показателя CBR. В XX веке теоретические положения в этих методах использовались мало. В XXI веке в рамках применения механико-эмпирического метода проектирования дорожных одежд для определения параметров напряженно-деформированного состояния используются точные решения для многослойного полупространства.

1.3 Современные подходы к прогнозированию усталостных повреждений

Эффективность любого подхода к проектированию дорожных одежд напрямую определяется достоверностью прогнозирования изменений состояния и процесса разрушения дорожных одежд. Неадекватность моделей, расчетных формул, заложенных в методах проектирования реальным процессам, происходящим в ходе эксплуатации, могут привести к принятию неверных технических решений и к значительному увеличению стоимости строительства, либо к преждевременному разрушению. Именно поэтому совершенствование методов прогнозирования состояния дорожных одежд, а в частности метода прогнозирования накопления усталостных разрушений в асфальтобетонных слоях, как наиболее дорогостоящих, является актуальной задачей.

Традиционно в нашей стране основное внимание уделялось вопросам прогнозирования прочности дорожной одежды и ровности покрытия [4, 5, 44, 52, 70, 71,]. Закономерности снижения модуля упругости нежесткой дорожной одежды во времени были получены В.К. Апестиным, А.М. Шаком, Ю.М.

Яковлевым, М.С. Коганзоном, А. Аблакуловым, А.Н. Елгоновым и др. [1, 27, 40, 41, 42, 75].

По результатам исследований [8, 45, 46], установлено, что процесс изменения прочности дорожной одежды, характеризуемой модулем упругости, можно разделить на три этапа.

Усталостное трещинообразование, входящее во второй этап, связано с нагрузкой и является одним из основных типов повреждений, возникающих в системах нежестких дорожных одежд. Действие повторяющихся транспортных нагрузок вызывает растягивающие напряжения в монолитных слоях, что в конечном итоге приводит к потере структурной целостности слоя. Повторяющаяся нагрузка или усталость инициируют трещины в точках, где возникают критические деформации при растяжении и сжатии. [103, 104, 96, 112] Расположение критической деформации/напряжения зависит от нескольких факторов. Наиболее важными являются жесткость слоя и характер приложения нагрузки [32, 33, 69].

Это связано с тем, что критическая деформация зависит от жесткости смеси. Поскольку жесткость асфальтобетонной смеси в многослойной системе дорожной одежды зависит от толщины, эти изменения в конечном итоге повлияют на расположение критической деформации, вызывающей усталостное повреждение. Как только повреждение начинается в критическом месте, продолжающееся движение транспорта в конечном итоге приводит к тому, что эти трещины распространяются по всему монолитному слою.

На усталостное трещинообразование слоев дорожной одежды влияют многие факторы. Некоторые из этих факторов можно контролировать или изменять, в то время как остальные являются внешними факторами, которые невозможно контролировать. На величину усталостного трещинообразования в слоях асфальтобетона конструкции дорожной одежды влияют следующие факторы:

- толщина слоев асфальтобетонной смеси;
- динамический модуль / жесткость слоев асфальтобетонной смеси;

- класс вяжущего в асфальтобетонной смеси;
- воздушные пустоты в слоях асфальтобетона;
- эффективное содержание вяжущего в слоях асфальтобетона;
- толщина слоя основания;
- модуль упругости земляного полотна;
- форма транспортной нагрузки;
- транспортная нагрузка, площадь отпечатка колеса и давление в шинах;
- число приложений нагрузки;
- температура и погодные условия окружающей среды.

В Руководстве по проектированию дорог в США MEPDG [81] используется подход, который моделирует как нисходящее, так и восходящее трещинообразование. Подход основан на расчете усталостных повреждений на поверхности для трещинообразования сверху-вниз и в нижней части каждого слоя асфальтобетона для трещинообразования снизу-вверх.

Затем с использованием калибровочных данных усталостные повреждения коррелируют с усталостным трещинообразованием.

Оценка усталостного повреждения основана на законе Майнера, который гласит, что повреждение определяется следующим соотношением:

$$D = \sum_{i=1}^T \frac{n_i}{N_i},$$

где D – повреждение;

T – общее количество периодов;

n_i – фактическая интенсивность движения для периода i .

N_i – интенсивность движения, разрешенная в соответствии с условиями, преобладающими в период i .

Оценка усталостного повреждения и усталостного трещинообразования как для нисходящего, так и для восходящего трещинообразования описывается ниже.

Для характеристики усталостных повреждений в асфальтобетонном слое в существующей литературе можно найти многочисленные модели работоспособности. Наиболее часто используемая форма модели работоспособности, применяемая в США для прогнозирования числа повторений нагрузки до момента наступления усталостного трещинообразования, является функцией количества циклов приложения нагрузки от жесткости асфальтобетона вида $N_f(E)$. Критические точки могут находиться либо на поверхности и приводить к трещинообразованию сверху-вниз, либо в нижней части асфальтобетонного слоя и приводить к трещинообразованию снизу-вверх.

Большинство известных соотношений имеют общую базовую структуру и зависят от жесткости асфальтобетона и деформации при растяжении. Обычно используемая математическая зависимость, используемая для характеристики усталости, имеет следующий вид:

$$N_f = C k_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{k_2} \left(\frac{1}{E}\right)^{k_3} = \beta_{f1} k_1 (\varepsilon_t)^{-\beta_{f2} k_2} (E)^{-\beta_{f3} k_3},$$

где N_f – число повторений до усталостного трещинообразования;

ε_t – деформация при растяжении в критической точке;

E – модуль упругости материала;

k_1, k_2, k_3 – лабораторные коэффициенты регрессии;

$\beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{f3}$ – параметры калибровки;

C – поправочный коэффициент от лабораторных испытаний к полевым.

Конечным соотношением, предлагаемым в MEPDG [81], применяемым для прогнозирования числа повторений усталостного трещинообразования, является модель Института Асфальта, которая основана на критерии постоянной деформации и может быть представлена в виде формул

$$N_f = 0,00432C \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,291} \left(\frac{1}{E}\right)^{0,854},$$

$$C = 10^M,$$

$$M = 4,84 \left(\frac{V_b}{V_a V_b} - 0,69 \right),$$

где V_b – эффективное содержание вяжущего, %;

V_a – воздушные пустоты, %.

Национальная модель, откалиброванная в полевых условиях, используемая в Руководстве по проектированию, была определена путем численной оптимизации и других способов сравнения для получения национальных калибровочных коэффициентов:

$$\beta_{f1} = k'_1 \cdot \beta'_{f1},$$

$$\beta'_{f1} = 1,0;$$

$$\beta_{f2} = 1,2;$$

$$\beta_{f3} = 1,5.$$

Итоговая модель имеет вид:

$$N_f = 0,00432 \cdot k'_1 \cdot C \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{3,9492} \left(\frac{1}{E} \right)^{1,281},$$

На этом этапе был введен параметр k'_1 , чтобы обеспечить поправку на влияние различной толщины слоя асфальтобетона h_{ac} .

а) для трещинообразования снизу-вверх:

$$k'_1 = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 3,49 \cdot h_{ac})}}},$$

б) для трещинообразования сверху-вниз:

$$k'_1 = \frac{1}{0,01 + \frac{12,00}{1 + e^{(15,676 - 2,8186 \cdot h_{ac})}}},$$

где h_{ac} – общая толщина асфальтобетонных слоев, дюйм.

Окончательно процент площади полосы движения покрытой сеткой усталостных трещин может быть вычислен в соответствии со следующей сигмоидальной зависимостью вида:

а) для трещинообразования снизу-вверх (% от общей площади полосы):

$$FC_{bottom} = \left(\frac{6000}{1 + e^{(C_1 \cdot C'_1 + C_2 \cdot C'_2 \cdot \log_{10}(D \cdot 100))}} \right) \cdot \left(\frac{1}{60} \right),$$

где FC_{bottom} – восходящее усталостное трещинообразование, процент площади полосы;

D – восходящее усталостное повреждение;

$$C_1 = 1,0;$$

$$C'_1 = -2 \cdot C'_2;$$

$$C_2 = 1,0;$$

$$C'_2 = -2,40874 - 39,748 \cdot (1 + h_{ac})^{-2,856};$$

$N = 461$ наблюдение;

$$S_e = 6,2 \text{ \%};$$

$$S_e / S_y = 0,947.$$

б) для трещинообразования сверху-вниз (фут/миля) :

$$FC_{top} = \left(\frac{1000}{1 + e^{(7,0 - 3,5 \cdot \log_{10}(D \cdot 100))}} \right) \cdot (10,56),$$

где FC_{top} – усталостное трещинообразование сверху-вниз, фут/миля;

D – нисходящее усталостное повреждение;

$N = 414$ наблюдение;

$S_e = 1242,25\%$;

$S_e/S_y = 0,977$.

Особенностью данной зависимости является прямая связь между абстрактным параметром доли накопленных повреждений и понятным эксплуатационным показателем процента площади полосы движения покрытой сеткой усталостных трещин, который может быть привязан к предельным значениям коэффициента разрушения.

Модель усталостного трещинообразования асфальтобетонных смесей была откалибрована на основе 82 участков LTPP, расположенных в 24 штатах. Наблюдения проводились длительное время на различных участках, в результате чего было получено 441 наблюдение за трещинообразованием по типу «снизу-вверх» и 408 точек данных для продольного трещинообразования (по типу сверху-вниз).

Аналогичные исследования для уточнения модели усталостного трещинообразования проводятся и в последние годы [76, 79, 84, 89, 105, 108, 109, 111, 119, 116, 117]. При этом проводятся они как правило на крупных линейных или кольцевых стендах с применением установок ускоренного тестирования дорожных одежд [87, 91, 92, 93, 94, 95, 98, 100, 118, 120]

В Германии также был собран большой объем данных о результатах натурных испытаний дорожных одежд. На основе результатов этих исследований была предложена модель [40, 78, 97] для определения образования поверхностных трещин в асфальтобетонных покрытиях. В модели предполагается, что растрескивание вызвано осевыми нагрузками в сочетании с климатическими воздействиями. Учитываются также тип асфальтобетонной смеси и конструкция дорожного покрытия.

В соответствии с «Указаниями по расчету дорожной одежды с асфальтобетонным покрытием RDO Asphalt 09» [107], следует ограничить нагружение асфальтобетона так, чтобы оно исключало образование трещин в асфальтобетонных слоях в течение планового срока эксплуатации.

Допустимое число приложений нагрузки для соответствующих режимов нагружения определяется из уравнения для максимальных удлинений при растяжении на изгибе, возникающих в слое:

$$zul\ N = \frac{SF}{F} \cdot a \cdot \varepsilon^k,$$

где: $zul\ N$ – допустимое число приложений нагрузок на ось до возникновения трещин в несущих слоях из асфальтобетона;

SF – коэффициент сдвига, для косвенного порогового испытания на сдвиг, следует принимать $SF=1500$;

F – коэффициент запаса прочности;

a – параметры материала, определенные через регрессию от испытания на усталость;

ε^k – относительная начальная упругая деформация во время испытания.

Частичные повреждения, вследствие допустимых циклических нагрузок при различных напряжениях, могут аккумулироваться в общее повреждение на основании гипотезы Майнера:

$$\sum_{MINER} = \frac{vorh\ N_1}{zul\ N_1} + \frac{vorh\ N_2}{zul\ N_2} + \frac{vorh\ N_3}{zul\ N_3} + \dots + \frac{vorh\ N_n}{zul\ N_n} \leq 1,$$

где: $vorh\ N_i$ – ожидаемое число приложений нагрузок на ось в течение запланированного периода эксплуатации, $i = 1, 2, \dots, n$;

$zul\ N_i$ – допустимое число приложений нагрузок на ось в течение запланированного периода эксплуатации, $i = 1, 2, \dots, n$;

n – число нагруженных состояний, которое следует учитывать.

Расчет считается выполненным, если результат отношения ожидаемого количества к допустимому количеству приложений нагрузки для запланированного срока эксплуатации меньше или равно 1.

Вышеописанный метод позволяет рассчитывать растягивающие напряжения в дорожном покрытии для различных периодов года и суммировать их влияние на развитие усталостных процессов, что в свою очередь позволяет уже на этапе проектирования дорожной конструкции выявить механизм образования дефектов в покрытии и назначить соответствующий вид мероприятий для их предотвращения

1.4 Определение цели и задач исследования

В связи с тем, что до текущего момента отсутствовали разработанные научно-обоснованные рекомендации по физическому моделированию напряженно-деформированного состояния дорожных одежд под воздействием различных видов расчетных нагрузок с целью прогнозирования усталостной долговечности была сформирована основная цель диссертационной работы: 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, и ее планировочных решений, позволяющих осуществлять весь спектр необходимых измерений, для определения механических параметров конструкции в целом, и отдельных ее слоев.
- определить в ходе испытаний 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 в условиях физической модели, лабораторных испытаниях на традиционном оборудовании, и лабораторных испытаний на современном оборудовании;

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

ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ:

1. Рассмотрен процесс развития методов проектирования нежестких дорожных одежд в практике СССР и Российской Федерации. 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. В качестве одного из основных направлений совершенствования методологической базы данных подходов отмечается необходимость применения модели упругого слоистого полупространства обеспечивающей точное решение задачи об определении основных компонент НДС при воздействии расчетной нагрузки.

2. Отмечено, что до текущего момента не осуществлялись комплексные сопоставительные испытания расчетных характеристик асфальтобетонных слоев дорожных одежд при различных режимах нагружения: гармоническом, гаверсинусоидальном, нестационарном. Установление соответствующих связей между расчетными характеристиками позволит в значительной степени уточнить действующие расчетные методики.

3. До текущего момента отсутствуют разработанные научно-обоснованные рекомендации по физическому моделированию напряженно-деформированного состояния дорожных одежд под воздействием различных видов расчетных нагрузок. В то же время создание подобных физических моделей для натурных испытаний, и разработка методической базы их создания позволит наладить своевременный и эффективный контроль и валидацию новых дорожно-строительных технологий в условиях приближенных к реальным режимам эксплуатации дорог.

4. Около 60% европейских стран разработали аналитические методы проектирования, схожие по своей концепции. Обычно они используют линейную теорию упругости для расчета допустимых значений напряжения или деформации в критических местах конструкции дорожного покрытия. Существует много различий в стандартных условиях, используемых отдельными методами аналитического проектирования. Например, форма колесной нагрузки, расчетная температура дорожного покрытия и частота нагрузки. Однако при условии, что метод откалиброван с использованием этих стандартных условий и они сохраняются для всех последующих расчетов, каждый метод будет демонстрировать одинаковую чувствительность к входным данным проекта. Все европейские методы проектирования откалиброваны эмпирически с учетом климатических факторов, методов строительства и материалов, используемых в конкретной стране. Это вызывает трудности при передаче метода из одной страны в другую. Для нежестких дорожных одежд наиболее распространенными видами дефектов является образование трещин и колеи на поверхности дорожного покрытия.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД И РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

2.1 Теоретические предпосылки к определению усталостной выносливости асфальтобетонных слоев на основе физического моделирования

Накопление усталостных повреждений в слоях асфальтобетона очевидно является кумулятивным процессом, происходящим в течении достаточно длительного времени и определяемого комплексом силовых энергетических и температурно-влажностных факторов. Прогноз накопления усталостных повреждений выполняется в рамках различных кумулятивных моделей. В привязке к теме данного исследования и с учетом [7] задача, поставленная в рамках данного исследования, может быть формализована следующим образом.

В общем случае любая кумулятивная модель может быть описана как:

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{H}_{\tau=t_0}^{\tau=t} [\mathbf{q}(\tau)] \quad (27)$$

где:

$\mathbf{v}$ - вектор качества;

$\mathbf{q}(\tau)$ - процесс нагружения

Функционал, представленный в формуле 28 может быть описан в виде дифференциального уравнения с начальным условием $\mathbf{v}(t_0) = \mathbf{v}_0$

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = f(\mathbf{v}, \mathbf{q}) \quad (28)$$

Традиционно в инженерных приложениях вместо вектора $\mathbf{v}$ рассматривают меру повреждений ψ , и в этом случае дифференциально уравнение преобразуется к виду:

$$\frac{d\psi}{dt} = f(\psi, \mathbf{q}) \quad (29)$$

Предположив, что время нагружения может быть заменено достаточно большим количеством блоков или циклов нагружения n , перейдем к конечно-разностной аппроксимации дифференциального уравнения 29 с граничными условиями $\psi(n_0) = 0; \psi(N) = 1$.

$$\psi_n - \psi_{n-1} = \omega(\psi_{n-1}, \mathbf{q}_n) \quad (30)$$

где:

N - количество циклов, характеризующее исчерпание ресурса

Также следует заметить, что представленное уравнение в целом аналогично дифференциальному уравнению вида

$$\frac{d\psi}{dn} = \omega(\psi, \mathbf{q}) \quad (31)$$

Вернуться от количества циклов к времени достаточно умножив левую часть уравнения на $\frac{dn}{dt}$.

Говоря о правиле линейного суммирования повреждений, как о наиболее простом случае необходимо рассмотреть ситуацию, когда правая часть дифференциального уравнения (30) не зависит от меры повреждения ψ

Тогда решение уравнения (30) будет иметь вид:

$$\psi(t) = \int_0^T f(\mathbf{q}(t)) dt \quad (32)$$

Так как ранее было отмечено, что $\psi(T)=1$ то введя обозначение $T_b = 1 / f_b(\mathbf{q}(t))$ получим

$$\psi(T) = \int_0^T \frac{dt}{T_b(\mathbf{q}(t))} = 1 \quad (33)$$

Аналогичный результат можно получить для дискретного случая нагружения заменив непрерывную компоненту время t на дискретную компоненту n - представляющую собой количество циклов или блоков

нагружения:

$$\psi(N) = \sum_{n=1}^N \frac{1}{N_b(q)} = 1 \quad (34)$$

Выражение 34 представляет собой так называемую линейную гипотезу суммирования повреждений, именуемую в разных источниках правилом линейного суммирования повреждений Пальмгрена, или Пальмгрена-Майнера. Величина $N_b(q)$ имеет конкретный физический смысл. Она представляет собой количество циклов приложения нагрузки до момента перехода материала в предельное состояние, при установившемся режиме колебаний $q = const$.

Как правило в дорожной практике Российской Федерации в рамках критерия расчета дорожных одежд на сопротивление слоев из асфальтобетона усталостному разрушению от растяжения при изгибе опосредовано рассматривается величина $N_b(\sigma_r)$, где σ_r - представляет собой радиальное растягивающее напряжение на нижней границе слоя асфальтобетона. Несмотря на многолетний опыт применения этого критерия нельзя не отметить, что в современных условиях он сопряжен с рядом недостатков. Первое – это невозможность определения растягивающих напряжений на нижней границе асфальтобетонных слоев экспериментальным путем в реальной конструкции дорожной одежды, из-за отсутствия специализированных датчиков измерителей. Второе – ситуация, когда применение более жестких асфальтобетонных смесей, приводит к увеличению расчетных растягивающих напряжений на нижней границе пакета асфальтобетонных слоев и как следствие расчетному снижению их усталостной долговечности. В то время как результаты экспериментальных испытаний современных асфальтобетонов, в сравнении с асфальтобетонами подобранными по прошлому поколению ГОСТов, свидетельствуют об обратном.

Таким образом более целесообразным выглядит применение

зависимости количества приложений нагрузки от величины растягивающей деформации ε_r вида $N_b(\varepsilon_r)$ как аналога $N_b(q)$. Оперирование величиной растягивающих деформаций позволяет устранить вышеперечисленные недостатки.

Так растягивающие деформации возможно замерить, как в натурных условиях, так и в условиях лабораторных испытаний на современном оборудовании непрямого растяжения, или установках четырехточечного нагружения, и также растягивающая деформация напрямую связана с жесткостными характеристиками асфальтобетонных смесей. Таким образом в рамках данной работы предполагается сосредоточиться на установлении зависимости вида $N_b(\varepsilon_r)$ построенной с учетом результатов как натурных, так и лабораторных измерений.

Натурные измерения предполагают необходимость физического моделирования дорожной одежды в габаритах приближенных к реальным. Выполнимость подобных измерений требует выработки планировочных решений будущей модели, которые должны базироваться на результатах математического моделирования ее напряженно-деформированного состояния, а также решений по размещению датчиков для мониторинга напряженно-деформированного состояния в ее слоях.

2.2. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния дорожной одежды для обоснования планировочных размеров испытательного стенда.

2.2.1 Установлено, 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 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.

2.2.2 В рамках решения задач в качестве математической модели использована модель слоистого полупространства в осесимметричной постановке. Расчетной схемой является упругое многослойное (до семи слоев) полупространство, нагруженное на внешней поверхности нормальной осесимметричной нагрузкой. Вводят цилиндрическую систему координат r, θ, z (рисунок 11), в которой первый слой ограничен плоскостями $z = 0; z = d_1$ и имеет толщину d_1 . Последующие слои с номерами $i = 2, 3, \dots 6$ располагают между плоскостями $z = d_{i-1}$ и $z = d_i$, и, следовательно, имеют толщину, равную разности $d_i = h_i - h_{i-1}$. Последний седьмой слой ограничен сверху плоскостью $z = H$ и простирается вниз до бесконечности. Каждый из семи слоев характеризуется модулем упругости E_i и коэффициентом Пуассона $\nu_i, i = 1, 2, \dots 7$. Нагрузка, действующая на верхний слой, равномерно распределена с интенсивностью P по площади круга радиуса r_0 с центром в начале координат. Для симметрии следует, что все рассматриваемые ниже характеристики

упругой среды зависят только от двух координат: r и z .

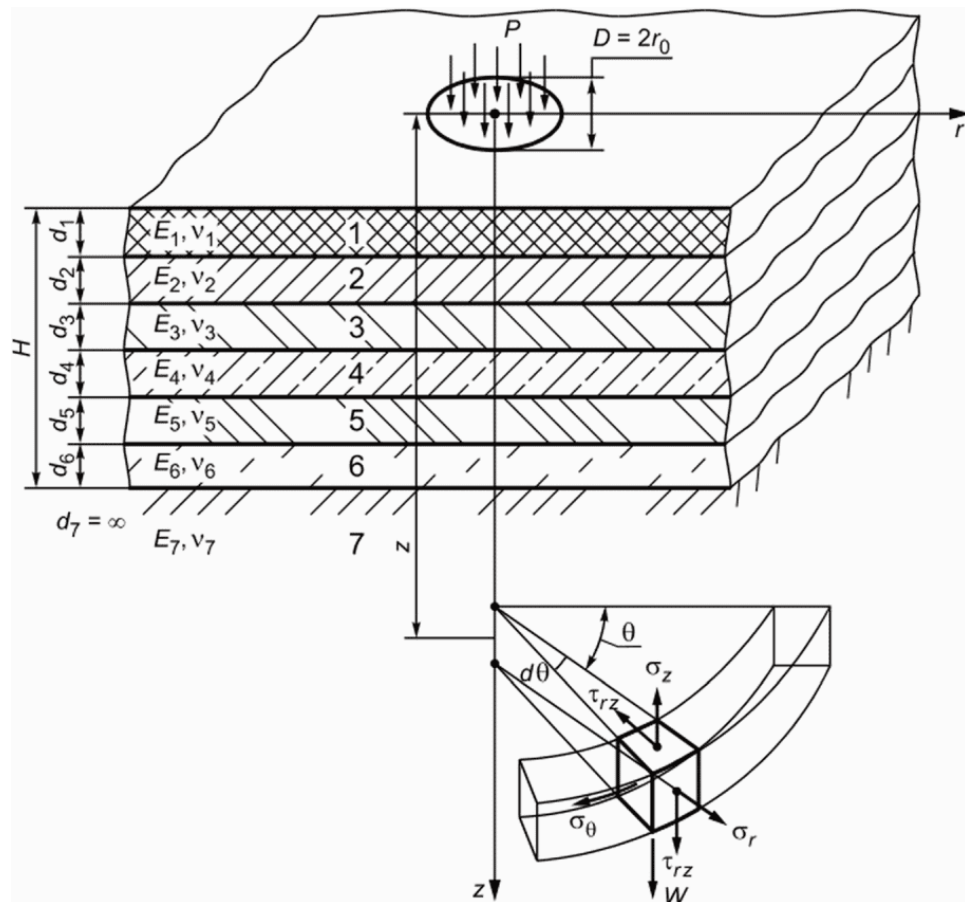


Рисунок 11 - Расчетная схема семислойного полупространства, нагруженного осесимметричной нагрузкой

Необходимо отыскать в каждом слое решения $\varphi_i(r, z)$, $i = 1, 2, \dots, 7$ бигармонического уравнения согласно [1]:

$$\nabla^2 \nabla^2 \varphi_i(r, z) = 0, \quad (\text{Д.1})$$

Решение бигармонической задачи осуществляется на основе представления Туверова. Граничные условия имеют вид:

На поверхности $z = 0$ предполагаются выполненными граничные условия (35 и 36):

$$\sigma_{z1}(r, 0) = \begin{cases} p, & r \leq r_0 \\ 0, & r > r_0 \end{cases} \quad (35)$$

$$\tau_{rz1}(r, 0) = 0 \quad (36)$$

При спаянном контакте на границе $z = h_1$ смежные слои имеют равные напряжения и смещения (37 и 38):

$$\sigma_{z1}(r, h_1) = \sigma_{z2}(r, h_1) \quad \tau_{rz1}(r, h_1) = \tau_{rz2}(r, h_1) \quad (37)$$

$$U_1(r, h_1) = U_2(r, h_1) \quad W_1(r, h_1) = W_2(r, h_1) \quad (38)$$

При гладком контакте на границе $z = h_1$ смежные слои имеют равные вертикальные и касательные напряжения (при этом касательные напряжения равны нулю) и равные вертикальные смещения (39), (40):

$$\sigma_{z1}(r, h_1) = \sigma_{z2}(r, h_1) \quad \tau_{rz1}(r, h_1) = \tau_{rz2}(r, h_1) = 0 \quad (39)$$

$$W_1(r, h_1) = W_2(r, h_1) \quad (40)$$

Выражения для функций φ_i для случая полупространства в трансформантах Ханкеля имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \varphi_1(r, z) = & \int_0^{+\infty} ((A[\alpha, p, E_1, E_2, \nu_1, \nu_2, h, r_0] + B[\alpha, p, E_1, E_2, \nu_1, \nu_2, h, \\ & r_0] (2\nu_1 + \alpha(z/h - 1)) + (C[\alpha, p, E_1, E_2, \nu_1, \nu_2, h, r_0] \\ & ((1 - 2\nu_1)(1 - \exp[2(z/h - 1)\alpha]) \times \\ & \alpha(z/h - 1)(1 + \exp[2(z/h - 1)\alpha])) + D[\alpha, p, \\ & E_1, E_2, \nu_1, \nu_2, h, r_0] (2\nu_1(1 + \exp[2(z/h - 1)\alpha]) + \\ & \alpha(z/h - 1)(1 - \exp[2(z/h - 1)\alpha]))) \\ & \exp[-(z/h)\alpha] \text{BesselJ}[0, (r/h)\alpha]) d\alpha; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi_2(r, z) = & \int_0^{+\infty} ((A[\alpha, p, E_1, E_2, \nu_1, \nu_2, h, r_0] + B[\alpha, p, E_1, E_2, \nu_1, \nu_2, h, r_0] \\ & (2\nu_2 + \alpha(z/h - 1))) \\ & \exp[-(z/h)\alpha] \text{BesselJ}[0, (r/h)\alpha]) d\alpha \end{aligned}$$

Рисунок 72 — Бигармонические функции $\varphi_i(r, z)$, $i = 1, 2$

Данное решение для определения напряженно-деформированного состояния слоистой среды реализовано в программном обеспечении «SigmaPro» которое так же было применено в [54, 53].

2.3 Разработка конструкции испытательного стенда для регистрации параметров деформирования слоев асфальтобетона при воздействии динамических и статических нагрузок

2.3.1 Для выполнения исследований по определению параметров НДС с целью возможности устраивать полноценные конструкции дорожных одежд с размером, аналогичным полосе движения автомобильной дороги был запроектирован проект и построен специальный испытательный стенд для моделирования дорожной одежды.

Для предварительного определения размеров испытательного стенда было выполнено математическое моделирование приложения расчетной нагрузки в программном комплексе, реализующем точное решение теории упругости в соответствии с ОДМ 218.3.1.005-2021 [58].

Для выполнения расчетов принята условная конструкция дорожной одежды, основные параметры конструкции представлены в таблице 1. Расчетные характеристики материалов конструкции приняты по ГОСТ Р 71404 [24].

Таблица 1 - Исходные данные для расчёта

№ слоя	Материал	Толщина слоя, см	Расчетный модуль упругости. При 10°С, МПа
1	ЩМА на БНД 70/100	5	3800
2	А22Н на БНД 70/100	6	4150
3	А32О на БНД 70/100	8	3250
4	ЩПС 0/45	30	275
5	Песок средний	40	120
6	Зем. полотно	∞	75

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 12. Красным выделено распределение вертикальных напряжений в дорожной одежде, составляющих

~1% от приложенного к поверхности давления, что соответствует погрешности используемых датчиков.

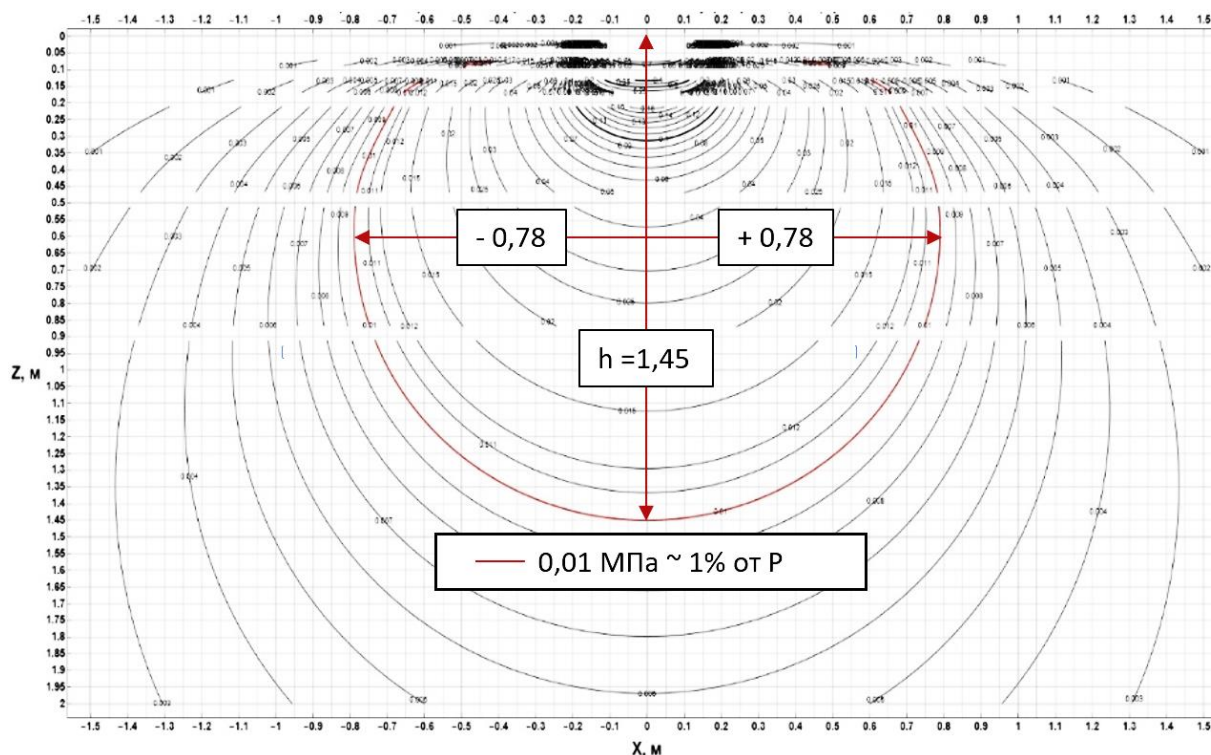


Рисунок 12 - Результаты математического моделирования приложения нагрузки

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

2.3.2 Для выполнения испытаний статическим штампом была запроектирована и устроена специальная перемещающаяся металлическая балка из широкополочного двутавра 50Ш1 по ГОСТ 57837 [14], позволяющая создавать нагрузки на конструкцию до 10 т. Ширина балки балки составляет 300 мм, высота балки 482 мм.

Результаты расчета балки представлены на рисунке 13.

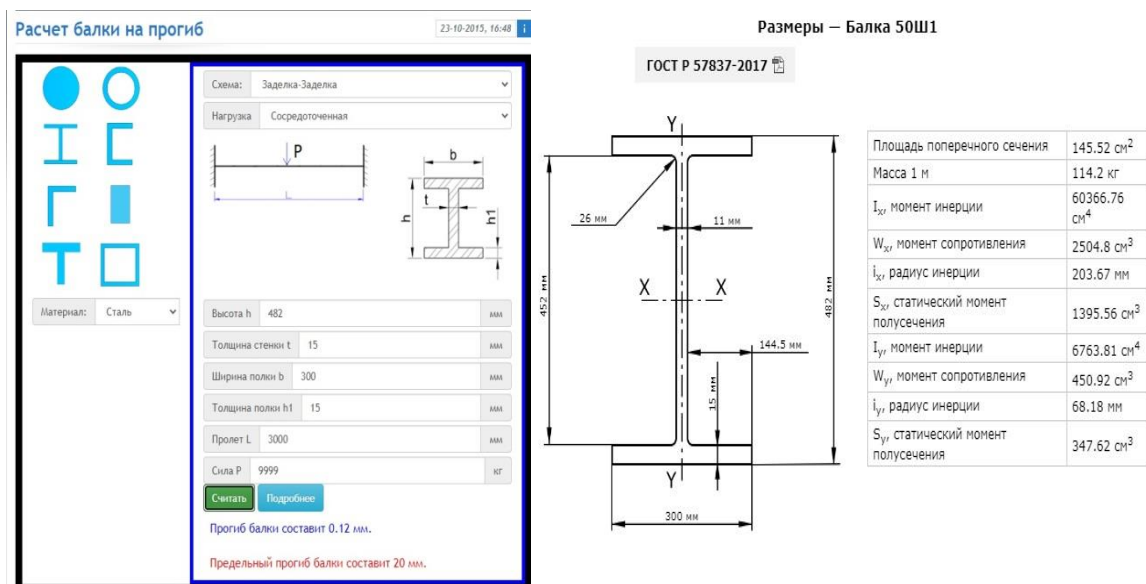


Рисунок 13 - Результаты расчета балки

2.3.3 Окончательные размеры испытательного стенда и параметры балки определены по результатам математического моделирования напряженно-деформированного состояния дорожной одежды от расчетных нагрузок грузового транспорта или установок, имитирующих данное воздействие, а также исходя из следующих факторов:

- исключение влияния стен лотка на напряженно-деформированное состояние дорожных одежд,
- исключение влияния грунта естественного залегания под лотком на напряженно-деформированное состояние дорожных одежд,
- возможность создания статического и динамического нагружения с расчетными параметрами (нагрузка, давление, диаметр отпечатка колеса) с использованием современного измерительного оборудования (штамповые установки статического нагружения, прицепные установки динамического нагружения),
- возможность устройства различных по капитальности конструкций дорожных одежд (начиная с рабочего слоя земляного полотна и заканчивая слоями из асфальтобетона),
- возможность имитации реального уплотнения дорожно-строительных материалов уплотнительной техникой (виброплиты, катки),

- возможность многократной установки системы определения напряженно-деформированного состояния дорожных одежд (датчиков перемещений и напряжений на границе 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. Ширина испытательного стенда соответствует минимально допустимой ширине полосы движения автомобильной дороги.

Трехмерная модель испытательного стенда для устройства слоев дорожной одежды представлена на рисунке 14.

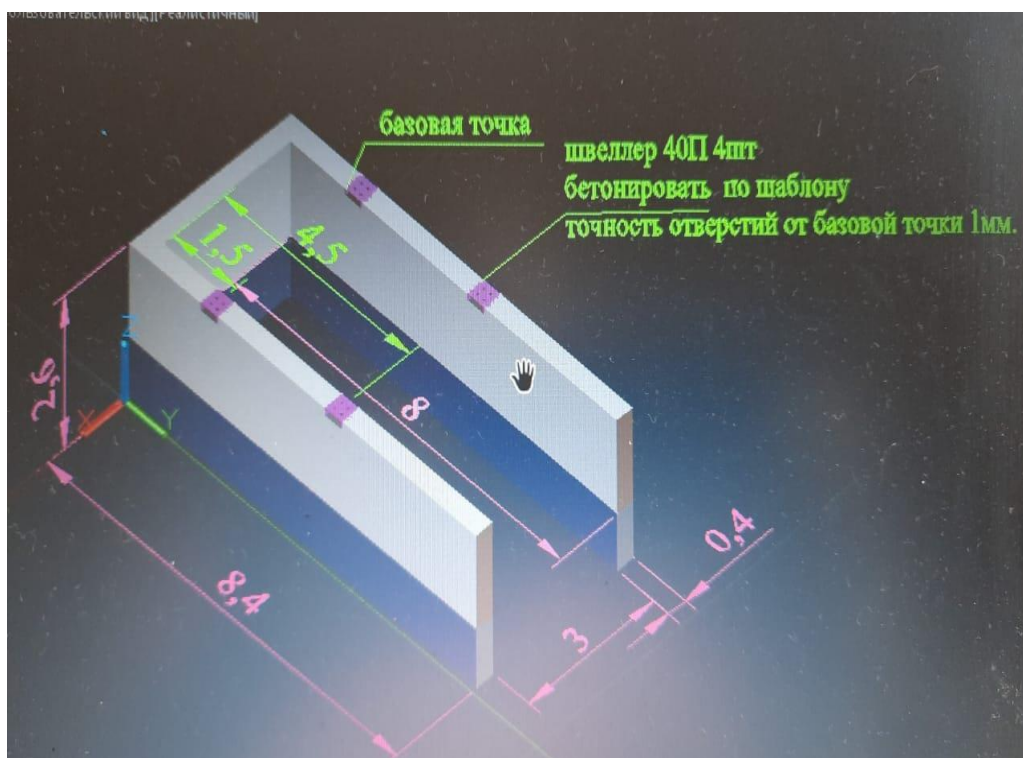


Рисунок 14 - Трехмерная модель лотка для устройства слоев дорожной одежды

2.3.4 Описание применяемых датчиков и измерительного оборудования для динамического нагружения.

Для выполнения исследований по определению НДС были проанализированы производимые и поставляемые в Российской Федерации системы и определена их применимость для дорожных исследований [25, 26]. По результатам анализа были выбраны датчики НДС, производимые японской

компанией Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd (TML): датчики напряжения (давления) в несвязных слоях и датчики перемещения в укрепленных материалах.

Датчики давления предназначены для измерения напряжения (давления) на поверхности неукрепленных (несвязных) слоев при создании на поверхности вышележащих слоев нагрузки с известными параметрами.

Распространенные датчики такого типа состоят из герметичной распределительной подушки, заполненной маслом, и металлической трубки с чувствительным элементом. Так же данные датчики представлены тензометрическими элементами, принцип работы которых заключается в измерении сопротивления и переводе полученных данных в давление посредством калибровочного коэффициента.

В рамках исследований применялись датчики давления KDA-1MPa, система обработки информации и программное обеспечение производства компании TML, Япония. Применяемые датчики давления KDA-1MPa представлены на рисунках 15-16.

Давление грунта

KDA-PA/KDB-PA Датчик давления грунта

(Для гражданского строительства)



KDA-PA и KDB-PA — датчики давления грунта с наружным диаметром корпуса 200 мм. Широко используются на строительных площадках. Конструкция с двойной мембраной минимизирует перемещение чувствительной области и таким образом обеспечивает распределение нагрузки. KDA-PA используют для измерения давления в грунте и для мониторинга дамб, плотин, насыпей и др. KDB-PA используют для измерения давления в подпорных стенках, фундаментах и на поверхности стен конструкций.

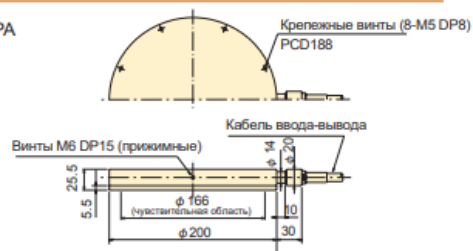
Класс защиты: эквивалент IP68

Высокая чувствительность
Конструкция с двумя диафрагмами
Измерение динамических давлений

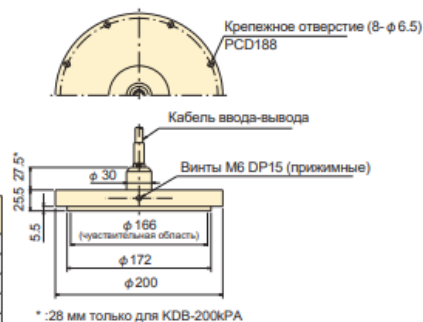
ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

ТИП	KDA-200KPA KDB-200KPA	KDA-500KPA KDB-500KPA	KDA-1MPA KDB-1MPA	KDA-2MPA KDB-2MPA
Пределы измерения	200 кПа	500 кПа	1 МПа	2 МПа
Номинальный выходной сигнал	1 мВ/В			
Нелинейность	2%RO	1%RO		
Допустимый диапазон температур	-30 ~ +60°C			
Вх./вых. сопротивление	350 Ом			
Рекоменд. напряжение питания	не более 3 В			
Допустимое напряжение питания	10 В			
Направление вывода кабеля	KDA-PA: сбоку корпуса		KDB-PA: с задней стороны корпуса	
Вес	6 кг			

KDA-PA



KDB-PA



Кабель ввода-вывода:
4-жильный экранированный хлоропреновый кабель
диам. 9 мм, 0,5 мм², 2 м

Рисунок 15 - Описание применяемых датчиков давления KDA-1MPa



Рисунок 16 – Общий вид применяемых датчиков давления KDA-1MPA

В качестве датчиков растягивающих деформаций использовались датчики KM-100HAS, предназначенные для укладки в слои асфальтобетона и укрепленных материалов.

Применяемые датчики деформаций KM-100HAS представлено на рисунках 17-18.



Рисунок 17 - Описание применяемых датчиков деформаций KM-100HAS



Рисунок 18 – Общий вид применяемых датчиков деформаций KM-100HAS

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

2.3.5 Алгоритм закладки датчиков давления

Для получения максимально достоверных результатов датчики устанавливают в следующей последовательности:

- 1) определение места установки датчика с использованием геодезических методов. Место установки датчика должно быть обозначено краской или колышком,

- 2) разделка углубления в намеченном для датчика месте. Диаметр углубления должен быть примерно таким же, как диаметр датчика, глубина должна соответствовать толщине датчика,

- 3) разделка траншеи для размещения подводящих к датчику проводов. Ширина и глубина траншеи должна быть достаточной для свободного размещения провода в защитном шланге,

4) выравнивание поверхности нижней части углубления и уплотнение трамбованием материала слоя ручной трамбовкой,

6) в случае укладки датчика на неоднородный каменный материал размером частиц более 31,5 мм – выравнивание слоя осуществляется путем устройства тонкого слоя из песка в углублении. Выравнивание и уплотнение песка трамбовкой,

7) укладка датчика в углубление. Проектным положением датчика считается такое, при котором поверхность распределительной подушки датчика располагается вровень с поверхностью слоя, давление на который определяется. При помощи уровня, уложенного в центр распределительной подушки, следует добиться горизонтального размещения датчика,

8) размещение подводящего провода в защитном шланге в траншее. Провод должен лежать свободно - без натяжений,

9) распределение небольшого количества материала вышележащего слоя и уплотнение вручную,

10) засыпка подводящих проводов материалом слоя, полученным от разработки углубления для датчика и траншеи для подводящих проводов. Тщательное уплотнение материала ручной трамбовкой,

11) регистрация местоположения датчика с использованием геодезического инструмента. Местоположение заносится в карту размещения измерительного оборудования,

12) чтение и запись выходного сигнала при помощи считывающего устройства. Запись в журнал производства работ.

2.3.6 Алгоритм закладки датчиков растягивающих деформаций в асфальтобетоне и укрепленных слоях основания

Последовательность установки:

1) Проверка работоспособности датчика, проведение предустановочного тестирования,

2) Определение точек установки датчика с использованием геодезического инструмента. Проектное положение каждого датчика должно

быть обозначено краской. Местоположение заносится в карту размещения измерительного оборудования,

3) В случае укладки на несвязный слой - прокопка траншей, ведущих в сторону обочины, глубиной около 5-8 см и шириной, достаточной для размещения подводящих проводов в защитном шланге, к каждой точке установки датчика,

4) Размещение датчика в проектное положение без закрепления,

5) Свободное размещение подводящих проводов в защитном шланге в разработанные траншеи,

6) Присыпка траншей с размещенными в них подводящими проводами в защитных шлангах материалом слоя, в котором закладывается датчик и тщательное уплотнение трамбованием,

7) Нанесение на каждую точку установки датчика слоя подгрунтовки. Подгрунтовка должна занимать площадь, достаточную для закрепления датчика по периметру его опорной части,

8) Установка датчика в слой подгрунтовки осторожным нажатием датчика и анкеров (наконечников) до тех пор, пока не будет осуществлен полный контакт с нанесенным слоем. Датчик считается размещенным, когда его опорные части находятся в самом нижнем положении,

9) Чтение и запись выходящих данных с использованием считывающего устройства,

10) Непосредственно перед проходом укладчика над датчиком, горячая смесь из укладчика просеивается через сито 16 мм для удаления крупных камней, либо камни удаляются вручную. Просеянная смесь распределяется приблизительно на 5 см вверх и в стороны от датчика. Образованный защитный слой уплотняют статическим нагружением плитой ручной трамбовки,

11) Укладка слоя асфальтобетонной смеси по всей ширине асфальтоукладчиком,

12) Уплотнение слоя. Уплотнение с включенным вибратором запрещено в месте закладки датчика,

13) Чтение и запись в журнал производства работ выходящих данных каждого датчика с использованием считывающего устройства.

Общие технические характеристики системы мониторинга НДС представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Общие технические характеристики системы мониторинга НДС

Оборудование	Измеряемый параметр	Метрологические характеристики и технические характеристики	Конструктивная особенность	Принцип измерения
Датчик давления	Давление в слое дорожной одежды	Максимальное измеряемое давление – не менее 1,0 МПа. Погрешность – не более 1% от измеряемой величины. Возможность измерения давления от статической и динамической нагрузки. Длина кабеля - 8 м. Диапазон рабочих температур от минус 20 до +50°C. Класс защиты – эквивалент IP 68.	Металлический диск номинальным диаметром 200 мм	Тензодатчик. Измерение сопротивления и перевод полученных данных в давление посредством калибровочного коэффициента.
Датчик относительных деформаций	Деформации на нижней границе монолитных слоев	Возможность измерения деформаций (относительного удлинения) от статической и динамической нагрузки. Диапазон измерений $\pm 5000 \text{ мк}$ ($\pm 0,5 \text{ мм}$) Диапазон рабочих температур от минус 20 до 180°C. Длина кабеля - 8 м. Максимальная температура без нарушения работоспособности не менее 180°C. Класс защиты – эквивалент IP 68.	Металлический цилиндрический элемент в мягкой обмотке номинальной длиной 10 см.	Измерение сопротивления и перевод полученных данных в относительную деформацию посредством калибровочного коэффициента.

Блок управления	Преобразование информации с датчиков и вывод на компьютер со специальным программным обеспечением	Возможность подключения одновременно не менее чем 4 датчиков. Возможность управления работой блока, сбора и хранения полученных результатов. Проведение измерений при непосредственном участии персонала. Частота опроса датчиков – не менее 5 кГц. Условия эксплуатации от 0 до + 50°C при относительной влажности не более 85%.	Высокопроизводительный усилитель, прецизионный ацп, минимум 16 бит.	Система функционирует непосредственно при участии персонала с созданием нагрузок с определенными параметрами посредством груженого автомобиля с известными параметрами нагрузки (нагрузка на ось, на отдельное колесо и давление на покрытие)
-----------------	---	---	---	---

2.3.7 Методика выполнения штамповых испытаний статическим нагружением для оценки степени уплотнения и несущей способности

Штамповая установка статического нагружения по ГОСТ Р 59866 [22] включает в себя:

1) механизм нагружения - гидравлический насос с гидроцилиндром и поршнем или механический домкрат, развивающий требуемое усилие в соответствии с таблицами 3-5.

Таблица 3 - Значения нагрузки и давления в зависимости от диаметра нагрузочной плиты при проведении первичного нагружения

Ступень нагружения	Диаметр нагрузочной плиты			
	300 мм		300 мм ¹⁾	
	Нагрузка, кН	Расчетное давление для создания требуемой нагрузки, МН/м ²	Нагрузка, кН	Расчетное давление для создания требуемой нагрузки, МН/м ²
0	0,71	0,01	0,71	0,01
1	5,65	0,08	2,84	0,04
2	11,31	0,16	5,65	0,08
3	17,67	0,25	8,52	0,12
4	23,33	0,33	11,31	0,16

5	29,69	0,42	14,20	0,20
6	35,35	0,50	17,67	0,25
1) При измерениях на конструктивных слоях из песка и на грунтах земляного полотна.				

Таблица 4 - Значения нагрузки и давления в зависимости от диаметра нагрузочной плиты при разгрузке

Степень разгрузки	Диаметр нагрузочной плиты			
	300 мм		300 мм ¹⁾	
	Нагрузка, кН	Расчетное давление для создания требуемой нагрузки, МН/м ²	Нагрузка, кН	Расчетное давление для создания требуемой нагрузки, МН/м ²
1	17,67	0,25	8,52	0,12
2	8,52	0,12	4,26	0,06
3	0,71	0,01	0,71	0,01
1) При измерениях на конструктивных слоях из песка и на грунтах земляного полотна.				

Таблица 5 - Значения нагрузки и давления в зависимости от диаметра нагрузочной плиты при проведении повторного нагружения.

Степень нагружения	Диаметр нагрузочной плиты			
	300 мм		300 мм ¹⁾	
	Нагрузка, кН	Расчетное давление для создания требуемой нагрузки, МН/м ²	Нагрузка, кН	Расчетное давление для создания требуемой нагрузки, МН/м ²
0	0,71	0,01	0,71	0,01
1	5,65	0,08	2,84	0,04
2	11,31	0,16	5,65	0,08
3	17,67	0,25	8,52	0,12
4	23,33	0,33	11,31	0,16
5	29,69	0,42	14,20	0,20
1) При измерениях на конструктивных слоях из песка и на грунтах земляного полотна.				

2) нагрузочные плиты, выполненные из стали. Допускают применение нагрузочных плит диаметром $(300,00 \pm 0,25)$, $(600,00 \pm 0,50)$, $(762,00 \pm 0,50)$ мм. В рамках исследований применялась установка с нагрузочной плитой диаметром 300 мм. Нагрузочная плита диаметром 300 мм должна иметь толщину не менее 20 мм,

3) нагрузочное устройство. Нагрузочное устройство состоит из гидравлического насоса, связанного с гидравлическим цилиндром с использованием шланга высокого давления. Допускается использование нагрузочных устройств иного принципа действия, способных воспроизводить и поддерживать требуемые нагрузки с заданной точностью. Нагрузочное устройство должно обеспечивать нагрузку и разгрузку нагрузочной плиты на отдельных ступенях нагружения,

4) устройство для измерения нагрузки (динамометр) с допускаемой относительной погрешностью не более 1% от максимальной ступени нагружения или устройство для измерения давления (манометр) с ценой деления: для нагрузочных плит 300 не менее $0,01 \text{ МН/м}^2$,

5) устройство для измерения осадки нагрузочной плиты (прогибомер), состоящее:

- из несущего каркаса, расположенного не менее чем на трех опорах;
- вертикально перемещаемого щупа со считывающим устройством, устойчивого к кручению и изгибу;
- измерителя деформации с абсолютной погрешностью измерения в диапазоне от 0 до 0,1 мм - не более 0,015 мм, и относительной погрешностью измерения в диапазоне от 0,1 мм - не более 2%.

Допускается применять прогибомеры с поворотным щупом, прогибомеры с перемещающимся по оси щупом в линейном подшипнике и прогибомеры с измерителем деформации, расположенным по оси нагружения.

Расстояние от центра нагрузочной плиты до оси ближайших к нагрузочной плите опор должно составлять от 1,5 до 1,6 м.

б) противовес. В качестве противовеса допускается использовать строительную технику или иные устройства, нагрузка от которых не менее чем на 10 кН превышает максимальную нагрузку, создаваемую штамповой установкой статического нагружения в процессе измерения. При испытании на стенде в качестве противовеса применялась металлическая балка, а на дорогах - строительная техника.

Общий вид установки статического нагружения представлен на рисунке 19.



Рисунок 19 - Общий вид установки статического нагружения

Подготовку к выполнению измерений методом статического нагружения выполняют в следующей последовательности:

- подготовка поверхности слоя к проведению измерений;
- подготовка и установка нагрузочной плиты и штамповой установки статического нагружения;
- установка противовеса.

Выполнение измерений проводят в следующей последовательности:

- предварительное нагружение;
- первичное нагружение;
- разгрузка;

- повторное нагружение.

Расчетную осадку нагрузочной плиты S , мм, определяют фактическим показанием измерителя осадки.

Расчет модулей деформации при первичном и повторном нагружениях.

Модули деформации при первичном и повторном нагружениях E_V , МН/м² (МПа), рассчитывают по формуле (41)

$$E_V = \frac{0,75 \cdot D}{a_1 + a_2 \cdot \sigma_{\max}}, \quad (41)$$

где 0,75 - коэффициент, учитывающий специфику проведения измерений нагрузочными плитами и усредненный коэффициент Пуассона;

D - диаметр нагрузочной плиты, мм;

a_1 - постоянная многочлена второй степени, мм/(МН/м²);

a_2 - постоянная многочлена второй степени, мм/(МН²/м⁴);

$\sigma_{\max}$ - максимальное давление при измерении, МН/м².

Показатель K_e рассчитывают по формуле (42)

$$K_e = \frac{E_{V2}}{E_{V1}}, \quad (42)$$

где E_{V2} - модуль деформации при повторном нагружении, МН/м² (МПа);

E_{V1} - модуль деформации при первичном нагружении, МН/м² (МПа).

Расчет модуля упругости на поверхности конструктивного слоя и грунта земляного полотна

Модуль упругости E_y , МПа, рассчитывают по формуле (43)

$$E_y = \frac{0,785 \cdot (\sigma_{\max 1} - \sigma_0) \cdot D}{S_y} \cdot (1 - \mu^2) \quad , \quad (43)$$

где $\sigma_{\max 1}$ - максимальная нагрузка при первичном нагружении, МН/м²;

σ_0 - нагрузка при нулевой ступени нагружения, МН/м²;

D - диаметр нагрузочной плиты, мм;

S_y - упругая деформация при первичном нагружении, мм;

μ - коэффициент Пуассона, принимаемый равным 0,3.

Упругую деформацию при первичном нагружении S_y , мм, рассчитывают по формуле (44):

$$S_y = S_1 - S_{\text{ост}} \quad , \quad (44)$$

где S_1 - полная деформация при максимальной нагрузке при первичном нагружении, мм;

$S_{\text{ост}}$ - остаточная деформация после проведения разгрузки, мм.

2.3.8 Для выполнения динамических испытаний применялась установка динамического нагружения FWD которая соответствует требованиям ГОСТ 32729 [11] и ГОСТ Р 59918 [23] и включает в себя:

1) нагрузочную плиту (жесткий штамп), выполненную из металла, диаметром не менее 300 мм. Нагрузочная плита должна обеспечивать плотное прилегание к дорожному покрытию;

2) измеритель нагрузки, фиксирующий прилагаемую нагрузку с погрешностью не более 0,1 кН;

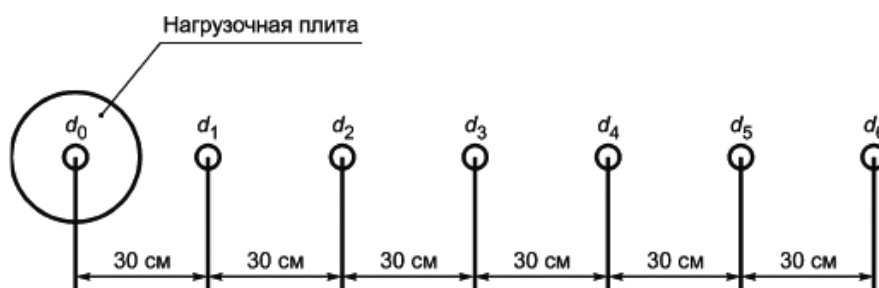
3) измерители прогиба с погрешностью не более 0,01 мм в количестве не менее 7 шт. Первый измеритель прогиба располагают в центре нагрузочной плиты, таким образом, чтобы вертикальное перемещение нагрузочной плиты

в момент приложения нагрузки не оказывало влияние на измерение прогиба. Остальные измерители прогиба монтируют на балке. Расстояние между смежными измерителями прогиба должно составлять (300 ± 5) мм. При использовании большего количества измерителей прогиба, семь из них должны быть расположены, как указано выше, остальные - в зависимости от поставленной измерительной задачи.

Продолжительность импульса динамического воздействия падающим грузом на дорожную одежду должна составлять от 0,020 до 0,030 с.

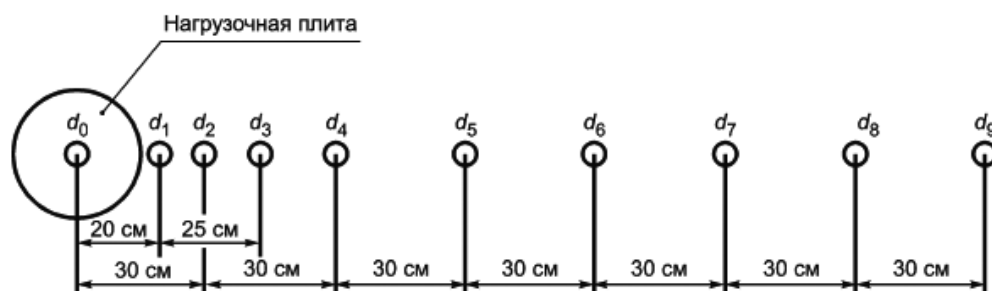
При методе динамического нагружения падающим грузом значение упругого прогиба нежесткой дорожной одежды на измерителях прогиба и параметры чаши прогиба определяют от действия заданной, динамической (кратковременной) нагрузки, передаваемой на дорожное покрытие через нагрузочную плиту (жесткий штамп).

На установках динамического нагружения с целью повышения точности расчета помимо измерителей прогиба, указанных в ГОСТ (рисунок 20), допускается применение дополнительных измерителей прогиба, которые рекомендуется располагать на расстоянии (200 ± 5) мм, (450 ± 5) мм и (2100 ± 5) мм от центра приложения нагрузки (рисунок 21).



$d_0 - d_6$ - измерители прогиба

Рисунок 20 - Схема расположения измерителей прогиба без применения дополнительных измерителей



$d_0 - d_9$ - измерители прогиба

Рисунок 21 - Схема расположения измерителей прогиба, включая дополнительные измерители

В рамках данной работы применялась установка динамического нагружения FWD «ДИНА-4» производства ООО «Спецдортехника, г. Саратов.

Общий вид установки динамического нагружения FWD «ДИНА-4» представлен на рисунке 22.



Рисунок 22 - Общий вид установки динамического нагружения FWD «ДИНА-4»

При подготовке к проведению измерений необходимо провести осмотр установки и выполнить подготовительные работы, рекомендованные изготовителем оборудования.

При проведении измерений в одной точке необходимо выполнить следующие операции:

а) размещают нагрузочную плиту (жесткий штамп) на дорожном покрытии на полосе наката в необходимом для измерения месте;

б) настраивают оборудование на требуемую нагрузку в соответствии с таблицей 6.

Таблица 6 - Требуемая нагрузка при выполнении испытаний динамическим нагружением

Расчетная нагрузка на ось, кН	Заданная нагрузка на дорожное покрытие, кН
60,0	30,0
100,0	50,0
115,0	57,5
130,0	65,0
Примечание - В случае необходимости моделирования иных осевых нагрузок, заданная нагрузка на дорожное покрытие вычисляется в килоньютонах (кН) и рассчитывается как половина расчетной нагрузки на ось.	

в) располагают балку с измерителями прогиба в направлении движения на измеряемой полосе движения;

г) выполняют однопробное нагружение дорожной одежды;

д) выполняют нагружение;

е) измеряют максимальную приложенную на дорожную одежду нагрузку;

ж) измеряют максимальные значения упругого прогиба дорожной одежды каждого из измерителей прогиба;

и) повторяют три раза операции, приведенные в перечислениях д)-ж);

к) при расхождении значений результатов трех измерений прогибов на одном измерителе прогиба более чем на 5% делают соответствующую отметку в протоколе испытаний и операции, приведенные в перечислениях а)-к) повторяют со смещением не менее чем на 2,0 м.

При выполнении измерений с целью оценки прочности по общему модулю упругости используют только значение упругого прогиба в центре приложения нагрузки.

Значения прогибов на каждом измерителе прогиба вычисляют как среднеарифметическое значение трех измерений без учета пробного нагружения.

В рамках исследований на всех слоях создавалась нагрузка, аналогичная статической.

При послойном устройстве конструкций дорожных одежд динамические испытания выполнялись начиная со слоя основания из ЩПС, т.к. заехать на слой из песка и выполнить испытания на нем установкой не представлялось возможным ввиду низкой прочности поверхности данного слоя.

2.3.9 Методика расчета модулей упругости материалов при послойных испытаниях

Модули упругости материалов слоев в конструкции могут быть определены различными расчетными методами.

Первым является определение модулей при послойных испытаниях по методике, аналогичной представленной в ВСН 46-83 [10] при помощи специальных номограмм (рисунок 23 и 24), представленным ГОСТ Р 59918 [23] и программных продуктов, реализуемых обратный расчет формулы (45) по определению общего модуля упругости на поверхности двухслойной конструкции:

$$E_{\text{общ}}^i = \frac{[1,05 - 0,1 \frac{h_i}{D} (1 - \sqrt{\frac{E_{\text{общ}}^{(i+1)}}{E_i}})] E_i}{0,71 \sqrt{\frac{E_{\text{общ}}^{(i+1)}}{E_i}} \arctan(\frac{1,35 h_3}{D}) + \frac{E_i}{E_{\text{общ}}^{(i+1)}} \frac{2}{\pi} \arctan(\frac{D}{h_3})} \quad (45)$$

$$\text{где } \frac{h_3}{D} = \frac{2 h_i}{D} \sqrt{\frac{E_i}{6 E_{\text{общ}}^{(i+1)}}},$$

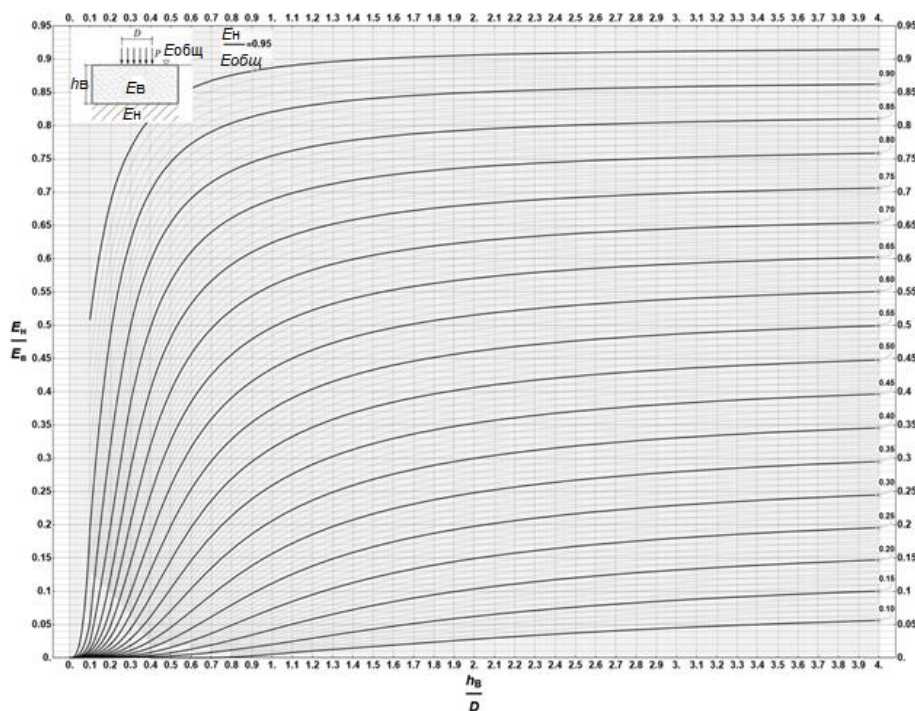
i - номер рассматриваемого слоя дорожной одежды, считая сверху вниз ($i = 1, 2, 3$);

h_i - толщина i -го слоя, см;

D - диаметр нагруженной площади, см;

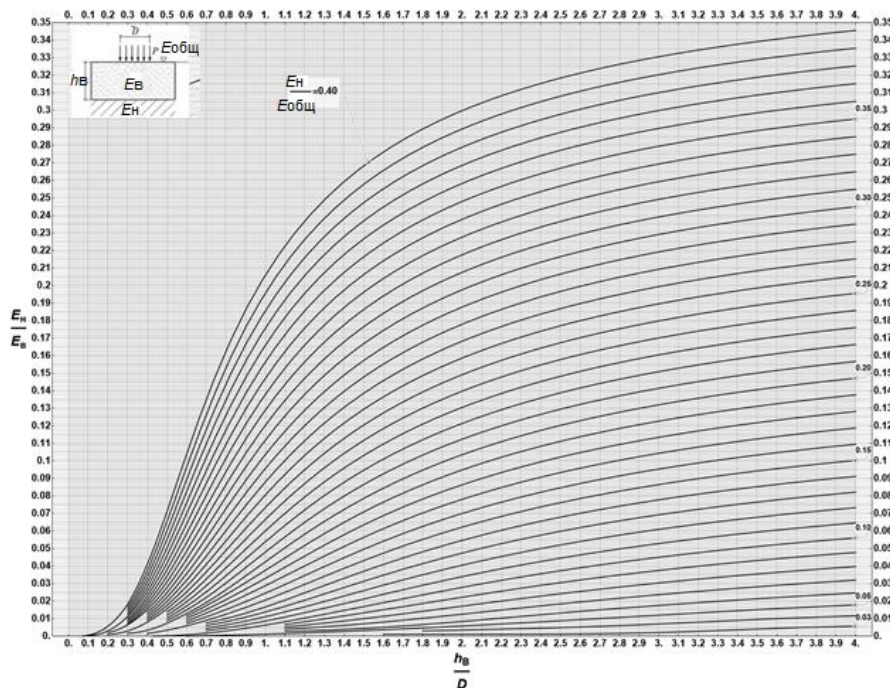
$E_{\text{общ}}^{(i+1)}$ - общий модуль упругости полупространства, подстилающего i -й слой, МПа;

E_i - модуль упругости материала i -го слоя, МПа.



$E_{\text{н}}$ – модуль упругости нижнего слоя; $E_{\text{в}}$ – модуль упругости верхнего слоя; D – диаметр нагрузочной плиты; $h_{\text{в}}$ – толщина верхнего слоя; p – удельное давление нагрузочной плиты в зоне контакта с покрытием; $E_{\text{общ}}$ – общий модуль упругости на поверхности верхнего слоя

Рисунок 23 – Номограмма для определения общего модуля упругости верхнего слоя двухслойной системы $E_{\text{в}}$ при $h_{\text{в}}/D = 0 - 4,0$



E_H – модуль упругости нижнего слоя; E_B – модуль упругости верхнего слоя;
 D – диаметр нагрузочной плиты; h_B – толщина верхнего слоя; p – удельное давление нагрузочной плиты в зоне контакта с покрытием; $E_{\text{общ}}$ – общий модуль упругости на поверхности верхнего слоя

Рисунок 24 – Укрупненная деталь номограммы для определения общего модуля упругости верхнего слоя двухслойной системы E_B при $h_B/D = 0 - 4,0$

Для расчета модуля упругости материала слоя в конструкции необходимы следующие параметры:

- общий модуль упругости на поверхности нижележащего слоя,
- толщина устраиваемого слоя,
- общий модуль упругости на поверхности устроенного слоя.

По полученным данным рассчитывается фактический модуль упругости материала в конструкции, который в последствии возможно сопоставить с проектным значением для данного материала и учесть при определении параметров НДС.

Также имеются возможности рассчитать модули упругости следующими методами:

- с использованием решения теории упругости для многослойного полупространства, нагруженного осесимметричной нагрузкой в виде круглого штампа ОДМ 218.3.1.005-2021 [58];
- с использованием решения теории упругости для многослойного полупространства с ограничением глубины сжимаемой толщи грунтов (СТГ).

При расчете упругого прогиба конструкции с помощью решения для многослойного полупространства общий модуль упругости конструкции определяется по формуле:

$$E_{\text{общ}} = \frac{p D (1 - \nu_{\text{ср}}^2)}{S_{\text{упр}}}, \quad (46)$$

где p – давление штампа на поверхность конструкции, МПа,
 D – расчетный диаметр отпечатка штампа, м;

- $\nu_{\text{ср}}$ – средний коэффициент Пуассона конструкции;
- $S_{\text{упр}}$ – расчетный упругий прогиб конструкции, вычисленный по решению для многослойного полупространства, нагруженного осесимметричной нагрузкой в виде круглого штампа, м.

В ходе расчета выполняется подбор модуля упругости верхнего слоя с использованием метода итераций, при котором выполняется условие: $E_{\text{общ}} = E_{\text{общ}}^V$

Величина упругого прогиба рассчитывается по формуле:

$$S_{\text{упр}} = \frac{p D (1 - \nu_{\text{ср}}^2)}{E_{\text{общ}}}, \quad (47)$$

При расчете упругого прогиба конструкции в пределах сжимаемой толщи грунта (СТГ) $h_{\text{СТГ}}$ общий модуль упругости конструкции определяется по формуле:

$$E_{\text{общ}} = \frac{p D (1 - \nu_{\text{ср}}^2)}{S_{\text{упр. СТГ}}}, \quad (48)$$

где $\nu_{\text{ср}}$ – средний коэффициент Пуассона конструкции в пределах сжимаемой толщи грунта;

$S_{\text{упр. СТГ}}$ – расчетный упругий прогиб конструкции, м, определяемый по формуле:

$$S_{\text{упр. СТГ}} = \frac{1}{E_{y1}} \int_{z=0}^{z=h_1} \sigma_{z1} dz + \frac{1}{E_{y2}} \int_{z=h_1}^{z=h_2} \sigma_{z2} dz + \frac{1}{E_{y3}} \int_{z=h_2}^{z=h_3} \sigma_{z3} dz + + \frac{1}{E_{y4}} \int_{z=h_3}^{z=h_4} \sigma_{z4} dz + \frac{1}{E_{y5}} \int_{z=h_4}^{z=h_5} \sigma_{z5} dz + \frac{1}{E_{y5}} \int_{z=h_5}^{z=h_{\text{СТГ}}} \sigma_{z6} dz, \quad (49)$$

где $\sigma_{z1}, \sigma_{z2},$ – вертикальные напряжения, возникающие в слоях №№ 1÷5 дорожной одежды и СТГ земляного полотна (№ 6) при воздействии расчетной нагрузки от колес, МПа;
 $\sigma_{z3}, \sigma_{z4},$
 σ_{z5}, σ_{z6}
 $E_{y1}, E_{y2},$ – модули упругости слоев №№ 1÷5 дорожной одежды и
 $E_{y3}, E_{y4},$ СТГ земляного полотна (№ 6), МПа;
 E_{y5}, E_{y6}
 $h_1, h_2,$ – толщины конструктивных слоев дорожной одежды №№ 1÷5 и сжимаемой толщи грунта земляного полотна ($h_{СТГ}$).
 $h_3, h_4,$
 $h_5, h_{СТГ}$

Нижняя граница СТГ земляного полотна принята на глубине $z = h_{СТГ}$, где выполняется условие:

$$\sigma_z = 0,05 \sigma_{zg} , \quad (50)$$

где σ_z – вертикальные напряжения, возникающие в слоях дорожной одежды и СТГ земляного полотна при воздействии расчетной нагрузки от колес, МПа;
 σ_{zg} – вертикальное эффективное напряжение от собственного веса слоев дорожной одежды и грунта земляного полотна, МПа, определяемое по формуле:

$$\sigma_{zg} = \int_{i=1}^n \gamma_i h_i - u(z), \quad (51)$$

где n – номер слоя дорожной одежды и грунта земляного полотна, в котором расположена рассматриваемая точка;
 γ_i – удельный вес i -го слоя дорожной одежды и грунта земляного полотна над рассматриваемой точкой, кН/м³;
 h_i – толщина i -го слоя дорожной одежды и грунта земляного полотна над рассматриваемой точкой, м;

$u(z)$ – природное поровое давление в рассматриваемой точке до начала строительства на глубине z от поверхности покрытия дорожной одежды, кПа.

В ходе расчета выполняется подбор модуля упругости верхнего слоя с использованием метода итераций, при котором выполняется условие:

$$E_{\text{общ}} = E_{\text{общ}}^V. \quad (52)$$

Таким образом, при достижении значения $E_{\text{общ}}^V$ величина упругого прогиба должна быть равна определенной по формуле:

$$S_{\text{упр. СТГ}} = \frac{p D (1 - \nu_{\text{ср}}^2)}{E_{\text{общ}}}, \quad (53)$$

ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ:

1. Разработана научно обоснованная конструкция физической модели для испытаний дорожных одежд (аналогична полосе движения на автомобильной дороге) позволяющая устраивать одновременно до 3 различных конструкций, исключая факторы влияния боковых стенок на результаты получаемых измерений.

2. С применением методов математического моделирования обоснованы минимальные размеры испытательной секции физической модели, обеспечивающие получение достоверных и точных результатов.

3. Разработаны схемы проведения испытаний, обеспечивающие возможность одновременного проведения испытаний на различных конструкциях нежестких дорожных одежд.

4. Разработаны схемы расположения измерительного оборудования (датчиков растягивающих и сжимающих напряжений и деформаций),

обеспечивающие получение информации о напряженно-деформированном состоянии в различных слоях дорожной одежды.

ГЛАВА 3. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСФАЛЬТОБЕТОНА НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

3.1 Послойное устройство асфальтобетонных слоев на испытательном стенде с исследованием параметров напряженно-деформированного состояния

2.2.1 Этапы послойного устройства физической модели.

Работы по устройству конструкций в специальном лотке выполнялись в следующей последовательности:

- устройство конструктивного слоя,
- уплотнение конструктивного слоя до требуемых параметров (толщина слой, степень уплотнения),
- закладка специальных датчиков напряжений и деформаций,
- проверка датчиков пробным нагружением.

Устройство и уплотнение слоя из песка представлено на рисунке 25.



Рисунок 25 – Устройство и уплотнение слоя из песка

Определение толщины слоя из песка при помощи геодезического оборудования представлено на рисунке 26.

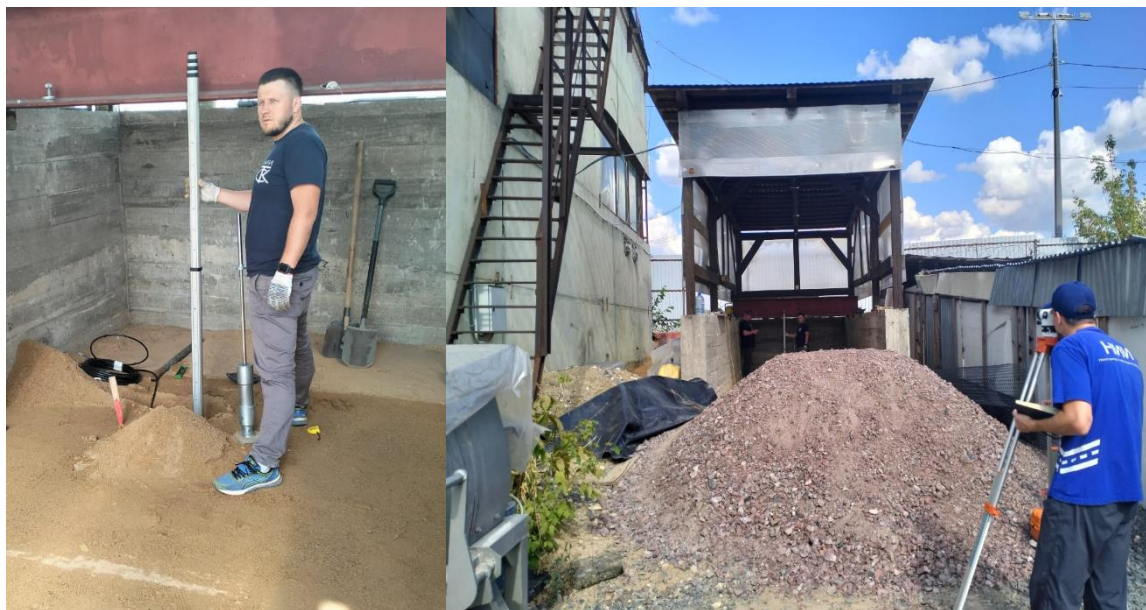


Рисунок 26 - Определение толщины слоя из песка при помощи геодезического оборудования

Монтаж датчиков напряжений в слой из песка представлен на рисунке 27.



Рисунок 27 - Монтаж датчиков напряжений в слой из песка

Общий вид слоя из песка после закладки датчиков, обратной засыпки и доуплотнения представлен на рисунке 28.



Рисунок 28 - Общий вид слоя из песка после закладки датчиков, обратной засыпки и доуплотнения

Технологические операции по устройству слоя из ЩПС представлены на рисунках 29-32.



Рисунок 29 – Распределение ЩПС



Рисунок 30— Установка датчика давления под слоем ЩПС



Рисунок 31— Засыпка датчика давления под слоем ЩПС



Рисунок 32 – Уплотнение конструктивного слоя из ЩПС

Монтаж датчиков деформаций на поверхности слоя из ЩПС представлен на рисунке 33.



Рисунок 33 - Монтаж датчиков деформаций на поверхности слоя из ЩПС

В качестве материала несущего слоя основания применялась укрепленная цементом щебеночно-песчаная смесь марки М60. Щебеночно-

песчаная смесь приготавливалась в смесителе путем добавления в ЩПС 0/45 воды и 4% цемента. Смесь приготавливалась в специальной смесительной установке в непосредственной близости от физической модели.

Приготовление ЩПС, укрепленной цементом по следующему алгоритму:

- перемешивание ЩПС в смесителе,
- добавление 4% цемента,
- добавление воды,
- перемешивание материалов.

Процесс приготовления ЩПС, укрепленной цементом 4% представлен на рисунке 34.



Рисунок 34 – Выгрузка ЩПС, укрепленной цементом, из смесительного барабана

Устройство слоя из ЩПС, обработанного 4% цемента (для конструкции 1) представлены на рисунках 42-43.



Рисунок 35 – Уплотнение слоя из ЩПС, укрепленного цементом (для конструкции 1)



Рисунок 36 – Общий вид слоя из ЩПС, укрепленного цементом после набора прочности (для конструкции 1)

Приготовление холодной органоминеральной смеси выполнялось в смесительной установке аналогично приготовлению ЩПС, укрепленной цементом по следующему алгоритму:

- смешивание минеральной части – 18% щебня различных фракций, 17% песка из отсева дробления, 65% переработанного асфальтобетона;

- добавление 4% цемента, перемешивание;
- добавление 4% битумной эмульсии, перемешивание;
- добавление воды, перемешивание всех материалов.

Устройство слоя основания из холодной органоминеральной смеси (для конструкции 2) представлено на рисунках 37-38.



Рисунок 37 - Устройство слоя основания из холодной органоминеральной смеси



Рисунок 38 - Слой основания из холодной органоминеральной смеси после уплотнения

Подгрунтовка слоя основания перед укладкой асфальтобетона и представлена на рисунке 39.



Рисунок 39 – Подгрунтовка слоя основания перед укладкой асфальтобетона

Монтаж датчиков деформаций на поверхности слоя основания представлен на рисунках 40-41.



Рисунок 40 – Монтаж датчиков деформаций на поверхности слоя основания



Рисунок 41 – Монтаж датчиков деформаций на поверхности слоя основания
Устройство слоев асфальтобетона представлено на рисунках 42-44.



Рисунок 42 – Распределение асфальтобетонной смеси

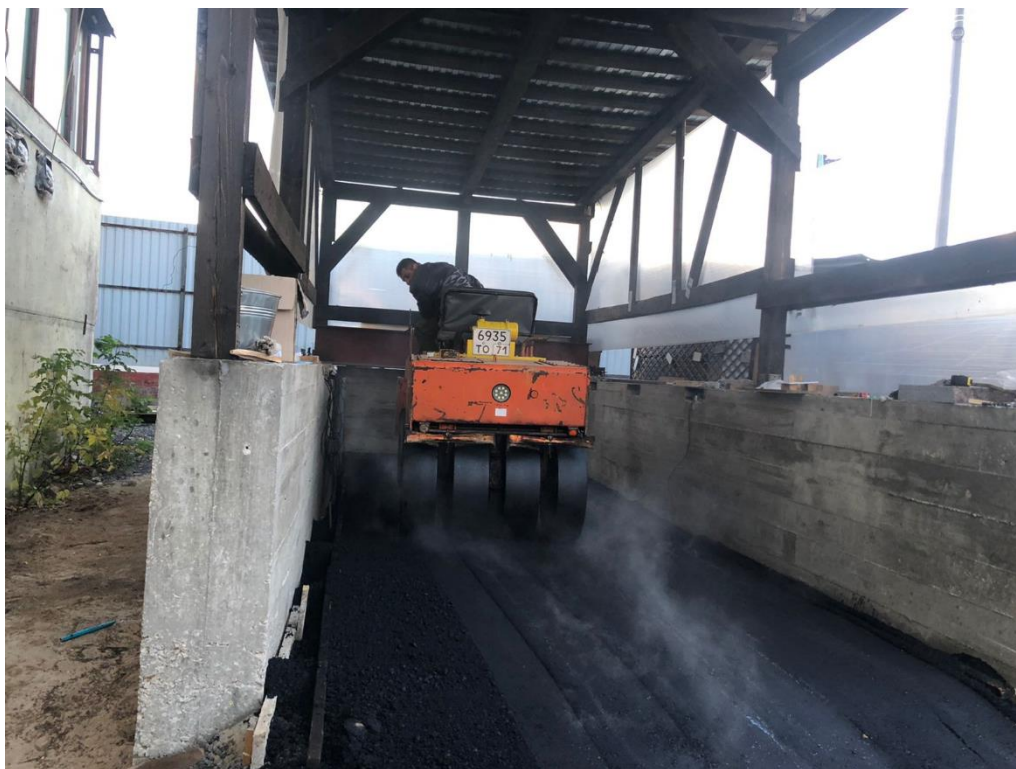
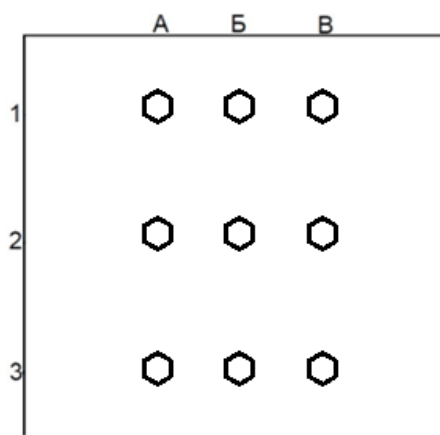


Рисунок 43 – Уплотнение асфальтобетонной смеси



Рисунок 44 – Уплотненный слой из асфальтобетона

Обе конструкции устроены размером 3 на 3 метра в створах 1 и 3
Общая схема створов (вид сверху) представлена на рисунке 45.



1,2,3 – измерительные створы; А, Б, В – точки измерения в одном створе

Рисунок 45 - Общая схема измерительных точек (вид сверху)

Схема расположения датчиков с фактическими толщинами конструктивных слоев (поперечный профиль) в створе 1 (конструкция 1) представлена на рисунке 46.

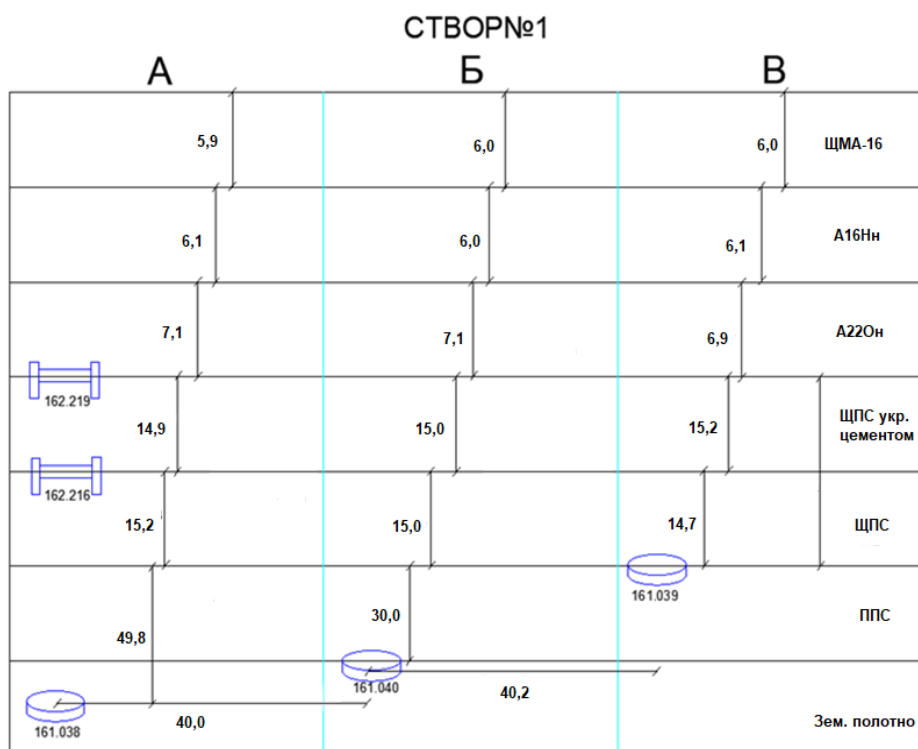


Рисунок 46 - Схема расположения датчиков с фактическими толщинами конструктивных слоев (поперечный профиль) в створе 1 (конструкция 1)

Схема расположения датчиков с фактическими толщинами конструктивных слоев (поперечный профиль) в створе 3 (конструкция 2) представлена на рисунке 47.

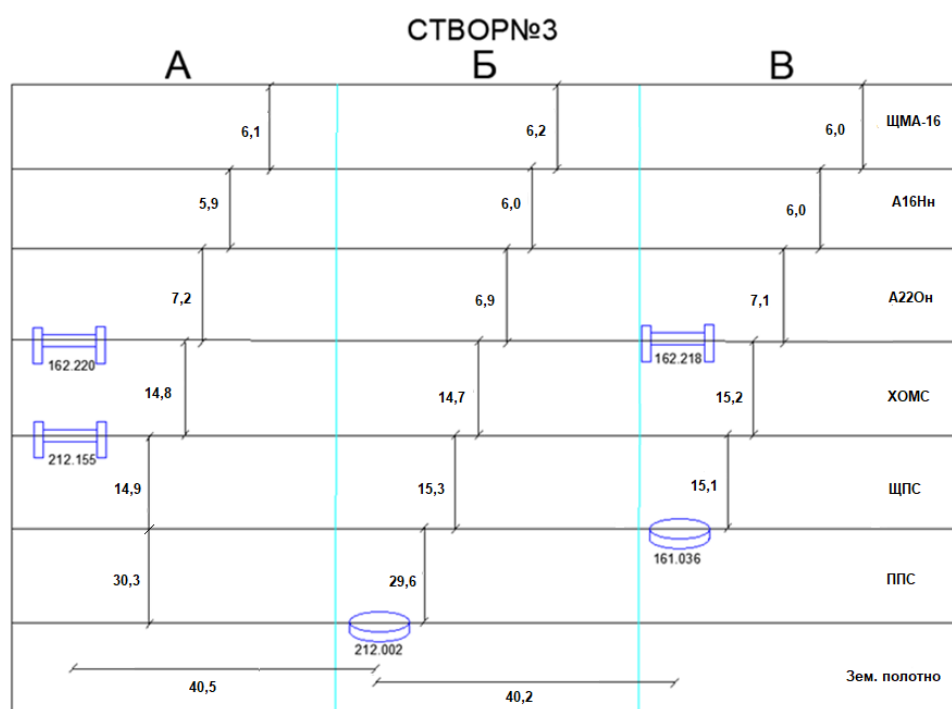


Рисунок 47 - Схема расположения датчиков с фактическими толщинами конструктивных слоев (поперечный профиль) в створе 3 (конструкция 2)

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

Все основные параметры конструкции которые будут приниматься для дальнейших расчетов приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Основные параметры устроенных конструкций

№ слоя	Толщина слоя, см	конструкция №1	конструкция №2
1	6,0	ЩМА-16 на ПБВ 60	ЩМА-16 на ПБВ 60
2	6,0	А16Нн на БНД 70/100	А16Нн на БНД 70/100
3	7,0	А22Он на БНД 70/100	А22Он на БНД 70/100
4	15,0	ЩПС укрепленная цементом	Органоминеральная смесь ХО 32 ЭМ
5	15,0	Щебеночно-песчаная смесь 0/45 мм	Щебеночно-песчаная смесь 0/45 мм
6	30,0	ППС (песок средний)	ППС (песок средний)
7	∞	Зем. полотно	Зем. полотно

2.2.1 Регистрация растягивающих деформаций на нижней границе асфальтобетонных слоев при тестовом нагружении

Выполнение послойных испытаний статическим и динамическим нагружением представлено на рисунках 48-50.



Рисунок 48 - Испытания на слое ЦПС



Рисунок 49 - Испытания на слое основания из укрепленных материалов

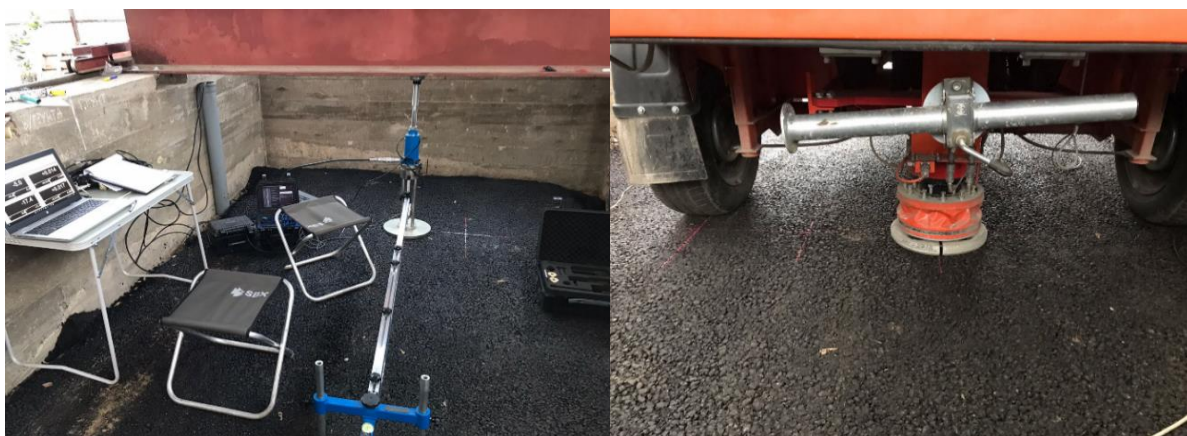


Рисунок 50 - Испытания на слоях асфальтобетона

По результатам послойных испытаний определялись модули упругости на поверхности каждого слоя по методике. Далее исходя из фактической толщины конструктивного слоя и модулей на поверхности каждого слоя по методике, представленной в п. 2.3.9 рассчитывались модули упругости материала каждого конструктивного слоя. Для анализа полученных результатов фактические модули упругости сопоставлялись со значениями, представленными в нормативно-технических документах, посвященных проектированию.

Сводные результаты определения модулей упругости материалов на конструкции 1 представлены в таблице 8. Испытания конструктивных слоев из асфальтобетона выполнялись при температуре 10°C, являющейся расчетной при проектировании по критерию упругого прогиба.

Таблица 8 - Сводные результаты определения модулей упругости материалов на конструкции №1

Материал слоя	Толщина, см	Фактический модуль упругости при статическом нагружении, МПа	Фактический модуль упругости при динамическом нагружении, МПа	Проектный модуль упругости при статическом нагружении, МПа	Проектный модуль упругости при статическом нагружении, МПа
ЩМА-16 на ПБВ 60	6,0	510	6800	-	3550
А16Нн на БНД 70/100	6,0	540	8000	-	4150
А22Он на БНД 70/100	7,0	715	7000	-	3250
ЩПС, укрепленная цементом	15,0	1320	3329	800	800
щебеночно-песчаная смесь 0/45 мм	15,0	361	--	265	265
Песок средний	30,0	172,9	-	120	120

Сводные результаты определения модулей упругости материалов на конструкции 2 представлены в таблице 9. Испытания конструктивных слоев из асфальтобетона выполнялись при температуре 10°C, являющейся расчетной при проектировании по критерию упругого прогиба.

Таблица 9 - Сводные результаты определения модулей упругости материалов на конструкции №2

Материал слоя	Толщина, см	Фактический модуль упругости при статическом нагружении, МПа	Фактический модуль упругости при динамическом нагружении, МПа	Проектный модуль упругости при статическом нагружении, МПа	Проектный модуль упругости при статическом нагружении, МПа
ЩМА-16 на ПБВ 60	6,0	510	6700	-	3550
А16Нн на БНД 70/100	6,0	540	8000	-	4150
А22Он на БНД 70/100	7,0	715	6800	-	3250
ХО 32 ЭМ	15,0	763	3142	1000	1000
щебеночно-песчаная смесь 0/45 мм	15,0	376	--	265	265
Песок средний	30,0	172	-	120	120

Результаты испытаний показали наличие отличий фактических модулей упругости материалов с теоретическими, принимаемыми при проектировании. Особенно отличие заметно для укрепленных материалов слоев основания. При этом, для слоя из ХОМС и ЩПС укрепленной цементом, при проектировании, в настоящее время принимаются одинаковые модули упругости на статику и динамику. Результаты испытаний показывают, что модули значительно зависят от времени приложения нагрузки: в статике результаты значительно ниже, чем в динамике. Также вызывает интерес достаточно низкий модуль щебеночно-мастичного асфальтобетона при статическом нагружении. Модули упругости в определяющей степени влияют на параметры НДС и в дальнейшем при расчетах по анализу параметров НДС будут учитываться фактические результаты.

Полученные результаты также могут свидетельствовать о некоторых недостатках расчетной модели при выполнении определения модуля упругости тонких слоев из асфальтобетона. Полученные результаты от слоя к слою имеют значительный разброс что может свидетельствовать о необходимости дополнительного анализа, например, расчета

средневзвешенного модуля упругости пакета слоев из асфальтобетона по результатам замеров модуля на поверхности нижележащего слоя и замеров модуля на поверхности пакета слоев.

Сводные результаты испытаний по оценке НДС на слое ВСП конструкции 1 статическим нагружением при температуре асфальтобетона 10°C представлены в таблице 10.

Сводные результаты испытаний по оценке НДС на слое ВСП конструкции 1 динамическим нагружением при температуре асфальтобетона 10°C представлены в таблице 11.

Таблица 10 - Сводные результаты испытаний по оценке НДС на слое ВСП на конструкции 1 статическим нагружением при температуре асфальтобетона 10°C

Показатель при статическом нагружении	Значение показателя
Общий упругости на поверхности, МПа	456
Давление на поверхности ППС МПа % от давления на поверхности	<u>0,051</u> 6,4
Давление на поверхности рабочего слоя от статической нагрузки МПа % от давления на поверхности	<u>0,023</u> 2,8
Растяжение на границе нижнего слоя из асфальтобетона от статической нагрузки, МикроСтрейн (10^{-4} мм)	85,1

Таблица 11 - Сводные результаты испытаний по оценке НДС на слое ВСП конструкции 1 динамическим нагружением при температуре асфальтобетона 10°C

Показатель при динамическом нагружении	Значение показателя
Общий упругости на поверхности, МПа	1108
Давление на поверхности ППС МПа % от давления на поверхности	<u>0,014</u> 1,7
Давление на поверхности рабочего слоя от статической нагрузки МПа % от давления на поверхности	<u>0,009</u> 1,1
Растяжение на границе нижнего слоя из асфальтобетона от статической нагрузки, МикроСтрейн (10^{-4} мм)	36,6

Сводные результаты испытаний по оценке НДС на слое ВСП конструкции 2 статическим нагружением при температуре асфальтобетона 10°C представлены в таблице 12.

Сводные результаты испытаний по оценке НДС на слое ВСП конструкции 2 динамическим нагружением при температуре асфальтобетона 10°C представлены в таблице 13.

Таблица 12 - Сводные результаты испытаний по оценке НДС на слое ВСП на конструкции 2 статическим нагружением при температуре асфальтобетона 10°C

Показатель при статическом нагружении	Значение показателя
Общий упругости на поверхности, МПа	536
Давление на поверхности ППС МПа % от давления на поверхности	<u>0,046</u> 5,7
Давление на поверхности рабочего слоя от статической нагрузки МПа % от давления на поверхности	<u>0,025</u> 3,1
Растяжение на границе нижнего слоя из асфальтобетона от статической нагрузки, МикроСтрейн (10^{-4} мм)	64,5

Таблица 13 - Сводные результаты испытаний по оценке НДС на слое ВСП конструкции 2 динамическим нагружением при температуре асфальтобетона 10°C

Показатель при динамическом нагружении	Значение показателя
Общий упругости на поверхности, МПа	1109
Давление на поверхности ППС МПа % от давления на поверхности	<u>0,018</u> 2,2
Давление на поверхности рабочего слоя от статической нагрузки МПа % от давления на поверхности	<u>0,009</u> 1,3
Растяжение на границе нижнего слоя из асфальтобетона от статической нагрузки, МикроСтрейн (10^{-4} мм)	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

3.2 Описание методик определения расчетных характеристик асфальтобетонов в лабораторных условиях

3.1.1 Методика определения динамического модуля упругости асфальтобетона с применением установки АМРТ [17]

В качестве испытательной машины применялась универсальная динамическая установка DTS-130 с испытательным модулем аналогичном прибору АМРТ. Установка АМРТ позволяет определить модуль упругости асфальтобетона во всем температурном диапазоне от 0 °С до 50 °С, и в различном частотном диапазоне от 0,1 Гц до 25 Гц. Различные частоты позволяют прогнозировать поведение асфальтобетона под воздействием высокоскоростного и низкоскоростного движения транспортного потока, чего не учтено в отечественных методах проектирования дорожных одежд.

Для приготовления испытуемых образцов необходимо в соответствии с ГОСТ Р 58401.14 [16] приготовить цилиндрические образцы на вращательном уплотнителе высотой около 180 мм и диаметром 150 мм, с содержанием воздушных пустот равным 7 %.

Необходимо отметить, что фактическое содержание воздушных пустот в испытуемых образцах после выбурирования, как правило выше на 0,5 - 1 %, чем в образцах до выбурирования. Поэтому массу пробы асфальтобетонной смеси для приготовления образцов на вращательном уплотнителе необходимо подобрать, таким образом, чтобы в образцах до выбурирования содержание воздушных пустот было несколько выше, чем требуется.

Далее из уплотненных образцов высотой около 180 мм и диаметром 150 мм с помощью буровой установки выбуривались испытуемые образцы диаметром 100 мм после чего на отрезном станке высота испытуемых образцов была доведена до 150 мм.

Перед испытанием по определению модуля упругости необходимо заранее приклеить металлические цилиндры к боковым поверхностям

испытуемого образца эпоксидным клеем, используя специальное центрирующее устройство для приклеивания металлических цилиндров. Металлические цилиндры приклеиваются таким образом, чтобы расстояние между ними по высоте образца составляло 7 см.

После подготовительных работ испытуемые образцы помещались в испытательную камеру установки DTS-130, к металлическим цилиндрам прикреплялись высокоточные датчики линейной деформации (рисунок 51) и устанавливалась требуемая температура испытания. При требуемой температуре образцы выдерживались в течение четырех часов для стабилизации температуры по всему объему асфальтобетонного образца.



Рисунок 51 – Испытательный модуль в соответствии с установкой АМРТ с подготовленным образцом асфальтобетона и прикрепленными датчиками линейной деформации

При проведении исследований, для исключения влияния на результаты осевой деформации образцов, температуру испытания устанавливали от наименьшей к наибольшей (сначала 0 °С, затем 10 °С, 20 °С, 30 °С, 40°С и 50°С). При каждой температуре испытания к образцу прикладывают циклическую гаверсинусоидальную нагрузку от самой высокой до самой низкой частоты (сначала 25Гц, затем 10 Гц, 5 Гц, 1 Гц, 0,5 Гц и 0,1 Гц).

В соответствии с программным обеспечением установка самостоятельно, в зависимости от испытываемой частоты подбирает режим нагружения при котором поведение асфальтобетона характеризуется как упругое и проводит испытание по всем представленным частотам. Таким образом испытание проводится при каждой температуре.

Модуль упругости и фазовый угол, при выбранной частоте, рассчитывается по формулам (54) и (55):

$$\theta(\omega) = \bar{\theta}_{\epsilon} - \theta_{\sigma}, \quad (54)$$

$$|E^*(\omega)| = \frac{|\sigma^*|}{|\epsilon^*|} \quad (55)$$

где $\bar{\theta}_{\epsilon}$ – средний фазовый угол всех датчиков деформации, град.,

θ_{σ} – фазовый угол напряжения, град.,

$\theta(\omega)$ – фазовый угол между напряжением и деформацией при частоте, град.,

$|\sigma^*|$ – величина напряжения, кПа,

$|\epsilon^*|$ – средняя величина деформации, мкм/м,

$|E^*(\omega)|$ – динамический модуль при частоте ω , кПа.

Для определения модуля упругости испытывают, не менее трех образцов. За значение модуля упругости принимают среднее арифметическое значение. Расхождения между данными параллельных испытаний не должны превышать 20 %.

3.1.2 Методика определения кратковременного модуля упругости асфальтобетона с применением прибора по типу маятникового прибора ГосдорНИИ по [10]

Прочность асфальтобетона на растяжение при изгибе и модуль упругости при температурах от 0 °С до 20 °С определяют по результатам

испытаний образцов-балочек. Образцы должны иметь квадратное сечение с высотой и шириной 40 мм и длину 160 мм.

Испытательная установка должна обеспечивать возможность приложения нагрузки длительностью действия 0,1 секунды, с перерывами между нагружениями не менее чем в 10 раз превышающими продолжительность воздействия нагрузки. В качестве испытательной установки в рамках проведения лабораторных испытаний применялась современная универсальная динамическая испытательная установка DTS-130, для которой было изготовлено испытательное устройство аналогичное устройству, описанному в ВСН 46-83 (рисунок 52).

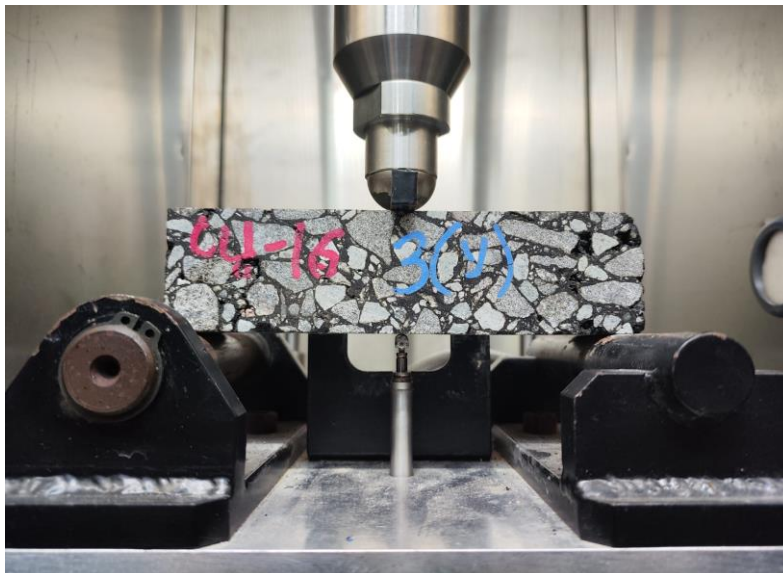


Рисунок 52 - Универсальная динамическая испытательная установка DTS-130 с устройством для определения модуля упругости

Для получения испытуемых образцов изготавливать их путем уплотнения на вальцовом уплотнителе в соответствии с ГОСТ Р 58406.4 [20] с последующей распиловкой уплотненных образцов-плит до необходимых размеров (40 x 40 x 160 мм).

В процессе испытания по определению кратковременного модуля упругости к образцу прикладывается кратковременная нагрузка длительностью от 0,1 до 0,2 секунды равная от 20 до 30 % от разрушающей.

Для определения разрушающей нагрузки и предела прочности на растяжение при изгибе образцы испытывались на универсальной установке

DTS-130 со скоростью деформирования 100 мм/мин при всех температурах (рисунок 53).



Рисунок 53 – Определение предела прочности на растяжение при изгибе образцов-балочек

Перед испытанием образцы выдерживались в течение двух часов при заданной температуре.

После термостатирования образцов их укладывают боковой гранью на две опоры, удаленные друг от друга на расстояние 14 см. Одна из опор - подвижная, в виде шарнира. Часть опоры, соприкасающаяся с образцом, имеет цилиндрическую поверхность радиусом 5 мм. Нагрузку прикладывают к середине образца через стальную пластину.

Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа определяется по формуле (56)

$$R_{\text{изг}} = \frac{3 \times P_p \times l}{2 \times b \times h^2} 10^{-2} \quad (56)$$

где P_p – разрушающая нагрузка, Н,

l – расстояние между опорами, см,

b – ширина образца, см,

h – высота образца, см.

За результат испытания принимают среднее арифметическое значение предела прочности на растяжение при изгибе трех образцов.

Для определения кратковременного модуля упругости к образцу прикладывается циклическая гаверсинусоидальная кратковременная нагрузка длительностью от 0,1 до 0,2 секунды равная от 20 до 30 % от разрушающей, количество циклов испытания равно 20.

Для определения модуля упругости используют среднеарифметическое значение упругого прогиба, измеренного после 10 циклов предварительных повторных нагружений. Проводят не менее пяти основных нагружений, затем образец переворачивают на 90° и проводят еще не менее десяти нагружений.

Кратковременный модуль упругости, Е, МПа, рассчитывают по формуле (57)

$$E = \frac{K_t \times P \times l^3}{48 \times f \times j} 10^{-2}, \quad (57)$$

где K_t - поправка, определяемые по формуле (58),

P - вертикальная нагрузка, Н,

l - расчетный пролет балочки, равный 14 см,

f - упругий прогиб балочки, см,

j - момент инерции сечения образца, см.

При испытании фактическое время приложения нагрузки может отличаться от расчетного (0,1 с), поэтому при необходимости следует ввести поправку K_t , которая рассчитывается по формуле (58):

$$K_t = \sqrt[3]{\frac{t_p}{t_\phi}}, \quad (58)$$

где t_p – расчетное время приложения нагрузки, равное 0,1 с,

t_ϕ – фактическое время приложения нагрузки, с.

При проведении испытаний необходимо учитывать возможное возникновение упругого обмятия образца на опорах и упругую податливость опор. Поправку на упругое обмятие определяют по результатам дополнительных испытаний.

После испытания на изгиб и измерения общего вертикального смещения низа образца, обусловленного не только изгибом, но и упругим обмятием образца в зонах контакта с опорами проводят дополнительное испытание. Проведение испытания на определение упругого обмятия на опорах представлено на рисунке 54.

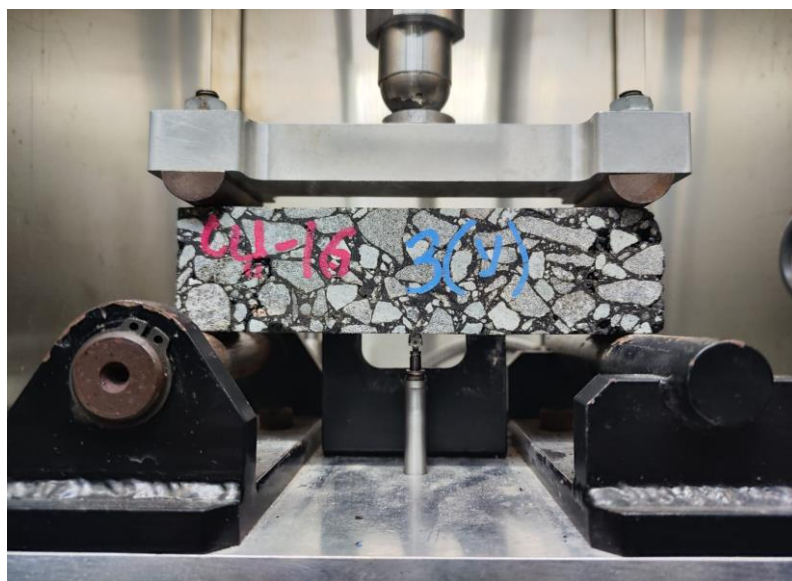


Рисунок 54 - Проведение испытания на определение упругого обмятия на опорах

Для определения упругого обмятия поверх образца-балочки на укладывают жесткую стальную балку с двумя нагрузочными элементами и нагружают ее такой же нагрузкой, как при проведении испытаний для определения упругого прогиба. При этом асфальтобетонная балочка не должна изгибаться, а только обратимо смещается в вертикальном направлении.

Скорректированный расчетный упругий прогиб, f , см, определяется по формуле (59).

$$f = f_{\text{изм}} - f_{\text{доп}}, \quad (59)$$

где f – скорректированный расчетный прогиб, см,

$f_{\text{изм}}$ – первоначально измеренный прогиб, см,

$f_{\text{доп}}$ – дополнительное смещение, определяемое по результатам испытания со стальной балкой, см.

Для определения модуля упругости испытывают, не менее трех образцов. За значение модуля упругости принимают среднее арифметическое значение. Расхождения между данными параллельных испытаний не должны превышать 20 %.

3.1.3 Методика определения прочности асфальтобетона при изгибе по ВСН 46-83

Для определения разрушающей нагрузки и предела прочности на растяжение при изгибе образцы испытывались на универсальной установке DTS-130 со скоростью деформирования 100 мм/мин при всех температурах (рисунок 55).



Рисунок 55 – Определение предела прочности на растяжение при изгибе образцов-балочек

Перед испытанием образцы выдерживались в течение двух часов при заданной температуре.

После термостатирования образцов их укладывают боковой гранью на две опоры, удаленные друг от друга на расстояние 14 см. Одна из опор – подвижная, в виде шарнира. Часть опоры, соприкасающаяся с образцом, имеет

цилиндрическую поверхность радиусом 5 мм. Нагрузку прикладывают к середине образца через стальную пластину.

Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа определяется по формуле (60)

$$R_{\text{изг}} = \frac{3 \times P_p \times l}{2 \times b \times h^2} 10^{-2} \quad (60)$$

где P_p – разрушающая нагрузка, Н,

l – расстояние между опорами, см,

b – ширина образца, см,

h – высота образца, см.

За результат испытания принимают среднее арифметическое значение предела прочности на растяжение при изгибе трех образцов.

3.1.5 Методика определения усталостной долговечности асфальтобетона при непрямом растяжении цилиндрических образцов (ITFT)

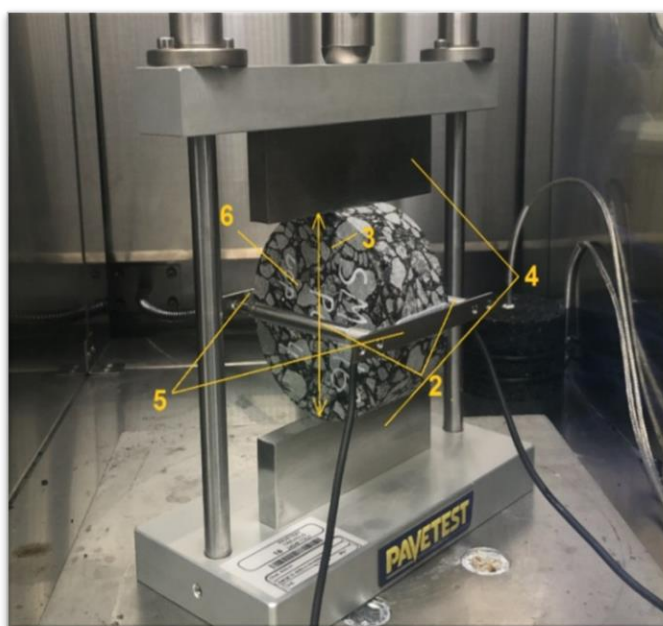
Данная методика выбрана для работы на основе проведённых ранее исследований, описанных в [66] которые показали ее качественное преимущество перед альтернативной методикой четырехточечного изгиба.

В соответствии с данной методикой допустимо использовать цилиндрические образцы, изготовленные в лаборатории или отобранные из уплотненного слоя дорожной одежды. Образец в форме цилиндра должен подвергаться многократным сжимающим нагрузкам гаверсинусоидального вида через вертикальную диаметрально плоскость. Такое нагружение приводит к появлению повторяющихся импульсов растягивающего напряжения, перпендикулярных направлению приложенной нагрузки, которые вызывают разрушение образца из-за растрескивания вдоль центральной части вертикального диаметра.

Усталостная долговечность должна быть определена как общее количество приложений нагрузки до того момента, как произойдет растрескивание образца.

Испытуемые цилиндрические образцы должны быть толщиной не менее 40 мм и диаметром (100 ± 3) мм для максимального размера зерен заполнителя в смеси до 22,4 мм или толщиной не менее 60 мм и диаметром (150 ± 3) мм для максимального размера зерен 22,4 мм и более. Испытуемые цилиндрические образцы готовятся из асфальтобетонных заготовок в возрасте не менее одной недели.

Образец помещают в нагрузочное устройство таким образом, чтобы оси изогнутых полос деформации были перпендикулярны осям нагружающих пластин как показано на рисунке 56.



1 – нагружающий шток; 2 – датчики перемещения LVDT; 3 – ось нагружения (вертикальная); 4 – нагрузочные элементы с вогнутой поверхностью; 5 – деформационные полосы; 6 – испытуемый образец асфальтобетона

Рисунок 56 – Схема испытательного устройства для непрямого растяжения

Испытание должно охватывать по крайней мере диапазон деформаций от 100 до 400 микродеформаций, при этом долговечность испытуемого образца должна находиться в диапазоне от 10^3 до 10^6 циклов.

Во время проведения испытаний, нагрузки и горизонтальные деформации, должны контролироваться постоянно с периодичностью предварительно заданных в испытательной установке интервалов времени.

Испытания начинаются от амплитуды нагрузки 250 кПа. Повторяющаяся синусоидальная нагрузка должна прикладываться в течение 0,1 секунды с периодом релаксации 0,4 секунды. Если деформация на экране монитора в течение первых 10 приложений нагрузки вне допустимого диапазона деформаций (100 до 400) микродеформаций, испытание должно быть приостановлено для корректировки уровня нагружения.

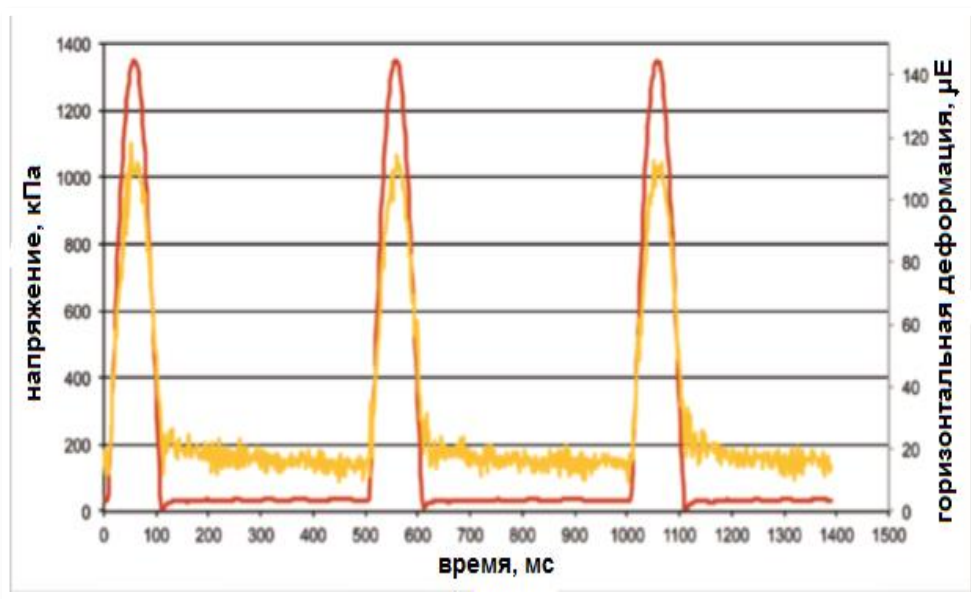


Рисунок 57 – График, описывающий приложение повторяющихся циклов нагружения на образец при непрямом растяжении

В ГОСТ Р 59280 [21] указано, что 250 кПа подходящий начальный уровень напряжения для большинства испытываемых образцов. Опытные операторы могут выбирать подходящий начальный уровень напряжения, а зависимости от известных свойств исследуемого асфальтобетона.

Испытание прекращают при появлении видимой вертикальной трещины на образующей поверхности образца либо при увеличении первоначальной деформации (определенной при сотом цикле нагружения) вдвое.

После испытания как минимум трех образцов при выбранном начальном уровне нагружения проводят испытания на следующих образцах с более высоким уровнем нагружения.

Испытание проводят при минимуме трех уровнях нагружения. Например, начальном - 250 кПа, затем при 300 кПа, затем при 350 кПа. На каждом уровне испытывают не менее трех образцов.

Усталостная долговечность так же может быть определена как момент, когда деформация увеличивается в два раза от своего первоначального значения (E_0), которое вычисляется по формуле:

$$E_0 = 2,1 \times \frac{\Delta H}{\Omega} \quad (61)$$

где ΔH – горизонтальная деформация в центре образца, мм,

Ω – диаметр образца, мм.

Критерий усталости для отдельных смесей должны быть определены из испытанных образцов. Отношения наименьших квадратов регрессии, должны быть установлены на данных логарифмов начальной деформации в качестве независимой переменной и данными логарифма срока разрушения в качестве зависимой переменной в соответствии со следующими уравнениями:

$$\lg(N_f) = k + n \times \lg(E_0) \quad (62)$$

$$N_f = k \times \left(\frac{1}{E_0}\right)^n \quad (63)$$

где N_f - количество приложений нагрузки,

k и n - константы для материала; не нашел их в тексте,

E_0 - деформация растяжения в центре образца, мм.

В случае, если коэффициент корреляции (R^2) менее 0,9 необходимо увеличить количество образцов для дополнительных испытаний.

3.3 Проведение комплекса исследований по определению расчетных характеристик асфальтобетонов примененных при устройстве конструкций дорожных одежд на физической модели

3.2.1 Исследование модуля упругости асфальтобетона при динамическом нагружении с применением прибора по типу АМРТ

Результаты определения модулей упругости асфальтобетонных смесей, уложенных на физической модели дорожной одежды при различных температурах и различных частотах нагружения представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Модули упругости асфальтобетонных смесей при различных температурах и частотах нагружения

Температура испытания, °С	Частота нагружения, Гц	A22Он	A16Нн	ЩМА-16
		Модуль упругости, МПа	Модуль упругости, МПа	Модуль упругости, МПа
0	25	14544	15440	14686
	10	13694	14443	13548
	5	13015	13630	12633
	1	11339	11579	10387
	0,5	10583	10643	9398
	0,1	8789	8426	7166
10	25	10371	11200	10499
	10	9350	9949	9194
	5	8574	8991	8218
	1	6803	6812	6090
	0,5	6071	5927	5265
	0,1	4497	4088	3631
20	25	6162	6755	6458
	10	5236	5599	5345
	5	4578	4788	4583
	1	3224	3170	3113
	0,5	2725	2601	2610
	0,1	1772	1574	1717
30	25	2963	3323	3512
	10	2351	2561	2792
	5	1950	2076	2335
	1	1214	1227	1536
	0,5	975	966	1285
	0,1	567	546	866
40	25	1168	1388	1824
	10	870	1015	1438
	5	690	796	1205
	1	392	449	817
	0,5	304	351	699
	0,1	167	202	506
50	25	403	545	991
	10	289	393	799
	5	223	308	685
	1	122	179	497
	0,5	95	144	440
	0,1	53	90	346

3.2.2 Исследование модуля упругости асфальтобетона с применением прибора по типу маятникового прибора ГосдорНИИ.

Результаты определения модулей упругости асфальтобетонных смесей, уложенных на физической модели дорожной одежды при различных температурах представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Кратковременные модули упругости асфальтобетонных смесей уложенных на физической модели при различных температурах

Вид/тип асфальтобетона	Температура испытания, °С	Модуль упругости, МПа
А22Он	0	12056
	10	5944
	20	3437
	30	1634
	40	811
	50	403
А16Нн	0	12224
	10	5745
	20	3007
	30	1497
	40	758
	50	384
ЩМА-16	0	11235
	10	5603
	20	3475
	30	1845
	40	1023
	50	567

3.2.2 Исследование прочности асфальтобетона при изгибе по ВСН 46-83

Результаты определения предела прочности при изгибе асфальтобетонных смесей, уложенных на физической модели дорожной одежды при различных температурах представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Предел прочности при изгибе асфальтобетонных смесей уложенных на физической модели при различных температурах

Вид/тип асфальтобетона	Температура испытания, °С	Предел прочности при изгибе, МПа
А22Он	0	10,6
	10	10,9
	20	6,2
	30	3,1
	40	1,8

	50	0,8
А16Нн	0	10,9
	10	10,9
	20	5,4
	30	2,3
	40	1,3
	50	0,6
ЩМА-16	0	12,5
	10	12,7
	20	6
	30	2,8
	40	1,5
	50	0,7

3.2.4 Исследование усталостной долговечности асфальтобетона по методике непрямого растяжения цилиндрических образцов (ITFT)

Результаты определения усталостной долговечности асфальтобетонных смесей, уложенных на физической модели дорожной одежды при различных уровнях нагружения представлены в таблицах 17-19.

Таблица 17 – Результаты испытаний асфальтобетонной смеси А22Он

Асфальтобетонная смесь	Номер образца	$\epsilon_{нач}$, мк	N_f , циклы	$\ln(\epsilon_{нач})$	$\ln(N_f)$
А22Он	I	111	78913	4,709530201	11,27610126
	II	119	108673	4,779123493	11,59609865
	III	114	153387	4,736198448	11,94071942
	IV	167	13040	5,117993812	9,475776835
	V	131	16280	4,875197323	9,69769264
	VI	143	18256	4,96284463	9,812249072
	VII	231	5257	5,442417711	8,567315801
	VIII	203	3873	5,313205979	8,26178468
	IX	271	1377	5,602118821	7,227662499

Таблица 18 – Результаты испытаний асфальтобетонной смеси А16Нн

Асфальтобетонная смесь	Номер образца	$\epsilon_{нач},$ мк	$N_f,$ циклы	$\ln(\epsilon_{нач})$	$\ln(N_f)$
А16Нн	I	133	73931	4,890349128	11,2108875
	II	138	56774	4,927253685	10,94683375
	III	140	58934	4,941642423	10,98417345
	IV	157	15499	5,056245805	9,648530785
	V	170	11776	5,135798437	9,373818841
	VI	162	20795	5,087596335	9,942467852
	VII	298	1978	5,697093487	7,589841512
	VIII	273	1732	5,609471795	7,457032089
	IX	280	1587	5,634789603	7,369600721

Таблица 19 – Результаты испытаний асфальтобетонной смеси ЦМА-16

Асфальтобетонная смесь	Номер образца	$\epsilon_{нач},$ мк	$N_f,$ циклы	$\ln(\epsilon_{нач})$	$\ln(N_f)$
ЦМА-16	I	123	103617	4,812184355	11,54845669
	II	135	87651	4,905274778	11,3811183
	III	126	85365	4,836281907	11,35469146
	IV	204	10439	5,318119994	9,253304071
	V	212	5225	5,356586275	8,561210077
	VI	199	8965	5,293304825	9,101083386
	VII	275	3392	5,616771098	8,129174997
	VIII	262	2703	5,568344504	7,902117546
	IX	269	2996	5,59471138	8,005033345

3.3 Анализ результатов испытаний

3.3.1 Для сравнения модулей упругости, полученных различными методиками, были построены графики зависимости модуля упругости от частоты представленные на рисунках 58-60.

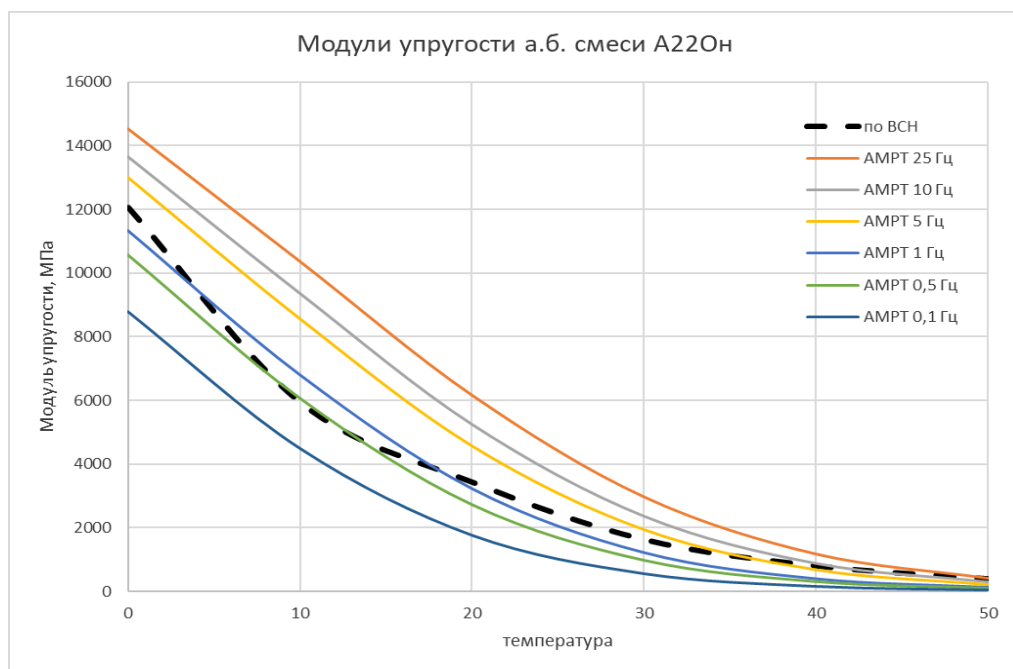


Рисунок 58 - Зависимости между модулем упругости и температурой асфальтобетонной смеси А22Он, по методике из ВСН 46-83 и по ГОСТ Р 58401.21 [32] (АМРТ) при различных частотах нагружения

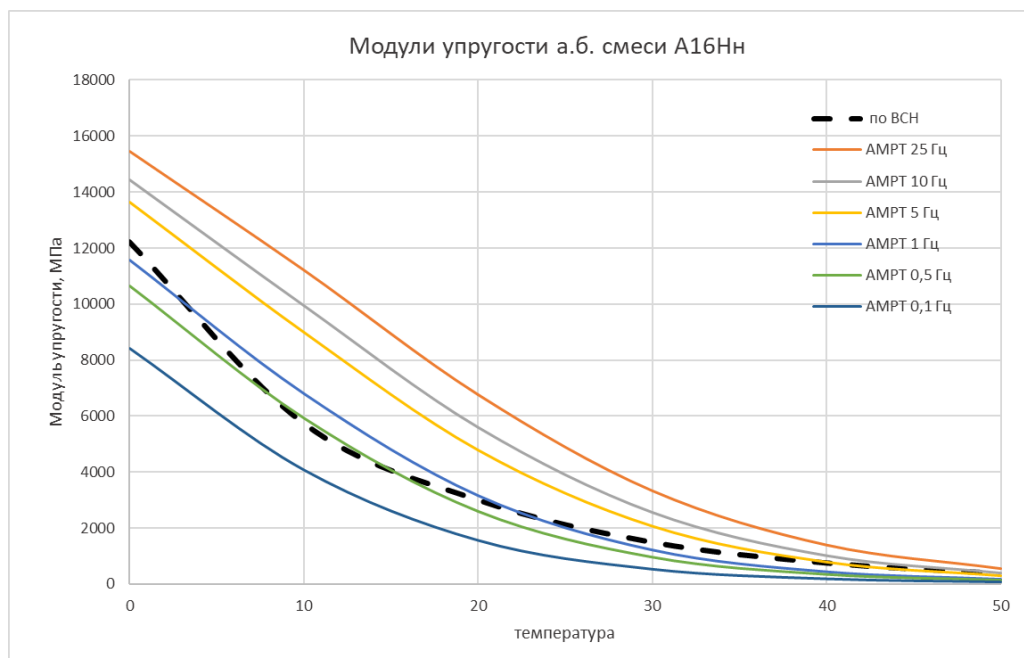


Рисунок 59 - Зависимости между модулем упругости и температурой асфальтобетонной смеси А16Нн, по методике из ВСН 46-83 и по ГОСТ Р 58401.21 (АМРТ) при различных частотах нагружения

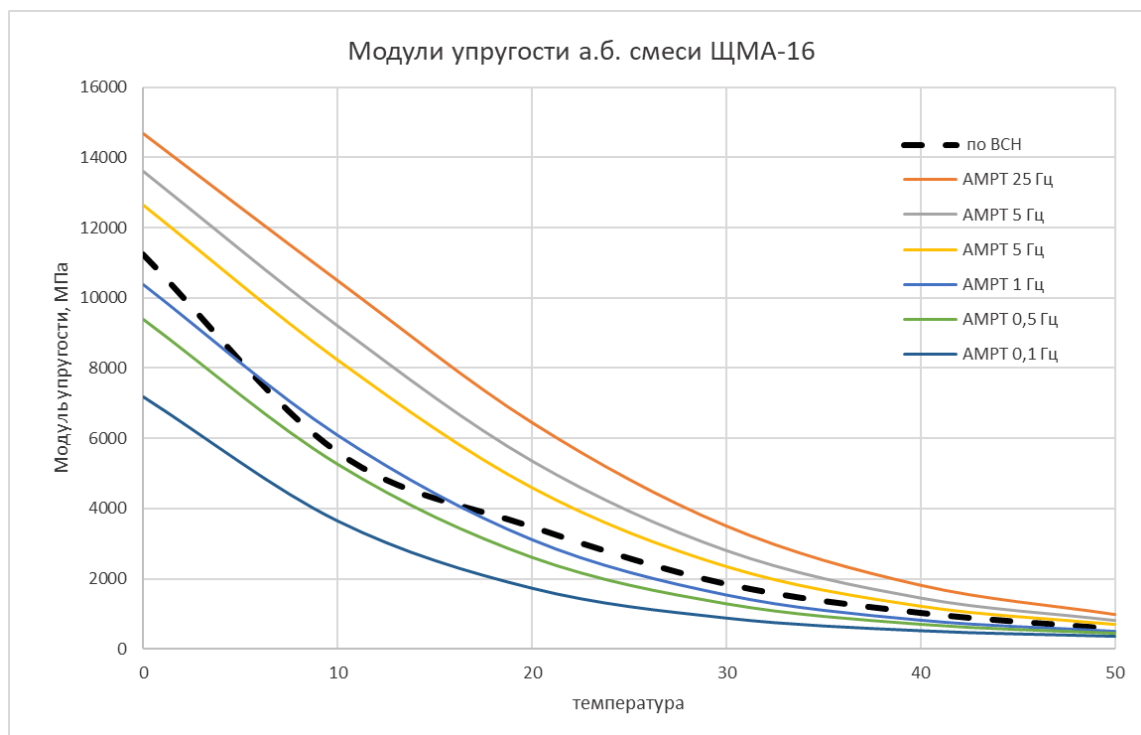


Рисунок 60 - Зависимости между модулем упругости и температурой асфальтобетонной смеси ЦМА-16, по методике из ВСН 46-83 и по ГОСТ Р 58401.21 (АМРТ) при различных частотах нагружения

По рисункам 58-60 видно, что графики модуля упругости всех асфальтобетонных смесей определенные по методике из ВСН 46-83 при температурах 50 и 40 °С наиболее приближены к графику полученному на установке АМРТ при частоте 5 Гц, при температурах 30, 20 и 0 °С наиболее приближены к графику при частоте 1 Гц, а при температуре 10 °С наиболее приближены к графику при частоте 0,5 Гц. В общем кривую падения модуля упругости по ВСН 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. Полученные данные имеют качественные совпадения с данными, указанными в [34].

Для сравнения модулей упругости различных типов смесей были построены зависимости модуля упругости на установке АМРТ при частоте 1 Гц представленные на рисунке 61.

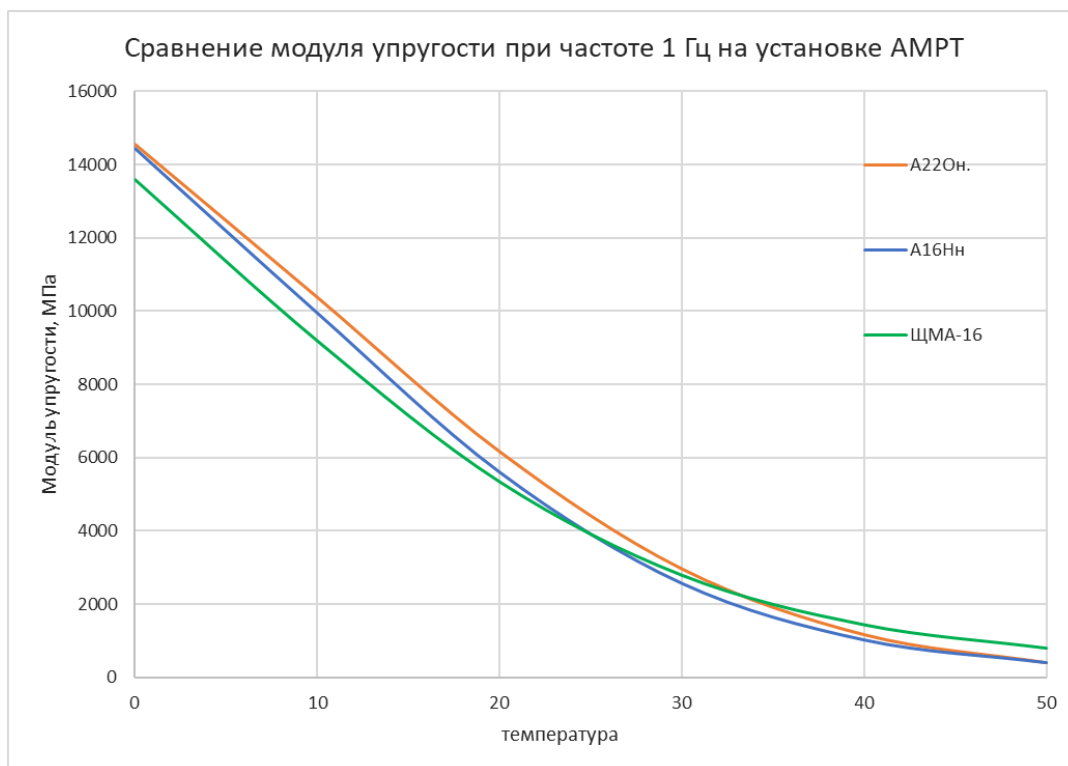


Рисунок 61 - Зависимости модуля упругости на установке АМРТ при частоте 1 Гц различных типов асфальтобетонных смесей

По рисунку 68 можно отметить, что модуль упругости щебеночно-мастичной смеси ЩМА-16 при температурах от 0 до 10°C несколько ниже, чем у остальных типов смесей с плотной структурой минерального каркаса, что свидетельствует о более высокой деформативности ЩМА при низких температурах за счет большего содержания вяжущего, а при высоких температурах от 40 до 50°C наоборот – несколько выше, что свидетельствует о лучшей устойчивости к пластическим деформациям за счет щебеночного каркаса.

3.3.2 Для сравнения изгибной прочности были построены графики зависимости предела прочности при изгибе от температуры представленные на рисунке 62.

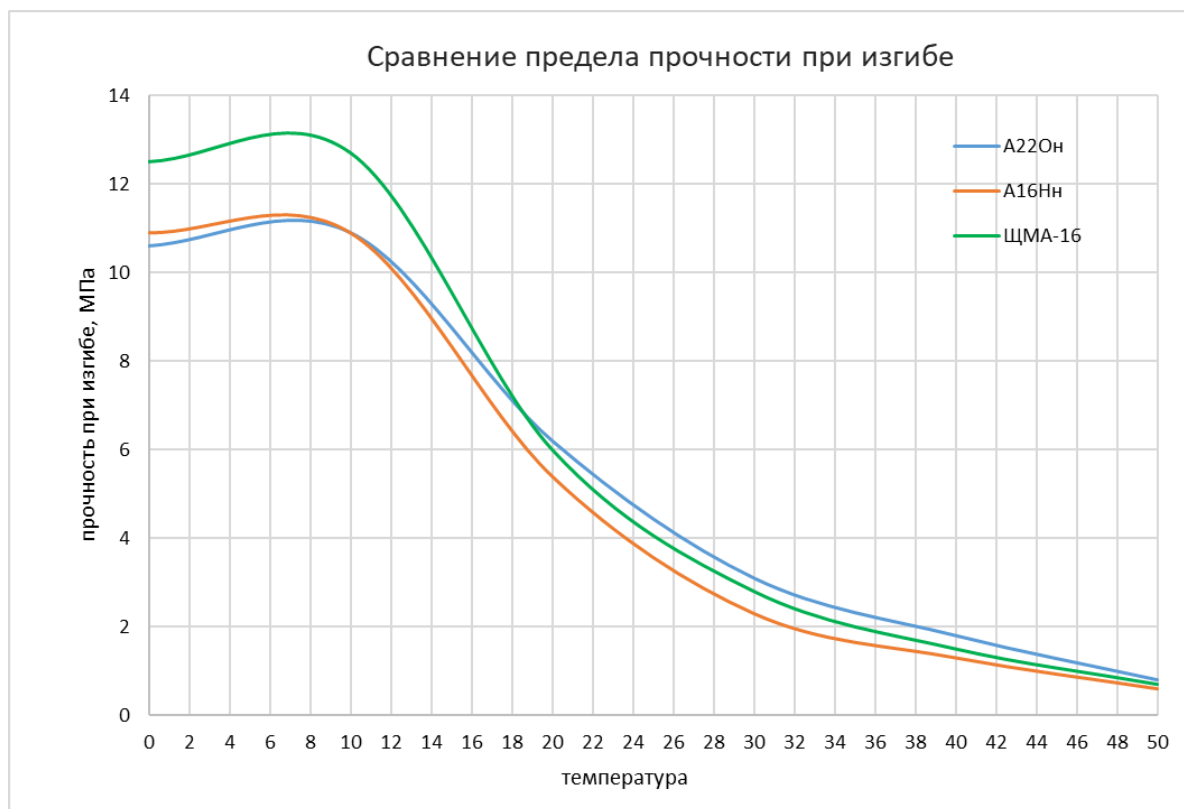


Рисунок 62 - Зависимости предела прочности при изгибе от температуры по методике из ВСН 46-83

По рисунку 62 видно, что при температуре от 50 до 20 °C прочность при изгибе практически не зависит от типа асфальтобетона при температуре. Повышенная прочность при температуре от 10 до 0 °C отмечается у смеси ЩМА-16 ввиду большего содержания битумного вяжущего в ее составе, и как следствие в ее повышенной деформативности при низких температурах, при высоких температурах разницы практически не наблюдается.

3.3.3 Для возможности прогнозирования усталостной долговечности были построены регрессионные зависимости между относительной начальной деформацией и количеством циклов до момента разрушения, представленные на рисунке 63.

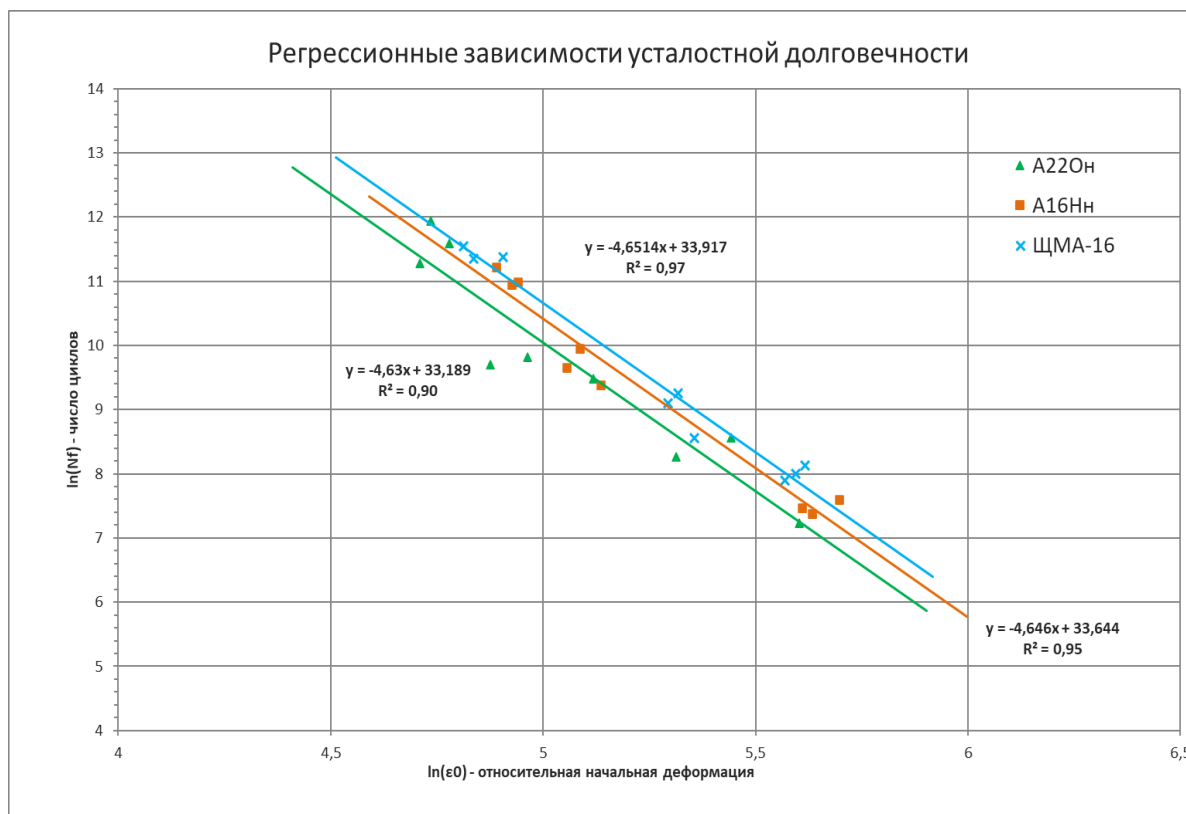


Рисунок 63 - регрессионные зависимости между относительной начальной деформацией и количеством циклов до момента разрушения

Представленные на рисунке 63 регрессионные зависимости позволят определять усталостную выносливость асфальтобетонов подставляя в уравнение регрессии различные значения относительной деформации с очень высокой степенью надежности (коэффициенты детерминации (R^2) составляют более 0,9).

ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ:

1. Впервые выполнено сопоставление между значениями динамических модулей упругости определяемых с использованием современных методик АМРТ и по традиционной для Российской Федерации методике ВСН 46-83, реализуемой с применением прибора Щербакова.

2. Установлено, что графики модуля упругости всех асфальтобетонных смесей определенные по методике из ВСН 46-83 при температурах 50 и 40 °С наиболее приближены к графику полученному на установке АМРТ при частоте 5 Гц, при температурах 30, 20 и 0 °С наиболее приближены к графику при

частоте 1 Гц, а при температуре 10 °С наиболее приближены к графику при частоте 0,5 Гц.

3. Определены динамические модули упругости наиболее широко распространенных видов асфальтобетонов для устройства слоев покрытий и оснований в широком диапазоне температур и частот. Установлено, что лабораторные значения модулей упругости асфальтобетона А22Он составляют от 53 МПа до 14544 МПа; значения модулей упругости асфальтобетона А16Он составляют от 90 МПа до 15440 МПа; значения модулей упругости асфальтобетона ЩМА-16 составляют от 346 МПа до 14686 МПа.

4. Построены регрессионные зависимости изменения растягивающих деформаций от количества циклов приложения нагрузки и как следствие снижения начального модуля упругости для различных асфальтобетонов.

ГЛАВА 4. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СЛОЕВ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

4.1 Модель анализа напряженно-деформированного состояния слоистой среды на основе точного решения теории упругости

Результаты натурных исследований выполненных на физической модели в совокупности с результатами лабораторных исследований направленных на определение модулей упругости асфальтобетонов позволяют осуществить расчет напряженно-деформированного состояния слоистой среды с учетом этих показателей и оценить адекватность расчетной картины напряженно-деформированного состояния.

В рамках решения данной задачи в качестве математической модели использована модель слоистого полупространства в осесимметричной постановке аналогичная [69, 70, 71]. Расчетной схемой является упругое многослойное (до семи слоев) полупространство, нагруженное на внешней поверхности нормальной осесимметричной нагрузкой. Вводят цилиндрическую систему координат r, θ, z (рисунок 70), в которой первый слой ограничен плоскостями $z = 0; z = d_1$ и имеет толщину d_1 . Последующие слои с номерами $i = 2, 3, \dots 6$ располагают между плоскостями $z = d_{i-1}$ и $z = d_i$, и, следовательно, имеют толщину, равную разности $d_i = h_i - h_{i-1}$. Последний седьмой слой ограничен сверху плоскостью $z = H$ и простирается вниз до бесконечности. Каждый из семи слоев характеризуется модулем упругости E_i и коэффициентом Пуассона $\nu_i, i = 1, 2, \dots 7$. Нагрузка, действующая на верхний слой, равномерно распределена с интенсивностью P по площади круга радиуса r_0 с центром в начале координат. Для симметрии следует, что все рассматриваемые ниже характеристики упругой среды зависят только от двух координат: r и z .

Данное решение для определения напряженно-деформированного состояния слоистой среды реализованы в программном обеспечении «SigmaPro».

4.2 Расчет напряженно-деформированного состояния дорожных одежд с учетом модулей упругости слоев асфальтобетона, установленных в ходе испытаний на физической модели

С использованием данных зависимостей был выполнен расчет напряженно-деформированного состояния слоистой среды с учетом модулей упругости асфальтобетонов установленных при испытаниях на физической модели.

Таблица 20 - Расчетные параметры моделируемой конструкции № 1

Наименование слоя	Динамический модуль упругости по данным АМРТ (для асфальтобетонов.) / Модуль упругости (для остальных слоев)	Лабораторный модуль упругости по Щербакову	Динамический модуль упругости по данным FWD	Толщина, см	Коэффициент Пуассона
ЩМА-16 на ПБВ 60	9194	5603	6800	6,1	0.30
А16Нн БНД 70/100	9949	5745	8000	5,5	0.30
А22Он на БНД 70/100	9350	5944	7000	6,3	0.30
ЩПС, укрепленная цементом	800	-	-	15,0	0.25
щебеночно-песчаная смесь 0/45 мм	265	-	-	15,1	0.27
средний песок	120	-	-	-	0.30

Таблица 21 - Расчетные параметры моделируемой конструкции № 2

Наименование слоя	Динамический модуль упругости для асфальтобетонов АМРТ)/ Модуль упругости (для остальных слоев)	Лабораторный модуль упругости по Щербакову	Динамический модуль упругости по данным FWD	Толщина, см	Коэффициент Пуассона
ЩМА-16 на ПБВ 60	9194	5603	6700	5,5	0,30
А16Нн на БНД 70/100	9949	5745	8000	6,1	0,30
А22Он на БНД 70/100	9350	5944	6800	7,9	0,30
ХО 32 ЭМ	1000	-	-	12,8	0,25
щебеночно-песчаная смесь 0/45 мм	265	-	-	15,3	0,27
средний песок	120	-	-	-	0,30

По представленным в таблице 23 и 24 данным были проведены расчеты в программе «SigmaPro», размещенной по ссылке [67]. Процесс задания исходных данных представлен на рисунках 64 – 67.

Расчет параметров напряженно-деформированного состояния многослойной конструкции дорожной одежды											
Номер слоя	Толщина слоя [м]	Расчет упругого прогиба		Расчет растягивающих напряжений в монолитных слоях из асфальтбетона		Расчет активных напряжений сдвига в малосвязных слоях					
		Модуль упругости материала слоя [МПа]	Коэффициент Пуассона материала слоя	Модуль упругости материала слоя [МПа]	Коэффициент Пуассона материала слоя	При динамическом действии нагрузки			При статическом действии нагрузки		
						Модуль упругости материала слоя [МПа]	Коэффициент Пуассона материала слоя	Угол внутреннего трения материала слоя [град]	Модуль упругости материала слоя [МПа]	Коэффициент Пуассона материала слоя	Угол внутреннего трения материала слоя [град]
Слой 1	0.06	6700	0.30	6700	0.25	6700	0.35	0	510	0.35	0
Слой 2	0.06	8000	0.30	8000	0.25	8000	0.35	0	540	0.35	0
Слой 3	0.07	6800	0.30	6800	0.25	8000	0.35	0	715	0.35	0
Слой 4	0.15	4700	0.25	4700	0.25	4700	0.25	0	763	0.25	0
Слой 5	0.15	376	0.27	376	0.27	376	0.27	0	376	0.27	0
Слой 6	0.30	172	0.30	172	0.30	172	0.30	26	172	0.30	33
Слой 7	Infinity	80	0.35	80	0.35	80	0.35	23	80	0.35	31

Назад Вперед

Рисунок 65 – Задание расчетных характеристик материалов слоя для расчета НДС

Задание расчетных характеристик материалов проводилось отдельно для каждого варианта модулей упругости обеих вариантов конструкций, как представлено в таблицах 23 и 24.

Смещение расчетной точки от оси симметрии (координата по горизонтали)	г	М	0
Глубина расположения расчетной точки от поверхности (координата по вертикали)	z	М	0.49

Смещение расчетной точки от оси симметрии (координата по горизонтали)	г	М	0
Глубина расположения расчетной точки от поверхности (координата по вертикали)	z	М	0.79

Смещение расчетной точки от оси симметрии (координата по горизонтали)	r	M	0
Глубина расположения расчетной точки от поверхности (координата по вертикали)	z	M	0.19

Смещение расчетной точки от оси симметрии (координата по горизонтали)	r	M	0
Глубина расположения расчетной точки от поверхности (координата по вертикали)	z	M	0.34

Смещение расчетной точки от оси симметрии (координата по горизонтали)	r	M	0
Глубина расположения расчетной точки от поверхности (координата по вертикали)	z	M	0

Назад

Вычислить

параметров НДС

требуемых расчётных точек для вычисления:

- ОСНОВАНИЯ;**

Вертикальное смещение отсутствует.

представлен на рисунке 68.

Результаты расчета упругого прогиба и общего модуля упругости конструкции, как многослойного упругого полупространства:

Упругий прогиб	Supr	мм	0.35519
Общий модуль упругости конструкции	Egen	МПа	703.58885
Величина вертикального смещения в точке $r=0$ м, $z=0$ м	W	мм	0.35519

Результаты расчета активных напряжений сдвига малосвязного слоя:

			При динамическом действии нагрузки $r=0$ м, $z=0.49$ м	При статическом действии нагрузки $r=0$ м, $z=0.49$ м
Нормальное вертикальное напряжение	SigmaZ	МПа	0.02616	0.05843
Нормальное радиальное напряжение	SigmaR	МПа	-0.00614	-0.01307
Нормальное тангенциальное напряжение	SigmaTeta	МПа	-0.00614	-0.01307
Касательное напряжение	TauRZ	МПа	0	0
Максимальное главное напряжение	Sigma1	МПа	0.02616	0.05843
Промежуточное главное напряжение	Sigma2	МПа	-0.00614	-0.01307
Минимальное главное напряжение	Sigma3	МПа	-0.00614	-0.01307
Активное напряжение сдвига	Tact	МПа	0.01468	0.0279

			При динамическом действии нагрузки $r=0$ м, $z=0.79$ м	При статическом действии нагрузки $r=0$ м, $z=0.79$ м
Активное напряжение сдвига	Tact	МПа	0.00506	0.00506

Результаты расчета растягивающих напряжений:

			в монолитных слоях из асфальтобетона $r=0$ м, $z=0.19$ м	в промежуточных монолитных слоях основания $r=0$ м, $z=0.34$ м
Нормальное радиальное напряжение	sigmaR	МПа	-0.1622	-0.50135
Нормальное тангенциальное напряжение	sigmaTeta	МПа	-0.1622	-0.50135

Назад

Рисунок 68 – Результаты расчёта параметров НДС в программном комплексе «SigmaPro»

Так как задача в программном комплексе «SigmaPro» решается в напряжениях переход к нормальным деформациям осуществляется в соответствии с обобщенным законом Гука:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu(\sigma_z + \sigma_\theta)); \quad (64)$$

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1}{E}(\sigma_{\theta} - \nu(\sigma_z + \sigma_r)); \quad (65)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_{\theta})). \quad (66)$$

Обратная форма которого соответственно будет иметь вид:

$$\sigma_r = \lambda e + 2\mu\varepsilon_r; \quad (67)$$

$$\sigma_{\theta} = \lambda e + 2\mu\varepsilon_{\theta}; \quad (68)$$

$$\sigma_z = \lambda e + 2\mu\varepsilon_z, \quad (69)$$

Где:

$e = \varepsilon_r + \varepsilon_{\theta} + \varepsilon_{\varphi}$ – объемная деформация;

λ, μ – параметры Ламе.

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}; \quad (70)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (71)$$

Результаты расчета основных компонент напряжений и деформаций в рассматриваемой конструкции, приведены в таблице 22.

Таблица 22 - Результаты расчета растягивающих деформаций на нижней границе пакета асфальтобетонных слоев в слоях дорожной одежды при модулях упругости для конструкций 1 и 2

Наименование слоя		Радиальная деформация - ε_r , расчетная мкм/мкм	Радиальная деформация - ε_r , экспериментальная мкм/мкм
Конструкция 1	При значениях модулей упругости определенных по данным натурных испытаний	40,9	36,6

	При значениях модулей упругости определенных по данным лабораторных испытаний на приборе ГосдорНИИ	39,6	
	При значениях модулей упругости определенных по данным лабораторных испытаний АМРТ	40,3	
Конструкция 2	При значениях модулей упругости определенных по данным натурных испытаний	31,4	29,3
	При значениях модулей упругости определенных по данным лабораторных испытаний на приборе ГосдорНИИ	29,8	
	При значениях модулей упругости определенных по данным лабораторных испытаний АМРТ	32,0	

4.3 Коэффициенты пересчета лабораторных значений модулей упругости материалов конструктивных слоев дорожных одежд в модули упругости слоя дорожной одежды.

Таким образом учитывая хорошее соответствие между результатами расчета растягивающих деформаций на нижней грани слоев асфальтобетона для обеих рассматриваемых конструкций с фактическими значениями растягивающих деформаций зарегистрированных с использованием тензометрических датчиков можно констатировать, что определенные на физической модели дорожной одежд 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 установкой АМРТ и на приборе

ГосдорНИИ (Щербакова). Рассчитанные значения коэффициентов для исследованных на физической модели материалов приведены в таблице 23.

Таблица 23 - Рассчитанные значения коэффициентов для исследованных на физической модели

Слой дорожной одежды	Коэффициент приведения для модуля упругости слоя дорожной одежды по результатам измерения FWD	Коэффициент приведения для модуля упругости образца определенного на установке ГосдорНИИ	Коэффициент приведения для модуля упругости образца на 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 вид:

$$E_c = E_{\text{лаб}} K_{np} \quad (72)$$

Несомненно, по мере набора статистики данные значения могут корректироваться. Однако следует обратить внимание, что на текущий момент они в целом могут быть приняты в качестве базовых, так как хорошо соотносятся как с отечественным опытом проектирования, так и мировым.

4.4 Рекомендации по совершенствованию методов прогнозирования усталостного разрушения асфальтобетонных слоев.

Традиционный для Российской Федерации метод прогнозирования усталостных разрушений базируется на использовании в качестве основных расчетных показателей – параметров прочности асфальтобетона и напряжений на его нижней границе. При этом в общемировой практике процессы усталостного разрушения слоев асфальтобетона рассматриваются преимущественно в разрезе «деформационной» картины, для которой основными параметрами являются модуль упругости (в некоторых источниках - модуль жесткости) и растягивающие деформации на нижней границе пакета

асфальтобетонных слоев. В рамках данной работы фактически развита экспериментальная база и впервые апробированы подходы позволяющие осуществить переход на более современный – «деформационный» подход к анализу усталостных разрушений.

В этой части в первую очередь следует отметить, что на основе натурных измерений растягивающих деформаций на физической модели дорожной одежды и лабораторных испытаний конструктивных слоев получены эмпирические зависимости позволяющие прогнозировать количество циклов приложений расчетной нагрузки до усталостного разрушения асфальтобетонных слоев для всех рассматриваемых асфальтобетонов:

Для верхнего слоя основания из асфальтобетона А22От:

$$\ln(N(\varepsilon)) = -4.63 \ln(\varepsilon) + 33.189 \quad (73)$$

Для нижнего слоя покрытия из асфальтобетона А16Нт:

$$\ln(N(\varepsilon)) = -4.646 \ln(\varepsilon) + 33.644 \quad (74)$$

Для верхнего слоя покрытия из асфальтобетона ЩМА 16:

$$\ln(N(\varepsilon)) = -4.6514 \ln(\varepsilon) + 33.917 \quad (75)$$

Упрощая данные зависимости и приводя их к показательной форме, получим соответственно:

$$N(\varepsilon) = \varepsilon^{-4.630} e^{33.189} \quad (76)$$

$$N(\varepsilon) = \varepsilon^{-4.646} e^{33.644} \quad (77)$$

$$N(\varepsilon) = \varepsilon^{-4.6514} e^{33.917} \quad (78)$$

В общем виде данные зависимости будут иметь вид:

$$N(\varepsilon) = A\varepsilon^{-k_1}e^{k_2} \quad (79)$$

где

A - коэффициент приведения от лабораторных режимов нагружения к натурным.

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

Определение показателя A является достаточно сложной задачей, так как требует выполнения многолетних калибровочных исследований на большом количестве тестовых секций с различными конструкциями дорожной одежды. Однако как отмечается в работе [114] коэффициент перехода от лабораторных испытаний к натурным изменяется в диапазоне от 15 до 20. В работе [106] отмечается, что полевой калибровочный фактор составляет 18,4.

Опираясь на эти соображения, рассчитаем прогнозное суммарное количество циклов приложений расчетной нагрузки для конструкций дорожных одежд на физической модели.

Таблица 24 - Рассчитанные значения коэффициентов для исследованных на физической модели

Наименование слоя	E_{FWD}	ε_r	$N(\varepsilon)$	Наименование слоя	E_{FWD}	ε_r	$N(\varepsilon)$
Конструкция 1				Конструкция 2			
ЩМА-16 на ПБВ 60	6700	-20,0	∞	ЩМА-16 по на ПБВ 60	6700	-20,4	∞
A16Нн на БНД 70/100	8000	13,8	>100 млн	A16Нн на БНД 70/100	8000	8,13	>100 млн
A22Он на БНД 70/100	7000	36,6	17 107 878	A22Он на БНД 70/100	6800	29,3	52 796 901
ЩПС, укрепленная цементом	800	-	-	ХО 32 ЭМ	800	-	-
Щебеночно-песчаная смесь 0/45 мм	265	-	-	Щебеночно-песчаная смесь 0/45 мм	265	-	-
Песок средний	120	-	-	Песок средний	120	-	-

Результаты расчетов показывают, что суммарное число приложений до момента наступления усталостного разрушения в текущем режиме

деформирования на нижней границе верхнего слоя основания составит 17 107 878 циклов для 1 конструкции и 52 796 901 циклов приложений нагрузки для 2 конструкции, так как этот и вышележащие слои работают в условиях крайне низкой на момент проведения испытаний деформации. Верхний слой покрытия на момент проведения испытаний работает в условиях сжатия, и на момент данного состояния не подвержен усталостному разрушению. Очевидным является вывод, о более высокой усталостной долговечности конструкции 2, в сравнении с конструкцией 1.

Таким образом полученные в данной главе 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 растягивающей (радиальной деформации) и усталостного разрушения.

ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ:

1. Впервые проведено сопоставление модулей упругости асфальтобетонов с применением двух различных лабораторных (АМРТ и ВСН 46-83) и натурной методики с применением установки динамического нагружения FWD.

2. Выявлена схожая тенденция изменения модуля упругости асфальтобетонов для различных конструктивных слоев.

3. Проведена валидация результатов измерений модуля упругости на физической модели дорожной одежды с результатами моделирования напряженно-деформированного состояния слоистой среды, выполненной в программном обеспечении «SigmaPro».

4. Установлено, что результаты измерений в целом соответствуют расчетным значениям.

5. В рамках выполнения работ по пятой главе получены коэффициенты пересчета от лабораторных модулей упругости асфальтобетона различными методиками (АМРТ и метод Щербакова) к модулям упругости, полученным в

натурных условиях с применением установки динамического нагружения FWD.

6. Предложены эмпирические модели для прогнозирования предельного числа приложений расчетных нагрузок в зависимости от величины растягивающих деформаций. Модели получены на основе авторских результатов испытаний асфальтобетонов на усталостное разрушение и могут быть расширены на случай определения растягивающих деформаций непосредственно в асфальтобетонных слоях дорожной одежды.

7. Выполнены расчеты предельного числа расчетных нагрузок до образования усталостных трещин на основе результатов математического моделирования. Показано, что при малых значениях растягивающих деформаций суммарное число приложений расчетной нагрузки превышает 100 000 000 приложений, что отвечает как реальному опыту эксплуатации автомобильных дорог, так и лабораторным испытаниям, предполагающим экстраполяцию тренда циклов разрушения, до значений предельных растягивающих деформаций.

8. Полученные математические модели могут быть использованы при прогнозировании усталостных повреждений на основе линейных и нелинейных гипотез суммирования повреждений, в частности гипотез Пальмгрена-Майнера, критерия Марко-Старки и проч.

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 3 различных конструкций, исключая факторы влияния 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 ЦПС, 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 позволят 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 позволить 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.

БИБЛИОГРАФИЯ

- 1 Апестин В.К., Шак А.М., Яковлев Ю.М. Испытания и оценка прочности нежёстких дорожных одежд. М.: Транспорт, 1977. -102 с.
- 2 Бабков В.Ф. Напряжения в грунтовых основаниях дорожных одежд. 1941.
- 3 Басс М.Г., Иванов Н.Н., Калабухов Ф.В., Федоров В.Т. XI международный дорожный конгресс. М., Научно-техническое издательство Министерства автомобильного транспорта и шоссейных дорог РСФСР, 1961.
- 4 Бахрах Г. С. Модель оценки срока службы дорожной одежды нежесткого типа. //Наука и техника. №2 М.: 2002. С. 17 – 20.
- 5 Бахрах Г. С. Сопоставленная модель оценки срока службы дорожных одежд нежесткого типа по критерию усталостного растрескивания при их конструировании. //Сб. трудов ГП РосдорНИИ, №9. 1998. С. 18-20.
- 6 Бируля А.К. Конструирование и расчет нежестких одежд автомобильных дорог. М., «Транспорт», 1964.
- 7 Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. - М.: Машиностроение, 1984 - 312 с.
- 8 Васильев А.П. и др. Ремонт и содержание автомобильных дорог: Справочная энциклопедия дорожника (СЭД). Т II/ Под редакцией А.П. Васильева. – М.: Информавтодор, 2004. – 507 с.
- 9 ВСН 46-60 «Инструкция по назначению конструкций дорожных одежд нежесткого типа», [Текст]: [утвержден 21.10.1960 Министерством транспортного строительства СССР (USSR Ministry of Transport Construction 556-П)]
- 10 ВСН 46-83 Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. [Текст]. – Введ. 01.01.1984. – М.: МТС СССР. 41 с.
- 11 ГОСТ 32729-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Метод измерения упругого прогиба нежестких дорожных одежд для определения прочности

12 ГОСТ 32824-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Песок природный. Технические требования. [Текст]. – Введ. 01.07.2015. М.: Стандартиформ – 12 с.

13 ГОСТ 33133-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические требования (с Поправкой)» [Текст]. – Введ. 01.10.2015. М.: Стандартиформ – 6 с.

14 ГОСТ 57837-2017 Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Технические условия. – Введ. 01.05.2019 – Москва: Стандартиформ, 2019. 45 с.

15 ГОСТ Р 52056-2003 «Вяжущие полимерно-битумные дорожные на основе блоксополимеров типа стирол-бутадиен-стирол. Технические условия» [Текст]. – Введ. 01.01.2004 М.: Стандартиформ - 2 с.

16 ГОСТ Р 58401.14-2019 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод приготовления образцов для определения динамического модуля

17 ГОСТ Р 58401.21-2019 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Методы определения динамического модуля упругости и числа текучести с использованием установки динамического нагружения (АМРТ)

18 ГОСТ Р 58406.1-2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси щебеночно-мастичные асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия (с Изменением N 1)» [Текст]. – Введ. 01.06.2020. М.: Стандартиформ. – 11 с.

19 ГОСТ Р 58406.2-2019 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Технические требования [Текст]. – Введ. 01.06.2020. М.: Стандартиформ. – 28 с.

20 ГОСТ Р 58406.4 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Приготовление образцов-плит вальцовым уплотнителем [Текст]. – Введ. с 01.07.2019 по 01.07.2022. М.: Стандартиформ – 16 с.

21 ГОСТ Р 59280-2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения усталостной долговечности при непрямом растяжении» Текст]. – Введ. 01.02.2021. М.: Стандартинформ. – 13 с.

22 ГОСТ Р 59866-2022. Дороги автомобильные общего пользования. Показатели деформативности конструктивных слоев дорожной одежды из несвязных материалов и грунтов земляного полотна. Технические требования и методы определения. – Введ. 01.04.2022 – Москва: Стандартинформ, 2022.

23 ГОСТ Р 59918-2021 «Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Методики оценки прочности»

24 ГОСТ Р 71404 Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования. [Текст]. – Введ. 01.09.2024. М.: Стандартинформ. – 145 с.

25 Дорожно-испытательный комплекс для проведения ускоренных испытаний дорожных одежд / А. С. Конорев, С. А. Мирончук, Е. А. Еременко, М. Н. Подгорнов // Дороги и мосты. – 2023. – № 2(50). – С. 43-60. – EDN OYOHMS.

26 Думенко, В. А. Подход к определению деформативных показателей слоя из несвязного зернистого материала в нежесткой дорожной одежде / В. А. Думенко, А. В. Корочкин, И. С. Новиков // Проектирование автомобильных дорог : Сборник докладов 83-й Международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 27–31 января 2025 года. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2025. – С. 204-209. – EDN RGHNT0.

27 Елгонов А. Н. Обоснование мероприятий по ремонту нежесткой дорожной одежды на основе оценки ее прочности и ровности. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. МАДИ. М., 1992 г.

28 Зубков, А. Ф. Моделирование процессов уплотнения асфальтогранулята с использованием экспериментальных данных / А. Ф.

Зубков, К. А. Андрианов, С. А. Сенибабнов // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений : Тезисы докладов VIII-го международного симпозиума, Тамбов, 17–21 мая 2023 года. – Тамбов: ИП Чеснокова А.В., 2023. – С. 293-295. – EDN JIBCHY

29 Иванов Н. Н, Когаизон М. С, Коновалов С. В. Основы новой методики расчета жестких дорожных одежд с учетом повторности воздействия. М., «Высшая школа», 1969.

30 Иванов Н.Н. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд. М, «Транспорт», 1973.

31 Иванов Н.Н. Определение толщины дорожной одежды. Справочник инженера-дорожника. 1935.

32 Иванов Н.Н. Определение толщины дорожной одежды. Справочник инженера-дорожника. 1935.

33 Иноземцев А.А. Сопротивление нагрузке нежестких дорожных покрытий и грунтовых оснований по данным экспериментальных исследований. 1941.

34 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.

35 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.

36 Калужский Я.А. Принципы конструирования дорожных одежд. Журнал «Автомобильные дороги» №10, 1965 г.

37 Калужский Я.А., Медведкова Н.А., Ряпухин В.Н. Проектирование дорожных одежд: Учебное пособие для вузов. – Киев – Донецк: Вища школа. Головное изд-во, 1981.

- 38 Коган Б.И. Напряжение и деформации многослойных покрытий. Харьков, Изд-во ХГУ, 1953, с. 33 – 46 (Труды ХАДИ. Вып.14).
- 39 Коган Б.И. Напряжение и деформации многослойных покрытий. Харьков, Изд-во ХГУ, 1953, с. 33 – 46 (Труды ХАДИ. Вып.14).
- 40 Коганзон М.С., Аблакулов А. Экспериментальное исследование прочности и ровности нежестких дорожных одежд. Пути повышения надежности автомобильных дорог/. Сб. научн. тр. МАДИ. М.:1984, - с. 16-22.
- 41 Коганзон М.С., Красиков О.А., Немчинов М.В., и др. Прогнозирование транспортно-эксплуатационных показателей нежестких дорожных одежд. ИПК Минтрансстрой Республики Казахстан. Алма-Ата. 1992. С. 108.
- 42 Коганзон М.С., Яковлев Ю.М. Оценка и обеспечение прочности дорожных одежд нежесткого типа (Учебное пособие) МАДИ, М., 1990 г., 52 с.
- 43 Корсунский М.Б. Основы комплексного проектирования конструкций дорожных одежд и земляного полотна автомобильных дорог. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Ленинград, 1970.
- 44 Красиков О. А., Яковлев Ю. М., Коганзон М. С. и др. Исследование изменения показателей эксплуатационного состояния дорожных одежд и покрытий с обоснованием методики их прогнозирования. НТО Казфилиала СоюздорНИИ. Алма-Ата, 1990, 92 с.
- 45 Красиков О. А., Яковлев Ю. М., Коганзон М. С. и др. Исследование изменения показателей эксплуатационного состояния дорожных одежд и покрытий с обоснованием методики их прогнозирования. НТО Казфилиала СоюздорНИИ. Алма-Ата, 1990, 92 с.
- 46 Красиков О.А. Обоснование стратегии ремонта нежестких дорожных одежд. Дис. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук. МАДИ. М., 1999 г.
- 47 Кривисский А.М. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд по местному предельному равновесию. М., Автотрансиздат, 1963.

- 48 Кривисский А.М. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд по местному предельному равновесию. М., Автотрансиздат, 1963.
- 49 Кривисский А.М. Новые схемы для расчета нежестких дорожных одежд. Автотрансиздат, 1961.
- 50 Кривисский А.М. Новые схемы для расчета нежестких дорожных одежд. Автотрансиздат, 1961.
- 51 Л. М. Макая Влияние битумной эмульсии на свойства асфальтогранулобетонной смеси при устройстве покрытий нежесткого типа автомобильных дорог / Л. М. Макая, Л. С. Зарапина, К. А. Андрианов, А. Ф. Зубков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2023. – Т. 25, № 6. – С. 233-250. – DOI 10.31675/1607-1859-2023-25-6-233-250. – EDN VWBDUN
- 52 Ладыгин Б.И. и др. Прочность и долговечность асфальтобетона. Минск. Наука и техника. 1972. – 285 с.
- 53 Медведев Д.В. / Диссертация на соискание уч. степ. к.т.н. «Развитие методологии идентификации геосинтетических материалов в дорожном строительстве», Воронеж 2024, 203 с.
- 54 Медведев, Д.В. Влияние армирования несвязанных конструктивных слоев геосинтетическими материалами при проектировании нежестких дорожных одежд / Д.В. Медведев, Ю.И. Калгин, Е.Н. Симчук // // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2024. - № 4 (76). – С. 102-113.
- 55 Мерзликин Е.А., Радовский Б.С., Анализ норм проектирования дорожных одежд зарубежных стран с подготовкой рекомендаций по совершенствованию отечественных норм проектирования. Рекомендации по совершенствованию отечественных норм проектирования дорожных одежд. Первая редакция. Отчет о НИР. ФГУП «РОСДОРНИИ», 2010.
- 56 Никитин О.Ф. Исследование особых случаев расчета и конструирования нежестких дорожных одежд. /Диссерт. на соиск. уч. ст. к.т.н. /Харьков, ХАДИ, 1967, 215 с.

57 Новые методы расчета и испытания дорожных одежд нежесткого типа, под редакцией проф. Иванова Н.Н. Автотрансиздат, 1962.

58 ОДМ 218.3.1.005-2021 Проектирование нежестких дорожных одежд. Методические рекомендации по расчету параметров напряженно-деформированного состояния многослойных конструкций при воздействии колесных нагрузок, ФДА Росавтодор, М., 2021

59 ОДН 218.046-01 «Проектирование нежестких дорожных одежд», [Текст]: [утверждены и введены в действие Распоряжением Государственной службы дорожного хозяйства (Росавтодора) Министерства транспорта Российской Федерации от 20.12.00 N ОС-35-Р].

60 Оценка надежности дорожной одежды на стадии эксплуатации / А. Н. Тиратурян, А. А. Симакова, И. В. Бодров, М. В. Фарниева // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 4(47). – С. 196. – EDN YUQMGN.

61 Плевако В.П. Деформация неоднородного слоя, спаянного с полупространством. - Известия АН УССР. Механика твердого тела, 1974, № 5, стр. 34-42.

62 ПНСТ 326-2019 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси щебеночно-гравийно-песчаные, обработанные неорганическими вяжущими. Технические условия [Текст]. – Введ. с 01.07.2019 по 01.07.2022. М.: Стандартиформ – 19 с.

63 ПНСТ 327-2019 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси щебеночно-гравийно-песчаные. Технические условия [Текст]. – Введ. с 01.07.2019 по 01.07.2022. М.: Стандартиформ – 16 с.

64 ПНСТ 632 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси органоминеральные холодные с использованием демонтированного асфальтобетона. Технические условия. [Текст]. – Введ. с 01.04.2022 по 21.06.2023. М.: Стандартиформ – 36 с.

65 Славущкий А. К. Проектирование, строительство, содержание и ремонт сельскохозяйственных дорог. М.: Высшая школа, 1968

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

67 Ссылка на программу SigmaPro <https://www.niitsk.ru/services/soft/>

68 Теляев П.И. Напряженное состояние дорожных одежд при статическом и кратковременном воздействии нагрузки. Журнал «Автомобильные дороги» №6, 1964 г.

69 Тулаев А.Я., Татенко Н.Д., Глибовицкий Ю.С., Закурдаев И.Е. Проектирование оптимальных нежестких дорожных одежд, 1977.

70 Туроверов К.К. К вопросу исследования напряженного и деформированного состояния упругого слоистого полупространства. – Научные труды Ленинградской ордена Ленина лесотехнической академии имени С.М. Кирова. – 1962. – № 94. – С. 87-101. 20.

71 Туроверов К.К. К вопросу исследования напряженного и деформированного состояния слоистых оснований и дорожных одежд: дис. канд. техн. наук: 05.00.00 / Туроверов Константин Константинович; Ленингр. лесотехн. акад. им. С. М. Кирова. – Л., 1964. –121 с.

72 Углова Е.В./ Диссертация на соискание уч. степ. д.т.н. «Теоретические и методологические основы оценки остаточного усталостного ресурса асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог», Ростов-на-Дону, 2009г, 372 стр.

73 Ядыкина, В. В. Старение битума, модифицированного полимерно-битумным концентратом / В. В. Ядыкина, В. П. Денисов, А. Е. Акимов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2022. – № 1(757). – С. 22-30. – DOI 10.32683/0536-1052-2022-757-1-22-30. – EDN USWWPK.

74 Ядыкина, В. В. Физико-химические свойства полимерно-битумных вяжущих, модифицированных шунгитом различных месторождений Карелии / В. В. Ядыкина, М. С. Лебедев, К. С. Выродова //

Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2024. – № 8. – С. 8-19. – DOI 10.34031/2071-7318-2024-9-8-8-19.

75 Яковлев Ю.М. Оценка и обеспечение прочности дорожных одежд нежесткого типа в процессе эксплуатации. Дисс. на соиск. уч. степ. доктора техн. наук. – М.: 1985. – 435 с.

76 Alsheyab M. A. et al. A critical review of fatigue cracking in asphalt concrete pavement: a challenge to pavement durability //Innovative infrastructure solutions. – 2024. – T. 9. – V. 10. – 386.

77 AMADEUS. (2000). AMADEUS: Advanced Models for Analytical Design of European Pavement Structure. RO-97-SC.2137. The European Commission under the Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme. [https:// trimis.ec.europa.eu/project/advanced-models-analytical-design-european-pavement-structures](https://trimis.ec.europa.eu/project/advanced-models-analytical-design-european-pavement-structures).

78 Arand W and H Lorenzi. Einfluß der Bitumenhärte auf das Ermüdungsverhalten von Asphaltbefestigungen unterschiedlicher Dicke in Abhängigkeit von der Tragfähigkeit der Unterlage, der Verkehrsbelastung und der Temperatur (Influence of Bitumen Hardness on the Fatigue Behaviour of Asphalt Pavements of Different Thickness due to bearing Capacity of Subbase, traffic Loading and Temperature). Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 696, Federal Ministry of Transport, Bonn-Bad Godesberg 1994.

79 Barriera M. et al. Assessing and predicting fatigue damage of road pavement using embedded sensors and deflection measurements: a full scale test //Road Materials and Pavement Design. – 2021. – V. 22. – pp. 444-461.

80 Boussinesq I. Application des potentiels a l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides elastiques. Paris, 1885.

81 Burmister, D. M. (1945). The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems. I. Journal of Applied Physics, 16(2), 89–94. <https://doi.org/10.1063/1.1707558>

82 Burmister, D. M. Stresses and Displacement Characteristics of a Two-Layer, Rigid Base Soil System: Influence Diagrams and Practical Applications. Highway Research Board Proceedings, Vol. 35, HRB, National Research Council, Washington, D. C., 1956, pp. 773–814.

83 Burmister, D. M. Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Application to the Design of Airport Runways. Highway Research Board Proceedings, Vol. 23, HRB, National Research Council, Washington, D. C., 1943, pp. 126–144

84 Delgadillo R., Monsalve S. Fatigue testing of Chilean asphalt mixtures and data fitting with phenomenological models //Road Materials and Pavement Design. – 2021. – V. 22. – №. 12. – Pp. 2919-2930.

85 Design of New and Reconstructed Flexible Pavements. Part 3 Chapter 3: Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures/AASHTO. – Washington, 2004.

86 Development of a Mathematical Model of Compaction Processes Road Layer / E. G. Pakhomova, L. V. Makaya, K. A. Andrianov [et al.] // Proceedings of the Southwest State University. – 2023. – Vol. 27, No. 2. – P. 75-89. – DOI 10.21869/2223-1560-2023-27-2-75-89. – EDN ZCBHDS.

87 Ďurinová M., Kozel M. Non-Destructive Evaluation of Asphalt Concrete Materials Performance During their Life Cycle Based on Accelerated Pavement Testing //Environ. Eng. – 2021. – V. 17. – pp. 621-628.

88 Elshamy, M. M. M. Evaluation of the elastic modulus of pavement layers using different types of neural networks models / M. M. M. Elshamy, A. N. Tiraturyan, E. V. Uglova // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2021. – Vol. 21, No. 4. – P. 364-375. – DOI 10.23947/2687-1653-2021-21-4-364-375. – EDN PLZMKM

89 Ghazavi M., Abdollahi S. F., Kutay M. E. Implementation of NCHRP 9-44A fatigue endurance limit prediction model in mechanistic-empirical asphalt pavement analysis web application //Transportation Research Record. – 2022. – V. 2676. – №. 6. – Pp. 696-706.

90 Horz H W and H Kaiisch. Daten von 23 Jahren Langzeitbeobachtungen an Straßen (Data Acquired from Observations of Roads, carried out over a period of 23 years). Straße und Autobahn, 43(9). Bonn, 1992.

91 Jiang X. et al. Evaluating the performance of inverted pavement structure using the accelerated pavement test (APT) //Construction and Building Materials. – 2022. – V. 346. – Pp. 128489.

92 Kumar Y., Trivedi A., Shukla S. K. Damage evaluation in pavement-geomaterial system using finite element-scaled accelerated pavement testing //Transportation Infrastructure Geotechnology. – 2024. – V. 11. – №. 3. – Pp. 922-933.

93 Le V. T. et al. Mechanism-based shift factors to predict the fatigue performance of cemented pavement materials //Acta Geotechnica. – 2024. – V. 19. – №. 11. – Pp. 7149-7168.

94 Le X. Q. et al. Analysis of LVE behaviour and fatigue damage evolution of asphalt pavements with different interface conditions in an accelerated full-scale experiment //International Journal of Pavement Engineering. – 2023. – V. 24. – №. 2. – pp . 2147522.

95 Le X. Q. et al. Probabilistic Approach to Evaluate Pavement Performance in APT Experiments // International Symposium on Asphalt Pavement & Environment. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. – pp. 43-48.

96 Leech D and M E Nunn. Deterioration Mechanisms in Flexible Roads. 2nd European Conference on Performance and Durability of Bituminous Mixtures. Leeds, April 1997.

97 Litzka J and W Langer. Analyse langfristig bewährter Strassenkonstruktionen (Analysis of long term proved road pavements), Schriftenreihe Strassenforschung, Heft 393, BMwA, Wien 1991.

98 Liu Z., Yang Q., Gu X. Assessment of pavement structural conditions and remaining life combining accelerated pavement testing and ground-penetrating radar //Remote Sensing. – 2023. – V. 15. – №. 18. – Pp. 4620.

99 Makaya, L. M. Influence of the composition of asphalt granular concrete mixture on the deformation of the coating layer during the construction of the road pavement / L. M. Makaya, K. A. Andrianov, A. F. Zubkov // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2024. – No. 1(61). – P. 86-100. – DOI 10.36622/VSTU.2024.61.1.008.

100 Manosalvas-Paredes M. et al. Validation of a novel sensing approach for continuous pavement monitoring using full-scale APT testing //Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements. – 2023. – V. 149. – №. 1. – Pp. 04022062.

101 Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide. A Manual of Practice, American Association of State Highway and Transportation Officials executive committee, 2010.

102 Model for determining the elastic moduli of road pavement layers / A. N. Tiraturyan, E. V. Uglova, D. A. Nikolenko, M. A. Nikolenko // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – No. 3(103). – DOI 10.34910/MCE.103.8.

103 Nunn M E and D B Merril. A Review of Flexible and Composite Pavement Design Methods. TRL Paper PA/3298/97, Transport Research Laboratory, 1997.

104 Nunn M E. A Question of Fatigue? Symposium on Performance and Durability of Bituminous Mixtures, Leeds, March 1994.

105 Papagiannakis A. T., Alrashyda E., Masad A. Calibration of mechanistic-empirical flexible pavement damage models //Eleventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. – CRC Press, 2022. – pp. 77-86.

106 Pellinen T. K. et al. Fatigue-transfer functions: how do they compare? //Transportation Research Record. – 2004. – T. 1896. – №. 1. – C. 77-87..

107 RDO Asphalt 09 Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht. Ausgabe – 2009.

108 Rodriguez E., Ashtiani R. Calibration of fatigue performance model for cement stabilized flexible pavements // Eleventh International Conference on the

Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. – CRC Press, 2021. – pp. 355-364.

109 Rondón-Quintana H. A., Reyes-Lizcano F. A., Zafra-Mejía C. A. Fatigue in asphalt mixtures—a summary to understand the complexity of its mathematical modeling //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – V. 2118. – №. 1. – P. 012009.

110 RSTO 12 Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (Руководство по выбору типовых конструкций дорожных одежд)

111 Santos I. et al. Modeling of Fatigue Cracking in Asphalt Materials Based on the Paris Law with an Initialization Term—Calibration from Notched and Unnotched Specimens //Journal of Testing and Evaluation. – 2023. – V. 51. – №. 4. – pp. 2132-2146.

112 Schmorak N and A van Dommelen. Analysis of the Structural Behaviour of Asphalt Concrete Pavements in SHRP-NL Test Sections. International Conference on SHRP and Traffic Safety, Prague, September 1995.

113 Shell Design Charts for flexible pavements. London, 1963.

114 Sudarsanan N., Kim Y. R. A critical review of the fatigue life prediction of asphalt mixtures and pavements //Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). – 2022. – T. 9. – №. 5. – C. 808-835

115 Trautvain, A. I. Reducing the environmental burden during the reconstruction of highways by extending their life cycle / A. I. Trautvain, V. V. Yadykina // BIO Web of Conferences. – 2024. – P. 00040. – DOI 10.1051/bioconf/202410300040.

116 Tutu K. A., Timm D. H. Asphalt fatigue endurance limit estimation and impact on perpetual pavement design // International Journal of Pavement Engineering. – 2022. – V. 23. – №. 4. – Pp. 1239-1247.

117 Tutu K. A., Timm D. H. Asphalt fatigue endurance limit estimation and impact on perpetual pavement design //International Journal of Pavement Engineering. – 2022. – V. 23. – №. 4. – pp. 1239-1247.

118 Wang S. et al. Study on Expected Fatigue Loading Cycles for Accelerated Loading Test of Asphalt Pavement Structure //2024 5th International Conference on Urban Construction and Management Engineering (ICUCME 2024). – Atlantis Press, 2024. – C. 203-215.

119 Xiao M. et al. Evaluation of fatigue behavior of asphalt field cores using discrete element modeling //Materials. – 2024. – V. 17. – №. 13. – 3108.

120 Ye Y. et al. Study on fatigue damage evolution and model prediction of asphalt pavement in the end-stage of service //Case Studies in Construction Materials. – 2023. – V. 19. – e02377.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акты внедрения диссертационных исследований



111024, Авиамоторная 73А, с 16

Тел.: (495) 748-86-16

e-mail: inntehcentr@mail.ru

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

09.06.2025 г.

Оверин Д.И.



Акт внедрения результатов диссертационной работы

Кадырова Георгия Фарруховича на тему: «Прогнозирование усталостной выносливости асфальтобетонных слоев на основе физического моделирования» по специальности 2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

Составленный акт подтверждает, что ООО «ИТЦ» применяет для исследовательских работ в г. Москва алгоритмы и методы, представленные в диссертации Кадырова Георгия Фарруховича, а именно:

- обоснование планировочных решений испытательных стендов,
- конструирование физических моделей дорожных одежд,
- определение параметров напряженно-деформированного состояния для обоснования эффективности проектных решений.

Зам. генерального директора
по производству

Главный инженер

Сизов Д.А.

Збинский Е.А.



Автономная некоммерческая организация

«Научно-исследовательский институт транспортно-строительного комплекса»

111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 73А, стр. 16, эт. 1, каб. 9, www.niitsk.ru
E-mail: niitsk@niitsk.ru

Тел.: (495) 748-86-12

УТВЕРЖДАЮ
Первый заместитель
генерального директора
Д.В. Медведев
19.05.2025 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Кадырова Г.Ф. на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме: «Прогнозирование усталостной выносливости асфальтобетонных слоев на основе физического моделирования»

Настоящим актом подтверждается, что Кадыров Г.Ф. принимал участие в разработке следующих стандартов Российской Федерации:

- ГОСТ Р 58401.11 – 2019 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения усталостной прочности при многократном изгибе;
- ГОСТ Р 58401.21 – 2019 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Методы определения динамического модуля упругости и числа текучести с использованием установки динамического нагружения (АМРТ)
- ГОСТ Р 59280 – 2020 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения усталостной долговечности при непрямом растяжении;
- ПНСТ 542 – 2021 Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования;
- ГОСТ Р 71404 – 2024 Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования.

В положениях перечисленных стандартов учитываются исследования по определению модулей упругости и оценке усталостной долговечности асфальтобетонов в лабораторных и полевых условиях, проведенные Кадыровым Г.Ф. в период с 2018 по 2023 годы.