

*На правах рукописи*



**КАРЕЛИНА Елена Леонидовна**

**МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ В ЗОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ  
ВОДОПРОПУСКНЫХ ТРУБ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» (г. Новосибирск).

- Научный руководитель:** **Воробьев Валерий Степанович** доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения», заведующий кафедрой «Технология, организация и экономика строительства» (г. Новосибирск)
- Официальные оппоненты:** **Углова Евгения Владимировна** доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», профессор кафедры «Автомобильные дороги» (г. Ростов-на-Дону)  
**Лескин Андрей Иванович**, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», Институт архитектуры и строительства, доцент кафедры «Строительство и эксплуатация транспортных сооружений» (г. Волгоград)
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж)

Защита состоится «26» декабря 2023 г. в 14:00 час. на заседании диссертационного совета 24.2.400.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» по адресу: 644080, г. Омск, пр. Мира, 5, ауд. 2.318.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «СибАДИ» и на сайте университета по адресу: <https://sibadi.org/about/units/institut-magistrature-i-aspirantury/studies/dissertations/67056/>.

Отзывы на автореферат диссертации, в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять в диссертационный совет по адресу: 644080, г. Омск, пр. Мира, 5. тел. (3812) 65-03-23. Копию отзыва просим выслать на e-mail: [sibadisemenova@yandex.ru](mailto:sibadisemenova@yandex.ru).

Автореферат разослан « 08 » ноября 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
канд. техн. наук, доцент



Семенова  
Татьяна Викторовна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования.**

В последние годы в экономике регионов усиливается роль и значение перевозок автомобильным транспортом. Возрастают темпы роста строительства новых и реконструкции действующих автомобильных дорог при одновременном повышении качества их содержания. Национальным проектом «Безопасные и качественные автомобильные дороги» планируется увеличить протяженность отремонтированных дорог, соответствующих международным стандартам качества к 2025 году в 1,85 раза по 37 агломерациям в 34 регионах РФ. Реализация данного проекта в установленные сроки возможна при наличии научно обоснованных программ мониторинга автомобильных дорог, привлечения инвестиций на основе государственно-частного партнерства и оптимизации бюджетного финансирования.

В новых условиях существенно возрастает актуальность системного подхода к выбору экономически выгодных стратегий содержания автомобильных дорог. Согласно ОДН 218.4.039-2018 рекомендуемая периодичность проведения работ по плановой диагностике автомобильных дорог I, II, III категорий составляет 1 год. Диагностикой предусматривается определение параметров автомобильных дорог, а также актуализация информации о транспортно-эксплуатационном состоянии дороги с фиксацией продольной ровности и регистрации дефектов покрытия проезжей части.

В связи с увеличением скоростей и интенсивности движения транспортных потоков, ростом нагрузок на ось, провозной способности увеличивается износ конструкций автомобильных дорог, что проявляется в процессе их содержания. Мониторинг технического состояния до настоящего времени осуществляется при осенне-летних и зимних осмотрах, что не позволяет получать количественные характеристики, на значение которых существенное влияние оказывают параметры физико-механических характеристик грунтов земляного полотна.

Получение физико-механических характеристик грунтов позволяет прогнозировать состояние автомобильных дорог, особенно в зонах расположения водопропускных труб, что сократит значительные материально-технические и экономические ресурсы для проведения натурных и лабораторных исследований.

Поэтому актуальным направлением является мониторинг и прогнозирование физико-механических характеристик грунтов земляного полотна, предшествующих диагностике в случае необходимости.

Выбранное направления исследования согласуется с приоритетными направлениями развития науки Российской Федерации, в частности с Государственным проектом «Безопасные и качественные автомобильные дороги», предусматривающим применение недорогих технологий мониторинга, прогнозирования и способов укрепления грунтов земляного полотна автомобильных дорог в местах устройства водопропускных труб, а также Государственной программой Новосибирской области «Развитие автомобильных дорог регионального, межмуниципального и местного значения в Новосибирской области».

**Степень разработанности темы исследования.** Исследования проблем эксплуатации автомобильных дорог выполнялись учеными СоюздорНИИ (РосдорНИИ), МАДИ, СибАДИ, РУТ (МИИТ), СГУПС, ТГАСУ, ПГУПС и многих других научных организаций, в составе которых решались задачи повышения качества содержания земляного полотна автомобильных дорог.

Исследованию эксплуатации автомобильных дорог посвятили труды В. Ф. Бабков, О. Т. Батраков, А. К. Бируля, А. П. Васильев, Н. Н. Иванов, В. Д. Казарновский, Я. А. Калужский, А. М. Кривисский, З. А. Мевлидинов, В. М. Сиденко, В. Н. Смирнов, А. Я. Тулаев, В. Н. Яромко и др.

Процессы, происходящие в грунте земляного полотна при эксплуатации автомобильных дорог, а также при его укреплении были исследованы такими учеными как И. И. Бройд, Ю. М. Васильев, Э. М. Добров, В. Н. Ефименко, С. В. Ефименко, А. Л. Исаков, С. Я. Луцкий, В. П. Подольский, Н. А. Пузаков, Б. А. Ржаницын, Н. Я. Хархута, Н. А. Цытович и др.

Методы математического моделирования эксплуатации автомобильных дорог разрабатывались В. С. Воробьевым, О. А. Бендер, Д. А. Донгак, А. Ф. Зубковым, А. И. Ярмолинским.

В данной области исследований известны труды иностранных ученых: P. Diggele, G. Morel, M. Okamura, T. Schanz, H. Seed, F. Tosti и др.

**Целью** диссертационного исследования является совершенствование мониторинга состояния земляного полотна и прогнозирование физико-механических характеристик инженерно-геологических элементов грунтов для сокращения затрат на оценку транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог в зоне расположения водопропускных труб.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

1. Провести оценку транспортно-эксплуатационного состояния участков автомобильной дороги в местах устройства водопропускных труб и выявить исходные показатели физико-механических характеристик грунтов земляного полотна и на удалении от них.

2. На основе натуральных, лабораторных и теоретических исследований разработать комплекс статистических моделей для прогнозирования физико-механических характеристик инженерно-геологических элементов грунтов автомобильных дорог в зоне расположения водопропускных труб.

3. Разработать методику мониторинга и прогнозирования физико-механических характеристик грунтов в зоне расположения водопропускных труб автомобильных дорог.

4. Разработать эффективный способ упрочнения грунтов земляного полотна автомобильных дорог в местах устройства водопропускных труб по результатам мониторинга физико-механических характеристик грунтов, повышающий транспортно-эксплуатационное состояние автомобильной дороги.

**Объектом** исследования являются участки автомобильных дорог в зонах расположения водопропускных труб.

**Предмет исследования** - модели, методы, методики мониторинга и прогнозирования физико-механических характеристик грунтов в зоне расположения водопропускных труб автомобильных дорог.

**Научная новизна** работы заключается в выявлении новых закономерностей и разработке рекомендаций организации мониторинга и прогнозирования физико-механических характеристик грунтов в зоне расположения водопропускных труб автомобильных дорог.

1. На основе натуральных, лабораторных и теоретических исследований установлены статистические связи между физико-механическими характеристиками грунтов, представленные комплексом регрессионных моделей.

2. Установлены статистические связи между физико-механическими характеристиками грунтов по типам инженерно-геологических элементов.

3. Обоснован подход к оценке достоверности теоретических значений физико-механических характеристик грунтов относительно полученных в процессе исследований.

4. Разработана методика мониторинга и прогнозирования физико-механических характеристик грунтов в зоне расположения водопропускных труб автомобильных дорог.

5. Разработан способ упрочнения грунтов земляного полотна автомобильных дорог в местах устройства водопропускных труб по результатам мониторинга физико-механических характеристик грунтов, повышающий транспортно-эксплуатационное состояние автомобильной дороги.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в системном обобщении достоверных знаний о физико-механических характеристиках грунтов земляного полотна в зоне расположения водопропускных труб на автомобильных дорогах регионального значения.

Результаты исследования отражены в методике, позволяющей выполнять мониторинг автомобильных дорог, прогнозирование физико-механических характеристик грунтов земляного полотна в зонах расположения водопропускных труб и использовать при проектировании и усилении грунтов земляного полотна. Разработан способ, позволяющий расширить границы применения метода напорного инъецирования для создания усиленных зон земляного полотна автомобильных дорог в местах устройства водопропускных труб.

**Методология и методы исследования.** Натурные и лабораторные исследования грунтов земляного полотна на участках автомобильных дорог в местах расположения водопропускных труб в сочетании с корреляционно-регрессионным анализом и прогнозированием выявленных физико-механических характеристик грунтов, а также методов инженерных решений при разработке способа усиления земляного полотна.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты исследований транспортно-эксплуатационного состояния участков автомобильных дорог Новосибирской области в местах расположения водопропускных труб и на некотором удалении от них, и физико-механических характеристик грунтов земляного полотна в структуре инженерно-геологических элементов.

2. Зависимость показателя продольной ровности покрытия автомобильных дорог от физико-механических, прочностных и деформационных характеристик грунтов земляного полотна автомобильных дорог в местах расположения водопропускных труб.

3. Комплекс статистических моделей физико-механических характеристик грунтов земляного полотна автомобильных дорог в зоне расположения водопропускных труб.

4. Методика мониторинга автомобильных дорог и прогнозирование физико-механических характеристик грунтов в зоне расположения водопропускных труб автомобильных дорог.

**Степень достоверности** полученных результатов подтверждается применением сертифицированных и поверенных приборов, оборудования и средств измерения; применением детально проработанной методики, основанной на использовании современных средств обработки данных; воспроизводимостью и обработкой результатов с использованием методов математической статистики.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научных конференциях различного уровня, научных семинарах в СГУПС, ТГАСУ, СибАДИ.

**Личный вклад автора** состоит в: разработке и реализации программы исследований; оценке влияния физико-механических характеристик грунтов земляного полотна на транспортно-эксплуатационное состояние автомобильных дорог; разработке моделей физико-механических характеристик на основе статистических данных грунтов земляного полотна автомобильных дорог в зоне расположения водопропускных труб и методики мониторинга и прогнозирования физико-механических характеристик грунтов в зоне расположения водопропускных труб автомобильных дорог; научном обосновании способа укрепления грунтов

земляного полотна автомобильных дорог в местах устройства водопропускных труб», защищенного патентом РФ.

**Публикации и изобретения.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в десяти печатных работах, в том числе четыре статьи в ведущих научных рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России, одна статья – в издании, входящем в международную базу цитирования Scopus. По результатам исследований получен патент РФ на изобретение «Способ укрепления грунтов земляного полотна автомобильных дорог в местах устройства водопропускных труб», а также получены патенты РФ на полезные модели «Свая» и «Составная свая».

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из двух томов. Первый том – основной текст диссертации, включает введение, четыре главы, заключение, список литературы, справки о внедрении результатов диссертационного исследования. Текст первого тома диссертации изложен на 167 страницах и иллюстрирован 26 рисунками и 47 таблицами. Список литературы включает 167 наименований. Второй том включает шесть приложений на 193 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы исследования, определяются объект, предмет, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

Для достижения цели исследования **в первой главе** выполнен анализ факторов, влияющих на транспортно-эксплуатационное состояние автомобильных дорог в зонах расположения водопропускных труб; определены дорожные районы и состояние объектов исследования, рассмотрена логическая структура исследования.

Исследования проведены на 15 участках автомобильной дороги регионального значения К17-р «Новосибирск – Кочки – Павлодар» (а/д «К-17р»), обеспечивающей межгосударственное транспортное сообщение со странами СНГ (Казахстан, Узбекистан, Киргизия, Таджикистан), пролегающей по нескольким районам Новосибирской области (Новосибирскому, Ордынскому, Кочковскому, Краснозёрскому, Карасукскому) и имеющей выход на Алтайский край.



Согласно СТП ТУАД 32-03-2000 рассматриваемые участки расположены в трех дорожных районах: III Р.4, III Р.3, III Х.1.

На 14 участках а/д «К-17р» применены сборные железобетонные трубы одночковые, двухчковые и трехчковые диаметром от 0,8 до 1,5 м., на 72 км а/д «К-17р» установлен бетонный скотопрогон прямоугольной формы 4,0\*2,5 м. Режим работы сооружений – безнапорный. Тип входного и выходного оголовков – раструбный.

Установлено, что нарушения продольной ровности дорожных покрытий идентичны друг другу и сосредоточены в барьерных местах водопропускных труб и представлены в виде просадок, трещин, выбоин.

**Вторая глава** посвящена определению транспортно-эксплуатационного состояния участков а/д К-17р и исследованию характеристик грунтов земляного полотна в зоне расположения водопропускных труб.

В процессе проведения исследований установлена степень влияния плотности грунта земляного полотна на образование дефектов и деформаций дорожных одежд и определены закономерности изменения физико-механических характеристик грунтового массива.

Зона расположения водопропускных труб автором определяется как часть автомобильной дороги, образующая прямоугольный контур и включающая непосредственно водопропускную трубу, земляное полотно и дорожную одежду на расстоянии 30 м. в обе стороны от оси водопропускной трубы.

В рамках визуальных и инструментальных исследований были выполнены: рекогносцировочное обследование, выявлены дефекты и деформации и определена ровность дорожного покрытия, значение которой сопоставлено с допустимым, характерным для соответствующей категории автомобильной дороги в соответствии с ГОСТ Р 50597-2017.

Сбор и обработка полученной информации о техническом состоянии эксплуатируемых водопропускных труб позволили выявить, что в аварийном состоянии находятся водопропускные трубы на участках 20, 201 км а/д «К-17р» и характеризуются повреждениями и деформациями, ведущими к разрушению сооружения; в работоспособном техническом состоянии находятся водопропускные трубы, расположенные на участках 72, 171, 201, 205, 228, 303, 334 км а/д «К-17р». В

целях предотвращения ухудшения ситуации необходимо периодически проводить мониторинг технического состояния рассматриваемых участков, а также мероприятия по восстановлению конструкций водопрпускных труб и укреплению грунтов земляного полотна в случае необходимости.

Следует отметить, что к нарушениям эксплуатационных показателей автомобильной дороги, дефектам и деформациям покрытия приводят процессы, в том числе, возникающие в нижележащих слоях дорожной конструкции, т.е. в земляном полотне.

Схема расположения выработок приведена на рисунке 1.

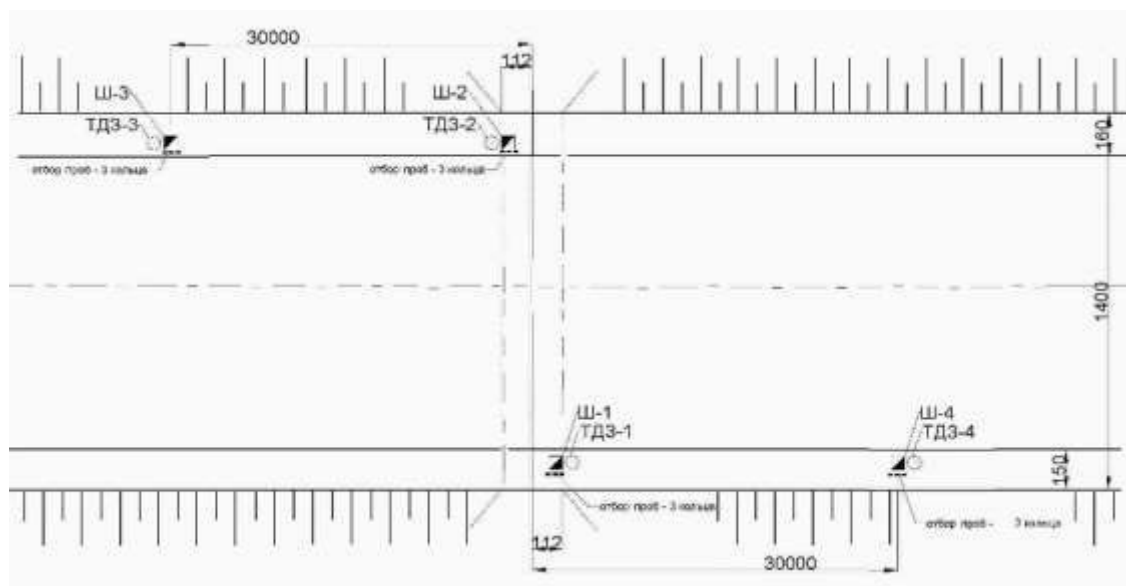


Рисунок 1 – Схема расположения выработок

Проходка шурфов осуществлялась до глубины 3,2 м в зависимости от высоты насыпи. При вскрытии шурфа производился замер толщины конструктивных слоев дорожных одежд. После вскрытия шурфов осуществлялся отбор проб грунтов земляного полотна нарушенной и ненарушенной структуры. Исследования проводились в соответствии с ГОСТ 12071-2014. Всего было отобрано 280 проб грунта.

В соответствии с ГОСТ 19912-2012 определено условное динамическое сопротивление  $R_d$  в каждой точке динамического зондирования и выведено среднее значение  $R_{dcp}$ . В интервалах глубин от 0,7 до 3,5 м в ТДЗ № 1 и ТДЗ № 2, расположенных в пазухах водопрпускных труб условное динамическое сопротивление грунтов в среднем составляет 2,5 МПа. В ТДЗ № 3 и ТДЗ № 4 на этих

же глубинах 4,4 МПа, что на 57% выше, чем непосредственно в барьерных местах водопропускных труб. Результаты средних значений динамического сопротивления по километражу исследуемых участков а/д «К-17р» отражены на графике (рисунок 2).

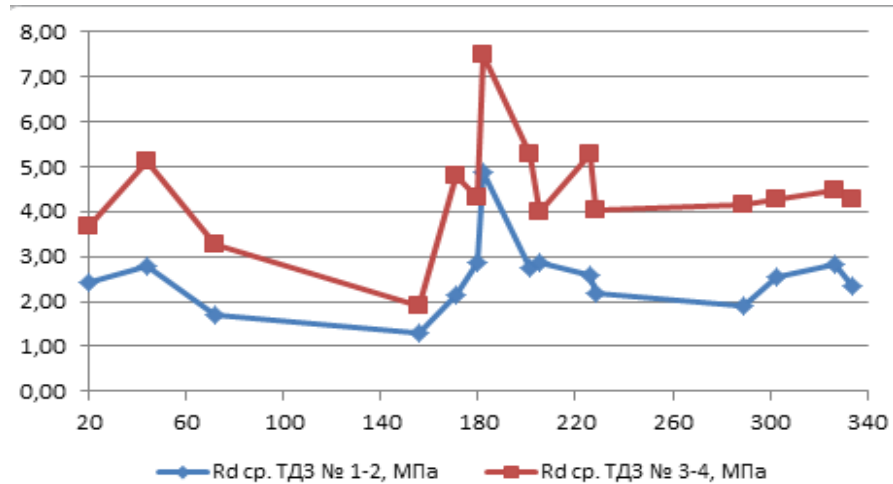


Рисунок 2 – График средних значений условно динамического сопротивления по километражу исследуемых участков а/д «К-17р»

Графики изменения условно динамического сопротивления  $R_d$  по глубине зондирования  $h$ , см в зонах расположения водопропускных труб по ходу и против хода километража по всем объектам исследования приведены в диссертации. Результаты динамического зондирования на участках а/д «К-17р» в зонах расположения водопропускных труб на 20 км а/д «К-17р» приведены на рисунке 3.

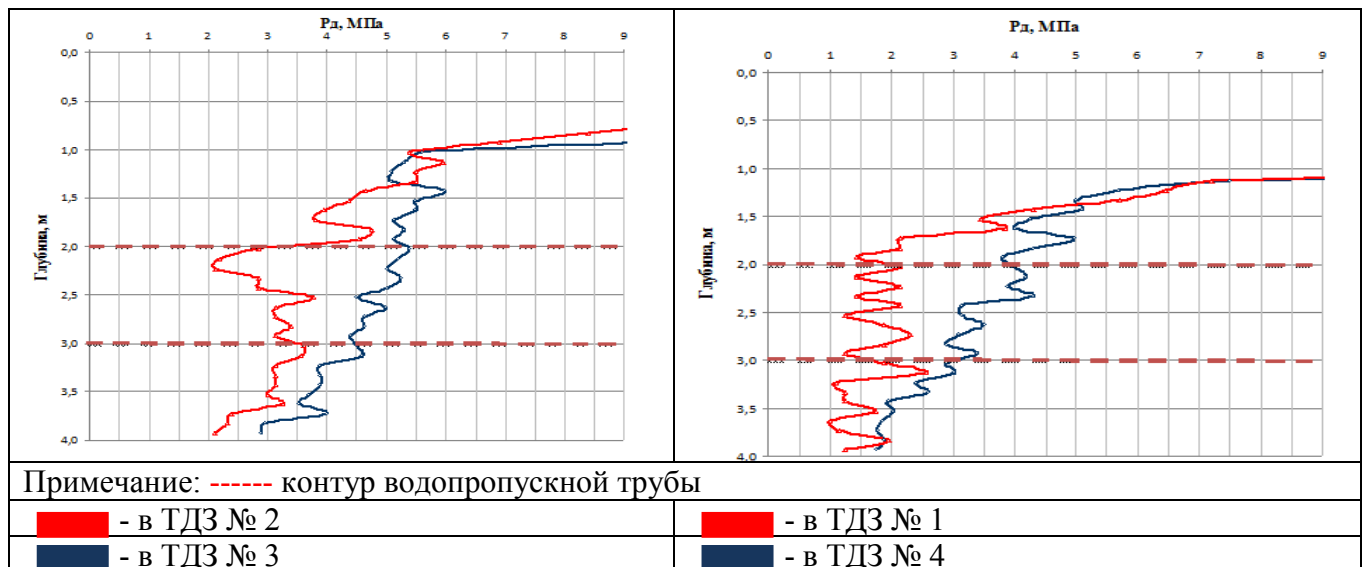


Рисунок 3 – Результаты динамического зондирования на участках а/д «К-17р» в зонах расположения водопропускных труб на 20 км а/д «К-17р»

Установлено изменение величины динамического сопротивления в зависимости от удаления от водопропускных труб, характеризующего разуплотнение грунтов около водопропускных труб.

В геотехнической лаборатории были проведены исследования грунтов земляного полотна. В зонах расположения водопропускных труб отмечены грунты дисперсного класса, группы: связные, подгруппа: осадочные, тип: минеральные и др., вид: глинистые грунты. При сопоставлении физико-механических характеристик грунтов выделены инженерно-геологические элементы (ИГЭ): **ИГЭ-1п** – Супесь твердая, плотная;  $e < 0,7$ ; **ИГЭ-1с** – Супесь твердая, средней плотности;  $e = 0,7-0,8$ ; **ИГЭ-1р** – Супесь твердая, рыхлая;  $e > 0,8$ ; **ИГЭ-2п** – Суглинок легкий, плотный;  $e < 0,7$ ; **ИГЭ-2с** – Суглинок легкий, средней плотности;  $e = 0,7-0,8$ ; **ИГЭ-2р** – Суглинок легкий, рыхлый;  $e > 0,8$ .

Земляное полотно отсыпано суглинком легким, твердым с прослоями полутвердого и супесью твердой с примесью органических веществ 5-6%. Влажность грунтов в барьерных местах водопропускных труб колеблется в интервале от 0,04 до 0,32; на некотором удалении от водопропускных труб в интервале от 0,05 до 0,26. Коэффициент пористости в барьерных местах водопропускных труб в пределах от 0,585 до 0,938; на некотором удалении от водопропускных труб колеблется в интервале от 0,582 до 0,788. Плотность грунтов земляного полотна в барьерных местах водопропускных труб составляет от 1,70 до 1,97 г/см<sup>3</sup> на участках удаленных от водопропускной трубы и от 1,72 до 1,99 г/см<sup>3</sup> на участках вблизи водопропускной трубы.

В лабораторных условиях в приборе стандартного уплотнения была определена максимальная плотность грунта  $\rho_{\max}$ , г/см<sup>3</sup> в соответствии с ГОСТ 22733-2016, посчитаны коэффициенты уплотнения по формуле  $K_y = \rho_{\text{факт}} / \rho_{\max}$  (1), и построены графики зависимости коэффициента уплотнения грунта от глубины проходки шурфа на каждом исследуемом участке а/д «К-17р» (рисунок 4).

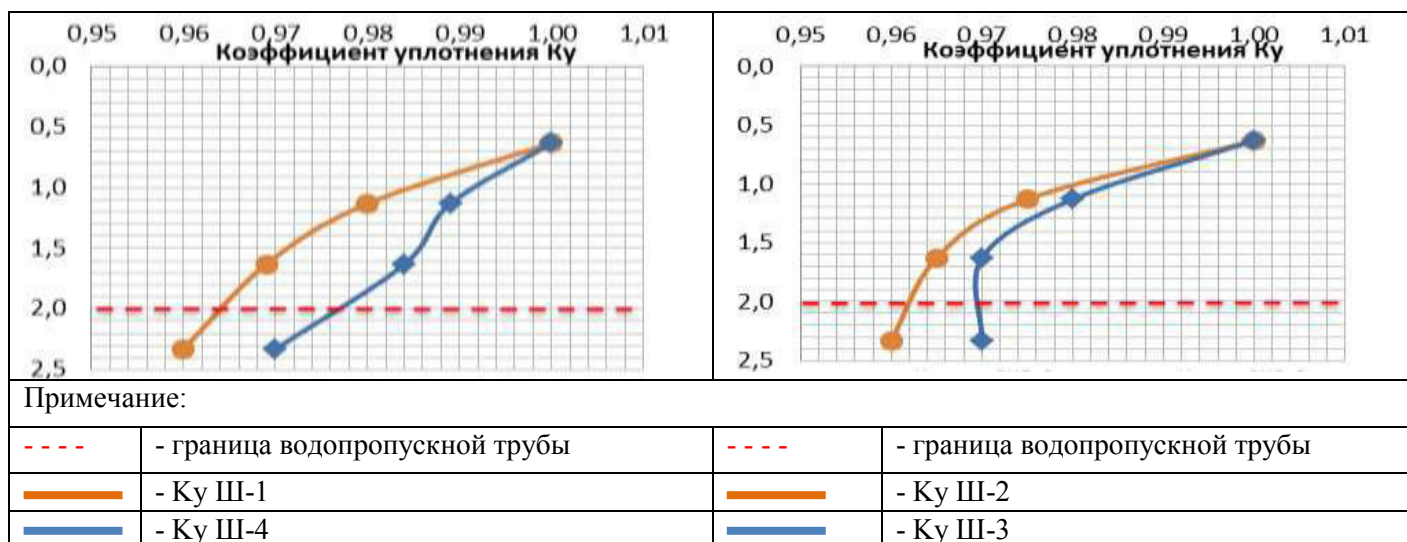


Рисунок 4 – Графики зависимости коэффициента уплотнения грунта земляного полотна  $K_y$  от глубины проходки шурфов по ходу километража

Проанализировав результаты исследований состояния дорожных одежд и физико-механических характеристик грунтов в зонах расположения водопропускных труб на участках а/д «К-17р», можно сделать вывод о наличии разуплотненных зон в земляном полотне, расположенных непосредственно в местах устройства водопропускных труб. Установлено, что одним из факторов, влияющих на разуплотнение грунтов земляного полотна является влажность. В ходе исследований определена оптимальная влажность и максимальная плотность по каждому выделенному ИГЭ (таблица 1).

Таблица 1 – Средние значения плотности, влажности и коэффициента уплотнения грунтов земляного полотна

ИГЭ	Плотность сухого грунта, максимальное	Плотность сухого грунта,	Коэффициент уплотнения	Влажность оптимальная, среднее	Влажность фактическая, среднее
	$\rho_{\text{дmax}}, \text{Г/см}^3$	$\rho_{\text{дфак сред.}}$			
1п	1,96	1,66	0,84	0,21	0,13
1с	1,96	1,55	0,79	0,21	0,14
1р	1,96	1,46	0,74	0,21	0,14
2п	1,98	1,64	0,83	0,25	0,16
2с	1,98	1,55	0,78	0,25	0,19
2р	1,98	1,48	0,71	0,25	0,19

Анализ полученных знаний позволил сделать вывод о том, что в пределах выделенных ИГЭ грунты земляного полотна недостаточно увлажнены.

В таблице 2 приведены обобщенные характеристики прочности грунтов земляного полотна, полученные методом одноплоскостного среза согласно ГОСТ 12248.1-2020.

Таблица 2 – Обобщенные характеристики прочности грунтов земляного полотна земляного полотна

Дорожный район	Адрес участка а/д «К-17р», км	Тип и диаметр в/п труб	C, МПа	φ, град
Ш.Р.4	20	круглая ж/б Ø 1,0 м	0,012	26,6
	44	круглая ж/б Ø 1,5 м	0,020	22,8
	171	круглая ж/б Ø 1,0 м	0,027	23,8
	180	круглая ж/б Ø 1,0 м	0,021	23,3
	182	круглая ж/б Ø 1,0 м	0,020	22,7
	201	круглая ж/б Ø 1,0 м	0,021	23,0
	205	2-х круглая ж/б 2* Ø 1,5 м	0,020	22,7
	226	круглая ж/б Ø 1,0 м	0,022	23,7
	228	круглая ж/б Ø 1,0 м	0,020	22,7
Ш.Х.1	72	скотопрогон 4,0*2,5 м	0,021	23,5
	156	3-х круглая ж/б 3* Ø 1,0 м	0,026	22,6
Ш.Р.3	289	2-х круглая ж/б 2* Ø 1,5 м	0,021	23,5
	303	круглая ж/б Ø 1,0 м	0,022	23,9
	327	круглая ж/б Ø 0,8 м	0,022	24,2
	334	круглая ж/б Ø 1,0 м	0,022	26,2

Штамповые испытания проводились в соответствии с ГОСТ 20276.1-2020 на участках км 72 а/д «К-17р» (Шурф № 1, Шурф № 2, Шурф № 3); км 156 а/д «К-17р» (Шурф № 1); км 180 а/д «К-17р» (Шурф № 1); км 201 а/д «К-17р» (Шурф № 1).

Сопоставление результатов штамповых исследований с лабораторными позволило получить коэффициенты перехода от модуля деформации к модулю упругости грунтов земляного полотна для участков, на которых не проводились штамповые испытания в связи с их высокой стоимостью проведения. В таблице 3 приведены коэффициенты перехода от модуля деформации к модулю упругости грунтов земляного полотна.

Таблица 3 – Коэффициенты перехода от модуля деформации к модулю упругости грунтов земляного полотна

№ ИГЭ	Модуль деформации. Компрессионные испытания $E_k$ средний, МПа	Модуль упругости $E_{ку}$ , МПа	$K_y = E_{ку}/E_k$	Индекс дорожного района согласно СТП ТУАД 32-03-2000	Модуль деформации. Штаповые испытания, $E_{шт}$ , МПа	Коэффициент перехода, $K_y$	Коэффициент перехода, $m_{фк}$
1п	10,5	43	4,09	III.P.3.; III.P.4.; III.X.1.	31	3,87	2,2
2п	10,0	40	4,00	III.P.3.; III.P.4.; III.X.1.	29	3,80	2,5
1с	9,0	37	4,10	III.P.3.; III.P.4.; III.X.1.	26	3,70	2,5
2с	8,4	33	3,90	III.P.3.; III.P.4.; III.X.1.	24	3,60	2,4
1р	3,8	15	3,90	III.P.3.; III.P.4.; III.X.1.	8,7	4,10	2,3
2р	6,0	24	4,00	III.P.3.; III.P.4.; III.X.1.	14	3,90	2,4

Примечание:  $m_{фк}$  – коэффициент перехода от компрессионных модулей деформации  $E_k$  к штаповым  $E_{шт}$ , (МПа);  $K_y$  - коэффициент перехода от модулей общей деформации  $E$  к модулю упругости по второй ветви загрузки  $E_y$ , (МПа).

В процессе диссертационного исследования для обозначения месторасположения грунтов земляного полотна в местах расположения водопропускных труб были введены такие понятия как контурная зона (КЗ) водопропускной трубы и законтурная зона (ЗКЗ).

В диссертации приведены результаты полученных характеристик прочности: угла внутреннего трения  $\varphi$ , (град), удельного сцепления  $C$ , (МПа), и деформируемости: модуля деформации  $E$ , (МПа) и модуля упругости  $E_{упр}$ , (МПа) грунтов земляного полотна для каждого исследуемого участка а/д «К-17р», полученных как в КЗ, так и ЗКЗ водопропускной трубы.

Результаты натуральных и лабораторных исследований позволили установить, что земляное полотно преимущественно сложено из суглинков с числом пластичности  $I_p = 0,08...0,11$  и супесей с числом пластичности  $I_p = 0,01...0,07$ . По величине показателя текучести  $I_L$  исследуемые грунты разделены на суглинки от твердых до полутвердых, и супеси твердые.

Для суглинков характерны следующие показатели: естественная влажность  $W = 0,11-0,32$ ; коэффициент пористости  $e = 0,582...0,938$ ; плотность грунта  $\rho = 1,74...1,99$  г/см<sup>3</sup>; плотность частиц грунта  $\rho_s = 2,69...2,74$  г/см<sup>3</sup>; плотность

сухого грунта  $\rho_d = 1,40...1,71 \text{ г/см}^3$ ; угол внутреннего трения  $\varphi = 22,0...26,5 \text{ град.}$ ; удельное сцепление  $C = 0,019...0,032 \text{ МПа}$ ; модуль деформации  $E = 4,8...11,2 \text{ МПа}$ ; модуль упругости  $E_{упр} = 18,7...44,7 \text{ МПа}$ .

Для супесей характерны следующие показатели: естественная влажность  $W = 0,04-0,25$ ; коэффициент пористости  $e = 0,596...0,875$ ; плотность грунта  $\rho = 1,70...1,98 \text{ г/см}^3$ ; плотность частиц грунта  $\rho_s = 2,69...2,70 \text{ г/см}^3$ ; плотность сухого грунта  $\rho_d = 1,44...1,69 \text{ г/см}^3$ ; угол внутреннего трения  $\varphi = 22,5...31,6 \text{ град.}$ ; удельное сцепление  $C = 0,011...0,029 \text{ МПа}$ ; модуль деформации  $E = 3,0...13,8 \text{ МПа}$ ; модуль упругости  $E_{упр} = 12,0...56,6 \text{ МПа}$ .

В результате проведенных исследований выявлено, что физико-механические характеристики грунтов земляного полотна, расположенных непосредственно в барьерных местах водопропускных труб оказывают существенное влияние на ровность дорожных покрытий. При обследовании пятнадцати участков а/д «К-17р» в местах устройства водопропускных труб установлено, что на четырнадцати из них присутствуют нарушения ровности дорожного покрытия, представленные в виде просадок трещин, выбоин. Это объясняется тем, что физико-механические характеристики грунтов контурной и законтурной зонах водопропускных труб оказались различны. Основное отличие наблюдается при сопоставлении коэффициентов уплотнения грунтов, а также прочностных и деформационных характеристик. При этом худшие значения физико-механических характеристик были получены в земляном полотне, расположенном в непосредственной близости от водопропускной трубы. На участках а/д «К-17р», удаленных от водопропускных труб на некотором расстоянии по обеим сторонам километража отмечается улучшение физико-механических характеристик грунтов земляного полотна и снижение количества дефектов и деформаций дорожной одежды.

Для наглядности и сравнения полученных результатов исследований составлены информационные карточки для каждого участка а/д «К-17р» в зонах расположения водопропускных труб и приведены в диссертации.

Сопоставлением результатов визуального осмотра, измерений ровности дорожных покрытий, динамического зондирования, физико-механических характеристик грунтов установлено, что первопричиной нарушения ровности покрытий дорожных одежд в барьерных местах водопропускных труб является



образование разуплотненных зон.

**В третьей главе** обоснована организация мониторинга параметров автомобильных дорог и прогнозирования физико-механических характеристик грунтов земляного полотна в зонах расположения водопропускных труб; выполнен корреляционно-регрессионный анализ физико-механических характеристик грунтов земляного полотна в зонах расположения водопропускных труб и приведен комплекс статистических моделей; проведена оценка несущей способности земляного полотна автомобильных дорог в зонах расположения водопропускных труб; предложена методика мониторинга и прогнозирования физико-механических характеристик грунтов в зоне расположения водопропускных труб автомобильных дорог и оптимизация инвестиций на содержание автомобильных дорог регионального и межмуниципального значения и искусственных сооружений на них.

Получение значений физико-механических характеристик грунтов земляного полотна в процессе мониторинга затруднено необходимостью проведения большого количества натурных и лабораторных работ, соответственно, количеством времени и стоимостью их выполнения. Поэтому необходимо проведение мониторинга отдельных физико-механических характеристик грунтов земляного полотна и расчет других по имеющимся данным, полученных статистическими методами исследования. Для этого потребуется уточнение ИГЭ при мониторинге каждого последующего участка автомобильной дороги в зоне расположения водопропускной трубы.

При статистическом моделировании использованы: глубина просадки (просвета)  $r$ , мм, плотность грунта  $\rho$ , г/см<sup>3</sup>, угол внутреннего трения  $\varphi$ , град., удельное сцепление  $C$ , МПа, модуль деформации  $E$ , МПа. Выполнена проверка статистических связей:  $r = f(E)$ ;  $E = f(r)$ ;  $r = f(E, \rho, \varphi, C)$ ;  $E = f(\rho)$ ;  $E = f(\varphi)$ ;  $E = f(C)$ ;  $E = f(r, \rho, \varphi, C)$ ;  $\rho = f(r)$ ;  $\varphi = f(r)$ ;  $C = f(r)$ ;  $E = f(\rho, \varphi, C)$ ;  $C = f(\varphi, \rho)$ .

Расчеты выполнены в статистическом блоке EXCEL. Матрица парных коэффициентов корреляции физико-механических характеристик грунтов показывает отсутствие связи между глубиной просадки дорожной одежды над водопропускной трубой ( $r$ ), плотностью грунта ( $\rho$ ), углом внутреннего трения ( $\varphi$ ), удельным сцеплением ( $C$ ), модулем деформации ( $E$ ). В то же время связи между парами характеристик грунтов являются сильными, близкими к функциональным.

Аппроксимация проводилась экспоненциальной, логарифмической, степенной и линейной функциями.

t- критерий Стьюдента ( $t_p > t_{\text{табл}}$ ) подтверждает достоверность коэффициентов линейной зависимости модуля деформации от плотности грунта. Вместе с тем, уравнение регрессии может быть нелинейным. Достоверность правильности выбора взаимосвязи устанавливается критерием Фишера (F - критерий). При  $F_p > F_{\text{табл}}$  уравнение регрессии считается статистически достоверным. Коэффициенты детерминации превышают 0,9, что позволяет принять любое уравнение регрессии из приведенных.

В приложении Г к диссертации приведены статистические исследования на ряде участков автомобильной дороги в зоне расположения водопропускных труб.

Получены следующие уравнения регрессии.

$$1) \quad E = f(r, \rho, \varphi, C); E = -0,012*r + 1,449*\rho + 1,675*\varphi - 543,222*C - 35,5426.$$

Коэффициент детерминации ( $R_2$ -квадрат) составляет 0,99.

$$2) \quad E = f(\rho, \varphi, C); E = 1,439*\rho + 1,55*\varphi - 466,34*C - 33,3424; R_2 \text{ составляет } 0,98.$$

$$3) \quad C = f(\varphi, \rho); C = 0,0027*\rho + 0,0014*\varphi - 0,03; R_2 \text{ составляет } 0,99.$$

Регрессионные модели физико-механических характеристик грунтов на 20 км а/д «К-17р» приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Модели физико-механических характеристик грунтов земляного полотна на км 20 а/д «К-17р»

№ п/п	км	$E = f(\rho)$	К детерм.	$E = f(\varphi)$	К детерм.	$E = f(C)$	К детерм.
Парные уравнения регрессии в затрубном пространстве водопропускных труб							
1	20	$y = 0,208e^{1,9819x}$	0,91	$y = 0,1196e^{0,1379x}$	0,98	$y = 1,6749e^{84,937x}$	0,97
		$y = 22,655\ln(x) - 5,8373$	0,93	$y = 25,793\ln(x) - 80,163$	0,98	$y = 8,3645\ln(x) + 41,327$	0,93
		$y = 0,9697x^{3,4566}$	0,92	$y = 1E-05x^{3,9759}$	0,98	$y = 1432,1x^{1,3006}$	0,96
		$y = 13,023x - 15,984$	0,93	$y = 0,8966x - 19,344$	0,98	$y = 550x - 2,15$	0,96
Парные уравнения регрессии по двум шурфам на удалении $\pm 30$ м от водопропускных труб							
2	20	$y = 0,9074e^{1,1315x}$	0,40	$y = 0,4793e^{0,0892x}$	0,59	$y = 2,8947e^{52,325x}$	0,54
		$y = 13,964\ln(x) - 1,2006$	0,40	$y = 16,99\ln(x) - 50,78$	0,53	$y = 5,399\ln(x) + 29,09$	0,50
		$y = 2,0907x^{2,0475}$	0,41	$y = 0,001x^{2,5901}$	0,59	$y = 196,09x^{0,8158}$	0,55
		$y = 7,7258x - 6,9088$	0,39	$y = 0,5859x - 10,576$	0,53	$y = 347,8x + 1,1673$	0,50

№ п/п	км	$E = f(\rho)$	К детерм.	$E = f(\varphi)$	К детерм.	$E = f(C)$	К детерм.
Парные уравнения регрессии по четырем шурфам по длине в 60 м							
3	20	$y = 0,3475e^{1,6773x}$	0,76	$y = 0,2175e^{0,1165x}$	0,85	$y = 1,9631e^{75,461x}$	0,83
		$y = 19,189\ln(x) - 4,0822$	0,75	$y = 21,549\ln(x) - 66,074$	0,81	$y = 7,4462\ln(x) + 37,512$	0,80
		$y = 1,2603x^{2,9492}$	0,76	$y = 8E-05x^{3,3615}$	0,85	$y = 797,8x^{1,1584}$	0,83
		$y = 10,941x - 12,514$	0,75	$y = 0,748x - 15,229$	0,81	$y = 488,35x - 1,1567$	0,81

В таблице 5 приведены статистические зависимости модуля деформации  $E$  от плотности грунта  $\rho$  для ИГЭ-1п в Шурфе № 1, Шурфе № 2 для экспоненциальной и логарифмической функций.

Таблица 5 – статистические зависимости модуля деформации  $E$  от плотности грунта  $\rho$  для ИГЭ-1п в Шурфе № 1, Шурфе № 2 для экспоненциальной и логарифмической функций

км	$E = ae^{bp}$	a	b	$E = c\ln(\rho) - d$	c	d
20	$E = 0,208e^{1,9819\rho}$	0,208	1,982	$E = 22,655\ln(\rho) - 5,8373$	22,655	5,837
72	$E = 0,0708e^{2,4585\rho}$	0,071	2,459	$E = 26,043\ln(\rho) - 9,2286$	26,043	9,229
156	$E = 0,0021e^{4,3461\rho}$	0,002	4,346	$E = 41,857\ln(\rho) - 19,171$	41,857	19,171
205	$E = 0,0103e^{3,3356\rho}$	0,010	3,336	$E = 33,983\ln(\rho) - 15,835$	33,983	15,835
226	$E = 0,0836e^{2,3491\rho}$	0,084	2,349	$E = 26,208\ln(\rho) - 9,5861$	26,208	9,586
228	$E = 0,0353e^{2,8546\rho}$	0,035	2,855	$E = 28,516\ln(\rho) - 10,572$	28,516	10,572
303	$E = 0,029e^{2,9331\rho}$	0,029	2,933	$E = 29,154\ln(\rho) - 11,241$	29,154	11,241
327	$E = 0,0184e^{3,23\rho}$	0,018	3,230	$E = 33,992\ln(\rho) - 13,646$	33,992	13,646
334	$E = 0,1769e^{2,0158\rho}$	0,177	2,016	$E = 21,451\ln(\rho) - 5,8673$	21,451	5,867

Применительно к водопропускной трубе на конкретном участке целесообразно использовать из четырех рекомендуемых зависимость с наименьшим коэффициентом вариации параметра. Полученные результаты позволяют сократить количество натуральных и лабораторных исследований физико-механических характеристик грунтов, следовательно и затраты на их проведение.

При нарушении ровности дорожных покрытий, выходящих за нормативные допуски, необходим ремонт данного участка дороги. Для разработки проекта его ремонта требуется определение модуля деформации и физико-механических характеристик грунтов. Их получение известными методиками требует проведения большого объема буровых работ и исследований в лабораторных условиях, выполнение указанных мероприятий трудоемко, занимает значительное время и требует существенных затрат. Их сокращение достигается применением поэтапной

методики мониторинга и прогнозирования физико-механических характеристик грунтов в зоне расположения водопропускных труб автомобильных дорог.

Этап 1. Проходка шурфов по глубине и отбор проб грунтов земляного полотна, их анализ на предмет установления типа ИГЭ и оценка степени совпадения с приведенными в настоящем исследовании.

Этап 2. По выбранному типу ИГЭ выбираются регрессионные зависимости модуля деформации и по рекомендованным уравнениям регрессий рассчитываются физико-механические характеристики грунтов.

Этап 3. Производится разработка реконструктивных мероприятий. При необходимости более точных расчетов этапом 2 предусматривается лабораторные определения одной их характеристик грунтов:  $\rho$ ,  $\varphi$ , или  $C$ .

Выбираются уравнения регрессии и рассчитывается модуль деформации и другие показатели грунтов. Так, если в лабораторных испытаниях получена плотность  $\rho$ , то рассчитывают  $\varphi$  и  $C$ . Если получен  $\varphi$  или  $C$ , то рассчитывают  $E$  и  $\rho$ . Далее оценивают целесообразность применения усиления земляного полотна автомобильных дорог в зонах расположения водопропускных труб.

**Четвертая глава.** В результате диссертационного исследования разработан способ укрепления земляного полотна автомобильных дорог в местах устройства водопропускных труб на основе мониторинга физико-механических характеристик грунтов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение проблемы обеспечения безопасного и надежного движения при эффективной эксплуатационной работе автомобильной дороги в условиях рыночной экономики представляет собой ведущий замысел, цель и конструктивный принцип научно-проектного, технического, организационно-технологического и ресурсного её решения.

1. Количественная оценка эксплуатационных параметров дорожных одежд, выполненная в местах устройства водопропускных труб, показала, что при приближении к трубе увеличивается количество дефектов и деформаций. А относительно точек, расположенных на 30-метровом удалении до 12% не соответствует нормативному значению. При этом глубина просвета под

трехметровой рейкой при измерении продольной ровности между надтрубной точкой и удаленными на 0,5 м. возрастает до 35%, при удалении на 1 м. и более глубина просвета уменьшается.

2. Исследования характеристик грунтов земляного полотна проведены в рамках 6-ти выделенных ИГЭ. Естественная влажность грунтов колеблется от 0,04 до 0,32, коэффициент пористости от 0,585 до 0,938. Плотность грунта составляет от 1,72 до 1,99 г/см<sup>3</sup> на участках, удаленных от водопропускных труб и от 1,70 до 1,97 г/см<sup>3</sup> в местах устройства водопропускных труб, что свидетельствует о наличии разуплотненных зон, находящихся в затрубном пространстве водопропускных труб. Динамическим зондированием обнаружены резкие скачки и пики условного динамического сопротивления  $R_d$  в интервалах глубин от 0,5 до 2,0 м. в ТДЗ № 1 и ТДЗ № 2, расположенных в пазухах водопропускных труб, при этом условное динамическое сопротивление грунтов в среднем составляет 2 МПа. В ТДЗ № 3 и ТДЗ № 4 на этих же глубинах динамическое сопротивление грунтов в среднем составляет 5,2 МПа, что подтверждает вывод о наличии разуплотненных зон в затрубном пространстве водопропускных труб рассматриваемого участка при высоте насыпей более 2,5 м.

3. Получены корреляционные зависимости между: модулем деформации  $E$  и плотностью грунта  $\rho$ ; модулем деформации  $E$  и углом внутреннего трения  $\varphi$ ; модулем деформации  $E$  и удельным сцеплением  $C$ , коэффициент детерминации для которых составил 0,95-0,9, а также построены многофакторные модели, устанавливающие связь между модулем деформации  $E$  и приведенными выше характеристиками грунтов земляного полотна.

4. Предложена методика мониторинга и прогнозирования физико-механических характеристик грунтов в зоне расположения водопропускных труб автомобильных дорог, позволяющая осуществлять ежегодный контроль качества автомобильных дорог и подход к оптимизации инвестиций на содержание автомобильных дорог регионального и межмуниципального значения и искусственных сооружений на них.

5. Разработан способ укрепления земляного полотна автомобильных дорог в местах устройства водопропускных труб на основе мониторинга физико-механических характеристик грунтов, позволяющий расширить границы

применения метода напорного инъецирования для создания усиленных зон земляного полотна автомобильных дорог в местах устройства водопропускных труб, защищенный патентом РФ.

6. Дальнейшие исследования направлены на разработку инновационных технических и организационно-технологических средств и методов реализации программы комплексного развития транспортной инфраструктуры Новосибирской агломерации.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:**

1. Воробьев, В. С. Мониторинг несущей способности основной площадки земляного полотна автомобильных дорог в зоне расположения водопропускных труб / В. С. Воробьев, **Е. Л. Карелина**, И. Б. Репина // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4 (63). – С. 106-113.

2. Воробьев, В. С. Статистические модели физико-механических характеристик грунтов автомобильных дорог в зоне расположения водопропускных труб / В. С. Воробьев, **Е. Л. Карелина**, О. А. Бендер, К. В. Каталымова // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2018. – Т. 15. – № 4 (62). – С. 560-573.

3. Воробьев, В. С. Концепция повышения эффективности содержания и реконструкции инженерных сооружений автомобильных дорог / В. С. Воробьев, О. А. Бендер, **Е. Л. Карелина**, К. В. Каталымова // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 2 (45). – С.11-18.

4. Воробьев, В. С. Влияние физико-механических характеристик грунта земляного полотна на образование деформаций дорожной одежды / В. С. Воробьев, **Е. Л. Пак** (Е.Л. Карелина) // Вестник ТГАСУ. – 2017. – № 1 (60). – С. 190-198.

### **Статьи в изданиях, включенных в международные базы цитирования:**

5. Vorobyov, V. Physical and mechanical characteristics of soil within the culvert pipes location of roads. / V. Vorobyov, **E. Karelina**, N. Shcherbakova // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Т. 1116. – P. 257-267.

**Статьи в сборниках материалов конференций и других изданиях:**

6. **Карелина, Е. Л.** Укрепление грунтов земляного полотна автомобильных дорог методом напорной инъекции / Е. Л. Карелина // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – № 1-2. – С. 134-138.

7. **Карелина, Е. Л.** Определение причин нарушения ровности покрытия дорожной одежды на участках устройства водопропускных труб / Е. Л. Карелина // Политранспортные системы: Материалы VIII Международной научно-технической конференции в рамках года науки Россия – ЕС «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке». – 2015. – С.287-293.

**Патенты на изобретения и полезные модели:**

8. Патент 158595 Российская Федерация, МПК E02D 5/22 (2006.01). Свая / В. С. Воробьев, А. Л. Ланис, П. С. Пинчук, Н. П. Запашикова, **Е. Л. Карелина**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО СГУПС. – № 2015113985/03; заявл. 15.04.2015; опубл. 20.01.2016, Бюл. № 2. – 4 с.

9. Патент 161251 Российская Федерация, МПК E02D 5/48 (2006.01). Составная свая / В. С. Воробьев, А. Л. Ланис, П. С. Пинчук, Н. П. Запашикова, **Е. Л. Карелина**: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО СГУПС. – № 2015138252/03; заявл. 07.09.2015; опубл. 10.04.2016, Бюл. № 10. – 5 с.

10. Патент 2588250 Российская Федерация, МПК E02D 17/20 (2006.01). Способ укрепления земляного полотна автомобильных дорог в местах устройства водопропускных труб / А. Л. Ланис, **Е. Л. Карелина**: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО СГУПС. – № 2015115431/03; заявл. 23.04.2015; опубл. 27.06.2016, Бюл. № 18. – 7 с.

**Карелина Елена Леонидовна**

**МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ В ЗОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ  
ВОДОПРОПУСКНЫХ ТРУБ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать 08.11.2023 г.

1,5 печ.л. Тираж 100 экз. заказ № \_\_\_\_\_

Издательство ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»  
630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191. Тел. (383) 328-03-81. e-mail: bvuv@mail.ru

---