

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет
(СибАДИ)»

Кафедра «Строительство и эксплуатация дорог»

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Об основных результатах подготовленной научно-квалификационной
работы (диссертации)

«Совершенствование методов конструирования и расчета дорожных одежд
на дорогах с низкой интенсивностью движения»

по направлению 08.06.01 «Техника и технологии строительства»

направленность «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов,
аэродромов, мостов и транспортных тоннелей»

Аспирант А.С. Пролыгин



Допустить к защите научного доклада:

Заведующий кафедры «СЭД» к.т.н., доцент, Г.В. Долгих



Научный руководитель

Заведующий кафедры «СЭД» к.т.н., доцент, Г.В. Долгих



Нормоконтроль А.Л. Калинин



Омск – 2024

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

По данным из официальных источников, только 43,1% дорог регионального и межмуниципального значения соответствовали нормативным требованиям в конце 2017 года. Состояние автомобильных дорог напрямую влияет на качество жизни населения, что в свою очередь отражается в качестве и доступности транспортных услуг оказываемых населению. В рамках развития транспортной инфраструктуры была разработана транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. Для реализации данной стратегии в 2019 году была разработана и принят национальный проект «Безопасные и качественные дороги», призванный повысить процент дорог отвечающих нормативным требованиям. На сегодняшний момент времени в данном проекте принимают участие 84 региона России, включая Омскую область, и на конец 2023 года процент дорог, отвечающий нормативным требованиям, составляет 51% от общего количества.

Согласно данным Росавтодора протяженность автомобильных дорог, относящихся к собственности Омской области, составляет около 24 тыс. км. Из них доля дорог с твердым покрытием составляет около 60%. Доля дорог отвечающая нормативным требованиям, к их транспортно-эксплуатационному состоянию, составляет примерно 50%. Региональная дорожная сеть остро нуждается в расширении, реконструкции и ремонте дорог, в том числе и дорог с низкой интенсивностью движения, допускающих устройство дорожных одежд относительно малой стоимости – низшего типа.

Существующие стандарты, нормативные и методические документы РФ, в своём большинстве практически не рассматривают вопросы конструирования и расчёта дорожных одежд низшего типа, регламентируя назначение конструкций таких дорожных одежд по региональным документам и альбомам, разработанных на основе практического опыта.

Кроме того, в части рассматриваемых вопросов, предварительные стандарты, своды правил и методические документы содержат противоречия, тем

самым, оставляя не ясные вопросы, как по области применения дорожных одежд низшего типа, так и в области возможного применения к их расчёту методик проектирования дорожных одежд нежесткого типа.

Эти факторы служат обоснование настоящего исследования посвященному совершенствованию методов конструирования и расчета дорожных одежд на дорогах с низкой интенсивностью движения.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами сопротивлению грунтов сдвигу занимались отечественные специалисты, такие как Н.П. Пузыревский, Н.Н. Маслов, М.Б. Корсунский, В.Д. Казарновский, А.М. Кривисский, М.Г. Горячев, Б.С. Радовский, А.В. Смирнов, В.В. Соколовский и многие другие. За рубежом в данном направлении работали В.Н. Яромко, И.В. Яропольский, К. Terzaghi, G.K. Arnold, I. Gachwendt, D.C. Druker, F.Finn, S. Hushek и другие.

Основная идея работы состоит в том, что введение дополнительного критерия, по проверки сдвигоустойчивости слабосвязных слоев дорожной одежды и земляного полотна, позволит конструкции дорожной одежды работать в линейной стадии зависимости осадки от давления, что в свою очередь обеспечит конструкции расчетный срок службы дорожной одежды с учетом накопления остаточных деформаций, не превышающих предельных допустимых значений.

Объект исследования – грунт земляного полотна и слабосвязные слои дорожной одежды автомобильных дорог.

Предмет исследования – напряженное состояние, возникающее в слабосвязных слоях дорожной одежды и грунте земляного полотна.

Цель диссертационного исследования – совершенствование методов расчета и конструирования дорожных одежд на дорогах с низкой интенсивностью движения за счёт введения дополнительного критерия проверки по сдвигоустойчивости.

Исходя из цели, сформулированы **задачи исследования**:

– изучить состояние вопроса и теоретические положения по методам проектирования дорожных одежд низшего типа;

- выполнить испытания и определить механические свойства грунтов и грунтощебёночных материалов;
- изготовить в лабораторном полноразмерном лотке модели грунтощебёночных дорожных одежд с различным содержанием и фракциями щебня;
- выполнить лотковые штамповые испытания моделей дорожных одежд из грунтощебёночных материалов;
- совершенствование расчета дорожных одежд низшего типа;
- выполнить конструирование и расчёт дорожных одежд низшего типа для опытного строительства;
- произвести испытания дорожных одежд на опытных участках штампом и транспортным потоком для определения их механических свойств и расчётных параметров.

Научная новизна:

- получены значения параметров предельной прямой Мора - Кулона (сцепления и угла внутреннего трения) для грунтощебёночной смеси, уплотненной до требований, предъявляемых к конструктивным слоям дорожных одежд;
- установлена зависимость модуля деформации грунтощебёночной смеси от содержания щебня и его фракции;
- определена зависимость модуля деформации грунтощебёночной смеси от влажности связного грунта в нем;
- разработана математическая модель позволяющая вычислять значения модуля деформации грунтощебёночного материала в зависимости от влажности применяемого грунта, содержания и фракции, применяемого щебня;

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

– получение математической модели зависимости модуля деформации грунтощебеночного слоя от влажности применяемого грунта, содержания и фракции, применяемого щебня;

– получение математической формулы для определения сдвигоустойчивости конструкции дорожной одежды по напряжениям сдвига.

Практическая значимость работы заключается в возможности проектирования дорожной одежды на дорогах с низкой интенсивностью движения с обеспечением сдвигоустойчивости грунтов и слабосвязных слоев дорожной одежды с сохранением эксплуатационных характеристик в течении их срока службы.

Методология и методы исследования. Теоретической и методологической основой диссертационного исследования послужили общепринятые положения теории и практики расчета конструкции дорожной одежды по сопротивлению сдвигу. Теоретические расчеты выполнены с использованием апробированных математических методов. Обработка результатов натурных экспериментов проведена методами математической статистики.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается методологической базой исследований, основанной на фундаментальных теоретических положениях; соблюдением основных принципов физического и математического моделирования; достаточным объемом экспериментальных данных, полученных с использованием приборов и оборудования, прошедших поверку и аттестацию. Результаты исследования докладывались на четырех научных конференциях.

Положения, выносимые на защиту:

– совершенствование расчета грунтов земляного полотна, и грунтощебеночных материалов дорожных одежд с НИД по сопротивлению сдвигу;

– параметры прочности грунтов Омской области и грунтощебеночного материала для расчета конструкции дорожных одежд на дорогах с низкой интенсивностью движения;

— математическая модель для определения модуля деформации слоя дорожной одежды из грунтощебеночного материала, при различных относительных влажностях грунта и процентного содержания щебня различных фракций, входящих в состав смеси.

Личный вклад автора. Заключается в формировании общей идеи и цели исследования. Автором лично были произведены лабораторные и экспериментальные исследования; произведена обработка и выполнен анализ полученных данных, на основе которых получены математические зависимости физико-механических свойств испытанных материалов. Все результаты в работе получены самостоятельно.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Commemorating the 90th anniversary of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering «Proceedings of the xiii international scientific conference on architecture and construction 2020». – Новосибирск, 2021 г.
2. VI Международная научно-практическая конференция «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации». – Омск, 2021 г.
3. V Национальная научно-практическая конференция «Образование. Транспорт. Инновации. Строительство». – Омск, 2022 г.
4. VII Международная научно-практическая конференция, приуроченной к проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации». – Омск, 2022 г.

Публикации. На основании результатов исследований было опубликовано 7 работ, из которых 7 в научных изданиях рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Внедрение. Результаты проведённых исследований были использованы при разработке стандарта организации «СТО 03709897-001-2021 Дороги

автомобильные общего пользования. Проектирование, строительство, капитальный ремонт и ремонт дорожных одежд низшего типа».

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертационного исследования, характеризуется степень ее разработанности, определяются цели и задачи, осуществляется выбор предмета и объекта исследования. Формулируются положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится анализ принципов конструирования и расчета дорожных одежд на дорогах с низкой интенсивностью движения согласно нормативным требованиям. Из анализа следует, что требования предъявляемы к расчету конструкции дорожной одежды для дорог с низкой интенсивностью движения различны. Так дорожные одежды капитального и облегченного типа рассчитывают по модулю упругости, а расчет переходного и низшего типов ведут по модулю деформации.

В свою очередь расчет по общему модулю деформации, регламентированный ГОСТ Р 71244, ведется по методу созданному Н.Н. Ивановым, который применялся в ранее действовавшем ВСН 46-60 для расчета любой нежесткой дорожной одежды. Решение в данном методе основано на принципе расчета осадки грунтового полупространства, который заключается в интегрировании функциональной зависимости деформаций от напряжений по глубине полупространства. В данном способе предполагается, что грунты или зернистые материалы испытывают трехосное или, как приближение, одноосное сжатие. Поэтому методика расчета дорожной одежды, регламентированная ГОСТ Р 71244, наилучшим образом подходит к расчету дорожных одежд низшего типа, хотя сдержит допущение об одноосном сжатии зернистого материала и грунта.

Несмотря на это в методе расчета конструкции дорожной одежды по ГОСТ Р 71244 существует недостаток, связанный с тем, что не зависимо от величины давления в этом методе используется линейная зависимость деформации от напряжения. Такой характер деформирования возможен лишь в рамках первой стадии работы массива грунта, называемой стадией уплотнения. Данная стадия

ограничивается первой критической нагрузкой Н.М. Герсеванова, теоретическое решение которой может быть реализовано в виде критериев расчета по касательным напряжениями или допускаемым давлениям. Поэтому данная методика, нуждается в дополнительном критерии проверки достаточности толщины дорожной одежды по сопротивлению грунтов и материалов сдвигу. Это позволит оценить возможность расчета дорожной одежды по формуле Н.Н. Иванова или по ее графоаналитическому аналогу (номограмме) ГОСТ Р 71244, основанному на линейной зависимости между деформацией и напряжением.

На основе произведенного анализа сформулированы цель и задачи исследований.

Во второй главе приводится обоснование расчета по сопротивлению сдвигу грунтов земляного полотна и слабосвязных слоев дорожной одежды и его совершенствование.

Для решения задачи по сопротивлению грунтов сдвигу применяют разные методы, которые основаны на различном математическом аппарате. Одним из основных методов, прошедшим проверку временем, и используемым в настоящее время в дорожной отрасли, является метод линейно-деформируемой среды. В основу расчета, для работы основания в первой стадии деформирования, закладывается условие пластичности. В выбранное условие пластичности подставляют выражения для расчета главных напряжений, которые прямо пропорциональны давлению на основании при разных нагрузках. Вывод формулы производят из условия возникновения предельного состояния в наиболее опасной точке для расчета безопасного давления. В таком случае, полученная формула расчета безопасного давления, представляет собой решение для расчета первой критической нагрузки Н.М. Герсеванова.

Такое решение получено Н.П. Пузыревским для расчета безопасного давления воспринимаемого грунтовым основанием от ленточного фундамента. Принципам данного решения соответствуют и решение полученное А.М. Кривисским, которое положено в основу расчета дорожных одежд нежесткого типа по сопротивлению сдвигу и реализовано как в ранее действующих

нормативах ВСН 46-72, ВСН 46-83, ОДН 218.046-01, МОДН 2-2001, так и в современных вариантах ПНСТ 265-2018, ПНСТ 542-2021. Из анализа различных вариантов нормативного расчета критерия по сопротивлению сдвигу следует, что по мере развития нормативных документов, критерий совершенствовался и видоизменялся, что привело к ошибочным решениям, не позволяющим считать их верными. Одним из недостатков является то, что при определении двух составляющих напряжений сдвига используются разные значения угла внутреннего трения, вследствие чего эти составляющие вычислены для разных площадок.

Поэтому для расчета грунта земляного полотна и слабосвязных слоев дорожной одежды по сопротивлению сдвигу было взято оригинальное условие пластичности Мора – Кулона, которое положено в основу решения А.М. Кривисского. Порядок расчета по сопротивлению сдвига и формулы представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Порядок расчета по критерию сопротивления сдвигу

Номер действия и действие словами	Формула
1. Вычисление напряжения сдвига от временной нагрузки.	$\tau_{ан} = \frac{1}{\cos\varphi} \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \operatorname{tg}\varphi \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$
2. Вычисление напряжения сдвига от собственного веса дорожной одежды суммарной толщиной h .	$\tau_{ав} = \frac{\gamma_{ср}}{2 \cdot \cos\varphi} \cdot [1 - \xi - (1 + \xi) \cdot \sin\varphi] \cdot h;$ $\xi = \frac{\mu}{1 - \mu}.$
3. Вычисление полного напряжения сдвига с использованием принципа суперпозиции силы.	$T_a = \tau_{ан} + \tau_{ав}$
4. Сравнение полученных значений и определение достаточности толщины конструкции дорожной одежды	$T_a \leq \frac{T_{нр}}{K_{str}}$
где σ_1 и σ_3 – максимальное и минимальное главные напряжения, Па; φ - угол внутреннего трения, град; $\gamma_{ср}$ – удельный вес дорожной одежды, вычисляемый как величины усредненная по толщине дорожной одежды, МН/м ³ ; h – суммарная толщина дорожной одежды, м; ξ – коэффициент бокового давления; μ – коэффициент Пуассона; T_a – активное напряжение сдвига, возникающее в наиболее опасной точке проверяемого по условию сдвигоустойчивости слоя, МПа; $T_{нр}$ – предельное напряжение сдвига, определяемое в той же точке и на той же площадке, что и активное напряжение сдвига, Мпа; K_{str} – требуемая величина коэффициента прочности при расчете по сопротивлению сдвигу, определяемая с учетом заданной надежности проектирования (коэффициента надежности).	

Расчет напряжения сдвига от временной нагрузки требует вычисления главных напряжений. В этих целях можно применить решения теории упругости,

предназначенные для расчета главных напряжений, распределенной по круглой площадке. Одним из таких является решение С.Р. Foster, R.G. Ahlvin, Н.Н. Ulery, которое можно записать в виде:

$$\sigma_1 = p \cdot \left(1 - \left(1 + \left(\frac{D}{2 \cdot z} \right)^2 \right)^{-1,5} \right), \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 = p \cdot \left(\frac{1+2 \cdot \mu}{2} - \frac{1+\mu}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{2 \cdot z} \right)^2}} + \frac{1}{2 \cdot \left(1 + \left(\frac{D}{2 \cdot z} \right)^2 \right)^{1,5}} \right), \quad (2)$$

где D – диаметр круглой площадки, по площади которой распределена нагрузка, м; z – расстояние по оси симметрии нагрузки от поверхности, к которой приложено давление p до точки расчёта напряжений, м; μ – коэффициент Пуассона.

Эти зависимости не учитывают параметры прочности и деформируемости материала полупространства. Поэтому такие зависимости нельзя применять для расчета главных напряжений в слое дорожной одежды. Однако зависимости (1) и (2) можно модифицировать, используя в них принцип Н. Одемарка.

Суть метода Н. Одемарка метода состоит в определении толщины слоя из условия его эквивалентности по жесткости слою из другого материала. После преобразований и подстановки в зависимости (1) и (2), формулы примут следующий вид:

$$\sigma_1 = p \cdot \left(1 - \left(1 + \left(\frac{D}{2 \cdot h \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{осн}}{E_{сл}}}}} \right)^2 \right)^{-1,5} \right), \quad (3)$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 = p \cdot \left(\frac{1+2 \cdot \mu}{2} - \frac{1+\mu}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{2 \cdot h \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{осн}}{E_{сл}}}}} \right)^2}} + \frac{1}{2 \cdot \left(1 + \left(\frac{D}{2 \cdot h \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{осн}}{E_{сл}}}}} \right)^2 \right)^{1,5}} \right), \quad (4)$$

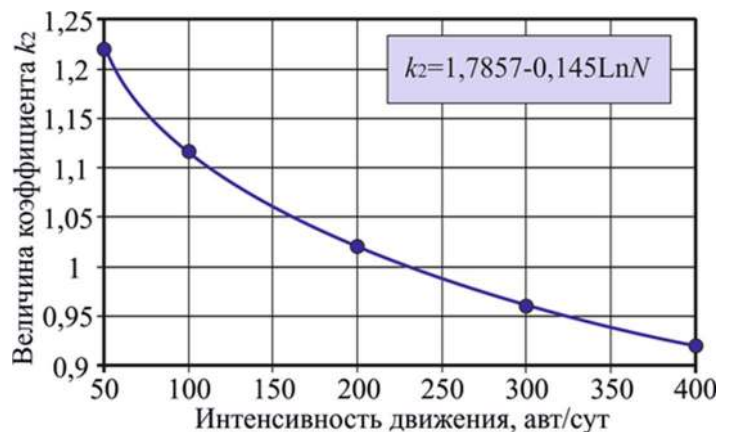
где $E_{осн}$ и $E_{сл}$ – модуль деформации основания и средневзвешенный модуль деформации слоев дорожной одежды, Мпа; h – толщина слоя, м.

Так как расчет активно напряжения сдвига основывается на методике, действовавших ранее ВСН 46-72, ВСН 46-83, следовательно, допустимое напряжение сдвига должно определяться по этим же методикам. Допускаемое напряжение сдвига в грунте определяем по формуле:

$$T_{пр} = c_{гр} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3, \quad (5)$$

где $c_{гр}$ - сцепление в грунте активной зоны земляного полотна в расчетный период, МПа; k_1 - коэффициент, учитывающий снижение сопротивления грунта сдвигу под агрессивным действием подвижных нагрузок, колебания и т.д. (при расчете на воздействие кратковременных нагрузок принимают $k_1 = 0,6$, при длительном действии нагрузок с малой повторностью $k_1 = 0,9$); k_2 - коэффициент запаса на неоднородность условия работы конструкции, связанный с недоучетом неблагоприятных природных особенностей, технологических и других причин (эти факторы проявляются тем больше, чем выше интенсивность движения; коэффициент k_2 определяется по

графику на рисунке 1, при расчете на длительное действие нагрузки $k_2 = 1,23$); k_3 - коэффициент, учитывающий особенности работы грунта в конструкции, связанные с



увеличением фактического сцепления в грунте за счет

Рисунок 1 - Зависимость коэффициента k_2 от интенсивности движения N

защемления, явления дилатансии и зацепления частиц (введением коэффициента k_3 учитывается также отличие реальных условий сопряжения слоев на контакте от принятых при построении номограммы в ВСН 46-83.

В третьей главе произведено обоснование выбранного метода лабораторных испытаний в приборе трехосного сжатия, описан способ изготовления образцов из грунтощебеночного материала, представлены

результаты расчета прочностных характеристик грунтов Омской области и грунтощебня.

При расчете грунтов земляного полотна и слабозвязных слоев дорожной одежды по критерию сопротивления сдвигу устойчивости необходимо знать их прочностные характеристики, это угол внутреннего трения и удельное сцепление. Определить данные характеристики можно методом одноплоскостного среза согласно ГОСТ 12248.1, либо методом трехосного сжатия согласно ГОСТ 12248.3.

Согласно требованиям нормативного документа одноплоскостной срез производится методом консолидировано-дренированного (медленного) среза. По результатам которого можно определить значения эффективных и остаточных (по схеме «плашка по плашке») углов внутреннего трения φ и φ_r и удельного сцепления c и c_r .

В приборе трехосного сжатия проводятся неконсолидированно-недренированные, консолидированно-недренированные, консолидировано-дренированные испытания. По результатам испытания можно получить значения не только прочностных, но и деформационных характеристик испытываемого материала.

Испытания в приборе трехосного сжатия являются предпочтительней, так как наилучшим образом соответствуют реальным условиям работы грунта в массиве при воздействии на него вертикальной нагрузки. Это можно объяснить тем, что при воздействии вертикальной нагрузки грунтовые агрегаты в массиве грунта испытывают, как деформации сжатия в одном направлении, так и деформации расширения в двух других направлениях. Испытывая деформации расширения, грунтовые агрегаты давят друг на друга, вследствие чего возникает трехосное сжатие.

Испытания образцов изготовленных из грунта и грунтощебнистого материала в приборе трехосного сжатия проводились по консолидированно-недренированной схеме. Выбор данной схемы обусловлен характером работы конструкции дорожной одежды и земляного полотна в расчетный период года

(весенний), когда влажность грунта увеличивается, дренирование воды из грунта не происходит, что приводит к снижению прочности дорожной одежды.

Перед проведением лабораторных работ все материалы были испытаны согласно требованиям нормативных документов, на данные материалы, для их классификации и определения физико-механических характеристик. Результаты испытания грунта представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Показатели физико-механических свойств суглинка тяжелого

Наименование показателя	Величина
Естественная влажность W , %	19,9
Влажность на границе текучести W_L , %	36,6
Влажность на границе раскатывания W_p , %	19,5
Число пластичности I_p , %	16,8
Показатель текучести I_L , д.е.	0,03
Плотность частиц грунта ρ_s , г/см ³	2,68
Оптимальная влажность W_{opt} , %	18,6
Максимальная плотность сухого грунта ρ_{dmax} , г/см ³	1,69

Образцы для испытания изготавливались с заданным значением плотности и влажности согласно требованиям ГОСТ 30416. Для этого грунт сначала уплотнялся в приборе стандартного уплотнения (ПСУ), после чего из грунта, с помощью устройства для подготовки проб и кольца диаметром 50 мм и высотой 100 мм, вырезался образец. Далее образец загружался в прибор трехосного сжатия и испытывался согласно требованиям, регламентированным ГОСТ 12248.3.

Согласно требованиям ГОСТ 12248.3, пункт 5.7, максимальный размер включений в материале не должен превышать 1/6 от диаметра образца. Поэтому для испытания крупнообломочных грунтов применяют специальное оборудование с камерой трехосного сжатия диаметром 300 мм и высотой 600 мм.

Из-за больших размеров образца, установки должны развивать значительное усилие для создания нужного давления, а также обладать достаточно большим ходом штока, для достижения требуемых относительных деформаций. Не меньшую сложность составляет измерение радиальных и объемных деформаций, а также дегазация воды, ввиду большого объема камеры

трехосного сжатия. Немало важным является и изготовление образцов для таких установок. Из-за больших размеров образец изготавливается сразу в оболочке камеры трехосного сжатия методом послойной отсыпки, уплотнение проводится вакуумированием образца. Результаты специалистов, проводивших подобные испытания, показывают, что при таком способе изготовления образцов сложно получить как требуемую плотность образцов, так и одинаковую плотность образцов для серии испытаний.

Другой способ изготовления образцов заключается в удаление частиц недопустимого размера, что позволяет применять камеры трехосного сжатия меньшего размера, а образцы изготавливать в приборе стандартного уплотнения. При таком способе образцы имеют близкие значения плотности сухо материала, но максимальный размер зерна щебня меньше применяемого в натуральных конструкциях.

В нашем случае применялась камера трехосного сжатия диаметром 50 мм и высотой 100 мм. Поэтому максимальный размер выключений щебня был ограничен величиной 8 мм. Требуемый щебень отсеивался из щебня фракции 4-16 мм. Трамбовка грунтощебеночной смеси производилась в малом приборе стандартного уплотнения, используя две насадки для получения требуемой высоты образца. После изготовления образцы помещались в установку трехосного сжатия и испытывались по ГОСТ 12248.3, так же как и образцы из грунта.

Угол внутреннего трения φ и сцепление c для эффективных напряжений определяли по формулам, регламентированным ГОСТ 12248.3–2021, которые имеют вид:

$$\varphi_{ef} = \arctg \frac{N-1}{2\sqrt{N}}, N = \frac{n \cdot \sum_{i=3}^n \sigma_{1ef} \cdot \sigma_{3ef} - \sum_{i=3}^n \sigma_{1ef} \cdot \sum_{i=3}^n \sigma_{3ef}}{n \cdot \sum_{i=3}^n \sigma_{3ef}^2 - (\sum_{i=3}^n \sigma_{3ef})^2}, \quad (6)$$

где σ_{1ef} и где σ_{3ef} – максимальное и минимальное главное напряжение (полные или эффективные) в i -м испытании, кПа; n – количество опытов при определении одной пары параметров сопротивления сдвигу.

$$c_{ef} = \frac{M}{2 \cdot \sqrt{N}}, M = \frac{\sum_{i=3}^n \sigma_{1ef} \cdot \sum_{i=3}^n \sigma_{3ef}^2 - \sum_{i=3}^n \sigma_{3ef} \cdot \sum_{i=3}^n \sigma_{1ef} \cdot \sigma_{3ef}}{n \cdot \sum_{i=3}^n \sigma_{3ef}^2 - (\sum_{i=3}^n \sigma_{3ef})^2}, \quad (7)$$

Результаты проведенных испытаний представлены в таблице 3, 4.

Таблица 3 – Эффективные параметры сопротивления сдвигу суглинков и глин Омской области

ДКЗ и подзона	Схема увлажнения рабочего слоя	Эффективные сцепление и угол внутреннего трения			
		суглинков легкий		супесь и суглинок пылеватые, суглинков тяжелый, глины	
		c_{ef} , МПа	φ_{ef} , град	c_{ef} , МПа	φ_{ef} , град
II ₂	1	0,050	22,8	0,038	19,5
	2	0,043	20,6	0,032	17,1
	3	0,038	19,5	0,023	16,0
III ₁	1	0,058	25,3	0,048	22,0
	2 – 3	0,048	22,0	0,038	19,5
IV	1	0,067	27,8	0,058	25,3
	2 – 3	0,058	25,3	0,045	21,2

Таблица 4 – Расчетные значения характеристик грунтощебня, приготовленного при содержании грунта и щебня в количестве по 50 % по объему смеси

Характеристики влажности		Параметры сопротивления сдвигу					
W, %	W/W _T	tgφ	φ, град	c, МПа	tgφ _{ef}	φ _{ef} , град	c _{ef} , МПа
26,6	0,73	0,410	22,3	0,011	0,853	40,5	0,004

В четвертой главе описан процесс изготовления моделей конструкций дорожных одежд из грунтощебеночного материала с различным содержанием щебня по объему материала, методика проведения штамповых испытаний, обработка полученных значений осадки от передаваемого давления для расчета модуля деформации материала, а также учет влияния различной влажности грунта на модуль деформации грунтощебеночного слоя.

Для изготовления модели земляного полотна применялся суглинок тяжелый пылеватый с максимальной плотностью сухого грунта 1,69 г/см³ и оптимальной влажностью 18,3 %. Отсыпка земляного полотна производилась послойно, толщина слоя в неуплотненном состоянии составляла 12 см. Уплотнение производилось с помощью ручной трамбовки и виброплиты. Для контроля качества уплотнения в каждом технологическом слое отбирались пробы методом режущего кольца, для определения коэффициента уплотнения, который должен был больше или равен 0,98. После достижения требуемого коэффициента

уплотнения приступали к устройству следующего технологического слоя земляного полотна. После завершения отсыпки модели земляного полотна производил штамповые испытания для определения модуля деформации грунта.

Поверх земляного полотна устраивали однослойную конструкцию дорожной одежды из смеси грунта с щебнем, размер фракции щебня в одном случае составлял 20-40 мм и 40-70 мм в другом. В пределах лотка устраивались три секции с соотношением грунта и щебня по объёму 40:60, 50:50 и 60:40.

При проведении штамповых испытания применяли жесткий круглый штамп диаметром 0,33 м, на который устанавливался гидравлический домкрат. Нагрузку, создаваемую домкратом, фиксировали с помощью электронного динамометра. Измерения деформации производили с помощью длиннобазового прогибомера. Со стороны грузового плеча в зажимное устройство вставлялась измерительная пята прогибомера, которая опиралась на штамп, со стороны измерительного плеча в зажимное устройство устанавливался индикатор часового типа, после чего приводили его в соприкосновение с клиновой опорной прокладкой так, чтобы обеспечить максимальный рабочий ход индикатора. Величина предельной нагрузки ограничивалась из условия создания максимального давления равного 0,25 МПа для земляного полотна и 0,50 МПа для дорожной одежды. Снятие отсчетов деформации производили по достижению условной стабилизации осадки, но не раньше чем через 60 с при испытании слоев дорожной одежды и 120 с при испытании земляного полотна. Условие стабилизации осадки является снижение ее скорости до величины 0,02 мм/мм, для применяемого прогибомера с соотношением длин грузового и измерительного плеча 2:1 это условие составляло 0,01 мм/мин.

По результатам проведенных испытаний были получены зависимости в виде осадок от передаваемых давлений, которые в дальнейшем были использованы для вычисления модуля деформации грунта земляного полотна и дорожной одежды. Из анализа нормативных документов Российской Федерации следует, что модуль деформации можно вычислить по трем разным нормативным документам, которые представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Формулы для расчета осадок и модулей деформации грунтов, регламентируемые государственными и предварительными национальными стандартами России

Стандарт	Характеристика	Формулы для расчета
ГОСТ Р 71244-2024	Относительная садка грунта земляного полотна	$\lambda = \frac{S_z}{D}$;
	Модуль деформации грунта земляного полотна E_d	$E_d = \frac{p}{\lambda}$;
ГОСТ Р 59866-2022	Осадка грунта земляного полотна	$S_z = a_0 + a_1 \cdot p_0 + a_1 \cdot p_0^2$;
	Модуль деформации E_d	$E_d = \frac{0,75 \cdot D}{a_1 + a_2 \cdot p_{\max}}$;
	Модуль упругости E_d	$E_d = \frac{0,75 \cdot D \cdot p_{\max 1}}{S_{el}}$.
ГОСТ 20276.1-2020	Модуль деформации E_d	$E_d = (1 - \mu^2) \cdot K_{h/D} \cdot K_1 \cdot D \frac{\Delta p}{\Delta S_z}$;

где $K_{h/D}$ – коэффициент, зависящий от относительной величины заглубления штампа при испытании (при $h/D=0$, а так же при испытании в шурфах и забоях, $K_{h/D}=1$); K_1 – коэффициент, принимаемый для жесткого круглого штампа равным 0,79; Δp и ΔS_z – соответственно приращения давления и осадки; где λ – требуемая величина относительной деформации, значение которой принимается в диапазоне $\lambda=0,01 \dots 0,02$ для грунтов земляного полотна и $\lambda=0,04 \dots 0,08$ для дорожных одежд; a_0 , a_1 и a_2 – постоянные многочлена второй степени; p_{\max} – максимальная величина давления, переданного штампом на земляное полотно или дорожную одежду, при измерении, МПа; $p_{\max 1}$ – максимальная величина давления достигнутая на стадии нагрузки, МПа.

На рисунке 2 представлены графические пояснения различий при определении модуля деформации грунта земляного полотна по формулам таблицы 1.

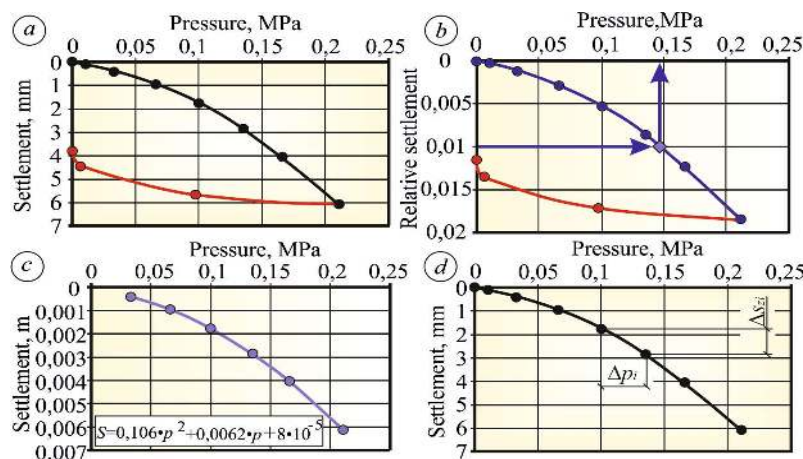


Рисунок 2 – Иллюстрации к вычислению модуля деформации: а–зависимость осадки от давления в точке испытания; б– зависимость относительной осадки от давления и определение давления соответствующего величине относительной осадки 0,01; с–аппроксимация зависимости осадки от давления многочленом второй степени; д–иллюстрация определения приращения осадки и давления от i -ой ступени нагрузки

На рисунке 2, а, демонстрируется зависимость осадки от давления в одной из точек испытания в виде петли гистерезиса. Согласно ГОСТ Р 71244-2024 модуль деформации определяется как среднее значение максимального модуля деформации и минимального, который определяется при величине относительной осадки $\lambda=0,01\dots 0,02$, схема представлена на рисунке 2,б. Из анализа данного способа можно сделать вывод, что в случае нелинейной зависимости относительной осадки от давления, увеличение относительной осадки λ от 0,01 до 0,02 приведет к уменьшению величины вычисляемого модуля деформации.

Методика расчета модуля деформации по ГОСТ Р 59866-2022 заключается в аппроксимации зависимости осадки от давления полиномом второй степени, как показано на рисунке 2, с. При этом точка начала координат и точка, связывающая наименьшую осадку с минимальным давлением, которая прикладывается для пригрузки земляного полотна, не учитываются. В результате аппроксимации вычисляют коэффициенты a_1 и a_2 , значения которых используют для вычисления модуля деформации.

По методике регламентированной ГОСТ 20276.1-2020 предварительно необходимо вычислить приращения давлений от ступеней нагрузки Δp_i и соответствующие им приращения осадок ΔS_{zi} , на линейном участке графика, рисунок 2, d. Для данной методики использование приращений давлений Δp_i и осадок ΔS_{zi} , соответствующих возрастанию осадок, приведет к уменьшению величины модуля деформации.

По полученным экспериментальным данным были рассчитаны частные значения модулей деформации по трем различным методикам и обработаны методами математической статистики. Результаты расчета представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты статистической обработки данных

Статистическая характеристика		Величина характеристики при применении методики расчета модуля деформации		
		ГОСТ 20276.1-2020	ГОСТ Р 71244-2024	ГОСТ Р 59866-2022
Частное значение модуля деформации по точкам испытаний E_{di} , МПа	1	9,9	16,5	12,1
	2	9,7	16,3	11,7
	3	7,4	14,2	9,2
	4	7,8	14,6	10,2
	5	7,1	13,2	8,7
Среднее значение E_d , МПа		8,4	15,0	10,4
Среднеквадратическое отклонение S , МПа		1,3	1,4	1,5
Наибольшее значение $ E_d - E_{di} $, МПа		1,5	1,8	1,7
Значение статистического критерия v при числе определений $n=5$ и двухсторонней доверительной вероятности $F=95\%$		1,92	1,92	1,92
Значение критерия $v \cdot S$		2,5	2,7	2,9
Выполнение критерия $ E_d - E_{di} > v \cdot S$		нет	нет	нет
Вывод о наличии грубых ошибок в выборке		ошибок нет	ошибок нет	ошибок нет
Коэффициент вариации V , %		15,7	9,4	14,4
Выполнение критерия $V < V_{lim}$, $V_{lim} = 30\%$		да	да	да
Вывод о применимости нормального закона распределения случайной величины		да	да	да
Коэффициент t_α при числе степеней свободы $K=4$ и двухсторонней доверительной вероятности $F=95\%$		2,78	2,78	2,78
Расчетное значение	минимальное	6,7	13,2	8,5
	максимальное	10,0	16,7	12,2

Анализ результатов экспериментальных данных и статистической обработки показал, что выборки частных значений модулей деформации, по трем разным методикам, имеют существенные различия. Применение критерия Kruskal–Wallis, для определения принадлежности трех выборок значений на принадлежность одной генеральной совокупности, показало, что сравниваемые выборки нельзя объединить в одну совокупность, следовательно, необходимо выбрать методику вычисления модуля деформации грунта.

Для дальнейшего расчета модуля деформации дорожной одежды и грунтов земляного полотна нами принят метод расчета согласно ГОСТ Р 59866-2022.

Предпочтение этому методу мы отдали вследствие того, что формула для расчета частного значения модуля деформации получена из нелинейной зависимости осадки от давления, это позволяет учесть упругопластические деформации в дорожной конструкции.

По рассчитанным значениям общего модуля деформации на поверхности грунтощебеночного слоя и верха земляного полотна, используя номограмму ГОСТ Р 71244-2024 был выполнен расчет модуля деформации слоя из грунтощебеночного материала. Результаты расчета представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты вычисления модуля деформации грунтощебеночного слоя

Фракция щебня, мм	Содержание щебня, %, по объему	Модуль деформации грунтощебеночного слоя, МПа
20–40	40	47,5
	50	70,0
	60	77,5
40–70	40	43,5
	50	80,0
	60	90,0

Результаты, представленные в таблице 7, справедливы для оптимальной влажности суглинка тяжелого, входящего в состав смеси. Для проектирования дорожных одежд со слоями из грунтощебня необходимы модули деформации, соответствующие расчетной влажности применяемого в составе грунта. Для этого был проведен цикл лабораторных испытаний, состоящий в определении модуля деформации образцов из грунтощебня методом одноосного сжатия, при различной влажности. В результате определялось отношение модулей деформации, полученные при различной влажности к модулю деформации при оптимальной влажности, обозначенное нами как k_w , которое является функцией относительной влажности. Значения коэффициентов k_w приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Значения коэффициентов k_w

Содержание щебня, %, по объему	Поправка k_w при относительной влажности грунта (W/W_L)					
	0,50	0,55	0,62	0,71	0,80	0,89
40	1,00	0,88	0,68	0,60	0,56	0,54
50	1,00	0,90	0,72	0,66	0,63	0,61
60	1,00	0,92	0,78	0,73	0,71	0,69

Для определения модуля деформации при любой относительной влажности предложен расчет:

$$E_{dw(cal)} = k_w \cdot E_{dw(opt)}, \quad (8)$$

где $E_{dw(opt)}$ - модуль деформации грунтощебеночного материала в конструктивном слое дорожной одежды при оптимальной влажности грунта, применяемого в составе смеси.

Для вычисления коэффициента k_w получена полиномиальная математическая модель третьей степени, которая имеет вид:

$$k_w = b_0 + b_1 \cdot \frac{w}{w_T} + b_2 \cdot \left(\frac{w}{w_T}\right)^2 + b_3 \cdot \left(\frac{w}{w_T}\right)^3, \quad (9)$$

где b_0, b_1, b_2 и b_3 – постоянные коэффициенты, зависящие от содержания щебня.

Значения коэффициентов, входящих в формулу (9) вычисляются в зависимости от содержания щебня по формулам таблицы 9.

Таблица 9 – Эмпирические зависимости для расчета параметров формулы (4)

Коэффициент формулы (1)	Формула для расчета
b_0	$b_0 = 1,7339 + 0,2351 \cdot X - 0,003 \cdot X^2$
b_1	$b_1 = 1,316 - 1,0354 \cdot X + 0,0126 \cdot X^2$
b_2	$b_2 = 1,4738 \cdot X - 0,017 \cdot X^2 - 8,693$
b_3	$b_3 = 6,1803 - 0,6795 \cdot X + 0,0075 \cdot X^2$
где X – содержание щебня в смеси, % по объему	

Разработанная математическая модель позволяет вычислять значения модуля деформации грунтощебеночного материала и использовать эти значения при расчете дорожных одежд для дорог с низкой интенсивностью движения.

В пятой главе проведено обоснование опытных конструкций дорожной одежды, результаты проведенных натуральных штамповых испытаний и исследования по определению колееобразования.

Для опытного строительства были запроектированы конструкции дорожной одежды в различных дорожно-климатических зонах Омской области представлены в таблице 10.

Таблица 10 - Результаты расчета толщин дорожной одежды для условий Омской области

ДКЗ	Материал конструктивного слоя	Толщина слоя, см, требуемая для обеспечения прочности по критерию:			Принятая толщина, см
		прочности	эксплуатационной надежности	по сопротивлению сдвигу	
II	Грунтощебень	24	26	28	28
III	Грунтощебень	15	17	19	19
IV	Грунтощебень	15	17	17	17

После устройства конструкций дорожных одежд на опытных участках были произведены штамповые испытания согласно выбранной методике по ГОСТ Р 59866-2022. Штамповые испытания проводились периодически в течение 6 месяцев с июня по октябрь. После обработки экспериментальных данных натурных испытаний были получены модули деформации конструкции дорожной одежды. После этого минимальные значения модуля деформации опытных конструкций, за октябрь месяц, были сравнены со значения требуемого модуля деформации, полученного по расчетам.

Для определения величины келейности проводились измерения с помощью трехметровой рейки установленной на специальные прокладки известной высоты. Измерения по длине рейки производили с шагом в 5 см. Измерения производились сразу после устройства конструкции дорожной одежды, а также в процессе эксплуатации автомобильной дороги в течение 6 месяцев.

Значения расчета модуля деформации и величины колеи, полученные по результатам измерений на опытных участках в октябре месяце представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Значения, полученные по результатам измерений на опытных участках

ДКЗ	Материал конструктивного слоя	Модуль деформации, МПа	Значение колеи, мм
II	Грунтощебень	27,4	12
III	Грунтощебень	29,0	13
IV	Грунтощебень	30,4	13

В результате проведенных измерений и обработки полученных результатов можно сделать выводы:

1. Минимальные значения модуля деформации (в октябре) на опытных участках превышают на 15-25% расчётный требуемый модуль деформации.

2. Глубина колеи по месяцам находится в допуске и составляет около 50% от глубины накапливаемых деформаций на первый год службы, согласно расчётам.

3. В связи с этими выводами методику расчета дорожных одежд по критериям прочности и эксплуатационной надежности, регламентируемую ГОСТ Р 71244-2024, и предложенную нами методику проверки грунта земляного полотна по сопротивлению сдвигу, можно рекомендовать для расчета опытных конструкций дорожных одежд на дорогах с низкой интенсивностью движения.

Заключение

По результатам проведенных исследований подтверждены положения выносимые на защиту, а именно:

- в докладе произведено совершенствование расчета грунтов земляного полотна, и грунтощебеночных материалов дорожных одежд с НИД по сопротивлению сдвигу;
- приведены параметры прочности грунтов Омской области и грунтощебеночного материала для расчета конструкции дорожных одежд на дорогах с низкой интенсивностью движения;
- приведена математическая модель для определения модуля деформации слоя дорожной одежды из грунтощебеночного материала, при различных относительных влажностях грунта и процентного содержания щебня различных фракций, входящих в состав смеси.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. Kalinin, A. Substantiation of the Method for Calculating Soil Deformation Modulus / A. Kalinin, A. Prolygin, N. Aleksandrova // *Technological Advancements in Construction*. Vol. 180. – Cham : Springer Verlag, 2022. – P. 71-81.
2. Александров, А. С. Сопротивление сдвигу грунтощебеночных материалов для конструктивных слоев дорожных одежд / А. С. Александров, Г. В. Долгих, А. С. Пролыгин // *Научный журнал строительства и архитектуры*. – 2023. – № 2(70). – С. 69-83.
3. Influence of the crushed stone content on the deformation modulus of the soil-crushed stone layer / A. S. Prolygin, A. S. Aleksandrov, G. V. Dolgih, V. V. Chusov // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. – 2022. – Vol. 18, No. 6. – P. 772-789.
4. Сравнительный анализ методов вычисления штамповых модулей деформации грунтов / А. С. Пролыгин, А. Л. Калинин, А. С. Александров, Н. П. Александрова // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. – 2022. – Т. 19, № 1(83). – С. 114-130.
5. Пролыгин, А. С. Анализ результатов трехосных испытаний связных грунтов Омской области / А. С. Пролыгин, Г. В. Долгих, А. С. Александров // *Вестник гражданских инженеров*. – 2021. – № 6(89). – С. 140-150.
6. Влияние влажности грунта на деформационные свойства грунтощебеночных образцов при сжатии / А. С. Пролыгин, Г. В. Долгих, А. Л. Калинин, Н. П. Александрова // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. – 2021. – Т. 18, № 5(81). – С. 614-632.
7. Влияние содержания щебня на модуль деформации грунтощебеночного слоя / А. С. Пролыгин, А. С. Александров, Г. В. Долгих, В. В. Чусов // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. – 2021. – Т. 18, № 6(82). – С. 772-789.