

*На правах рукописи*



Сухоруков Алексей Владимирович

**Обоснование региональных расчётных значений  
характеристик глинистых грунтов для проектирования  
дорожных одежд в условиях Западной Сибири**

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

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2017

Работа выполнена на кафедре «Автомобильные дороги» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный  
руководитель:

**Ефименко Сергей Владимирович,**  
доктор технических наук, доцент

Официальные  
оппоненты:

**Боброва Татьяна Викторовна,**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Экономика и проектное  
управление в транспортном строительстве»  
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный  
автомобильно-дорожный университет»

**Афиногенов Олег Петрович,**  
кандидат технических наук, доцент,  
директор ООО «Кузбасский центр дорожных  
исследований»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Тихоокеанский  
государственный университет»

Защита состоится «28» июня 2017 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета ДМ 218.012.01 на базе федеральных государственных бюджетных образовательных учреждений высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» и «Томский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191, ауд. 224.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского государственного университета путей сообщения ([www.stu.ru](http://www.stu.ru)).

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

Автореферат разослан «11» мая 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
канд. техн. наук, доцент



Соловьев Леонид Юрьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Характеризуя существующее состояние транспортной инфраструктуры в Западно-Сибирском регионе, можно отметить, что до недавнего времени дорожному строительству здесь уделялось внимание лишь в Южном широтном поясе – по линии расположения городов Омск – Новосибирск – Красноярск, наиболее населённых в Сибири. Это привело к крайне неравномерному распределению сети автомобильных дорог по площади региона, а недоучёт региональных особенностей признаков географического комплекса при формировании действующих норм проектирования нежестких дорожных одежд обусловил их недостаточную эксплуатационную надёжность и, соответственно, чрезмерные затраты на восстановление требуемых транспортно-эксплуатационных показателей.

Отдавая должное ранее выполненным научным исследованиям, следует отметить, что их результаты, нашедшие отражение в отраслевых дорожных нормах, в основном были получены на сети дорог европейской части России без достаточной проверки в природных условиях Зауралья. При этом европейская и азиатская части страны имеют значительные отличия по своим природно-климатическим и инженерно-геологическим условиям, являющимися компонентами географического комплекса.

Научные исследования специалистов Института экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения Российской академии наук свидетельствуют, что уже в первой четверти XXI в. возникнет необходимость интенсивного формирования Северного широтного пояса по линии расположения населённых пунктов Ханты-Мансийск – Стрежевой – Белый Яр, обеспечивающего реальное расширение и укрепление экономически активного пространства азиатской части Российской Федерации, опираясь не только на сырьевые ресурсы (в Западной Сибири добывают  $\frac{3}{4}$  всех производимых в России энергоресурсов), но и на перспективу развития инфраструктуры, включающей обслуживание международных транспортных коридоров.

Отмеченное позволяет считать, что изучение связей и закономерностей, обуславливающих системную взаимосвязь между компонентами природно-технической системы «автомобильная дорога – природная среда» во вновь осваиваемых, экономически перспективных районах Западной Сибири, достаточно актуально с позиции решения отраслевой проблемы в части обеспечения надёжного функционирования автомобильных дорог в течение расчётного срока службы нежестких дорожных одежд.

Отдельные элементы диссертационной работы выполнены по плану НИР Федерального дорожного агентства Минтранса РФ «Росавтодор» (государственный контракт № УД 47/295 от 24.09.2012 г.), по гранту РФФИ (проект № 14–07–00673а) и тематическим планам федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет» (ФГБОУ ВО ТГАСУ), что также подтверждает актуальность темы исследования.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследования В.Ф. Бабкова, А.К. Бирули, Ю.М. Васильева, В.Н. Гайворонского, М.Н. Гудзинского, В.А. Давыдова, И.А. Золотаря, В.Д. Казарновского, А.М. Каменева, А.Д. Каюмова, М.Б. Корсунского, В.П. Корякова, А.Ф. Котвицкого, И.А. Носича, П.Д. Россовского, А.А. Малышева, Ю.Л. Мотылёва, Р.З. Порицкого, Л.А. Преферансовой, Н.А. Пузакова, В.М. Сиденко, А.Я. Тулаева, Н.Я. Хархуты, Е.И. Шелопаева и др. посвящённые изучению влияния природно-климатических условий на формирование свойств грунтов земляного полотна автомобильных дорог послужили основой для уточнения всесоюзных ведомственных инструкций по проектированию дорожных одежд нежесткого типа на территориях Белоруссии, России, Украины, Казахстана, Узбекистана и других Советских Республик. В Российской Федерации базовая часть наблюдений за водно-тепловым режимом (ВТР) грунтов земляного полотна в районах избыточного увлажнения выполнена на участках дорог Нежинской, Ржевской и Ленинградской постоянных станций. Затем результаты исследований на отмеченных станциях были распространены на другие территории страны.

За рубежом подобные работы проводятся в Соединённых Штатах Америки, Японии, Корее и ряде других стран. Среди них отметим исследования, выполняемые в Аризонском государственном университете (Arizona State University) группой учёных под руководством W.N. Houston и С.Е. Zapata, которые направлены на разработку математической модели для количественной оценки воздействия окружающей среды на состояние дорожных конструкций в течение их срока службы на основе результатов экспериментальных исследований на полигонах AASHTO, MnRoad, NCAT, WesTrack.

Вклад в развитие норм проектирования дорожных одежд, сменивших всесоюзные инструкции, за счёт учёта региональных природно-климатических и инженерно-геологических условий, а также изучения особенностей ВТР грунтов земляного полотна внесли С.В. Алексиков, И.С. Алексиков (Нижнее Поволжье), С.А. Гнездилова, В.П. Носов, (Белгородская область), Т.А. Гурьева, А.М. Кулижников, В.А. Лукина (Европей-

ский север России), В.В. Ушаков (Дальний Восток), В.Н. Ефименко, С.В. Ефименко, М.В. Бадина, А.О. Афиногенов (Западная Сибирь) и др.

**Цель исследования** – обоснование региональных расчётных значений характеристик глинистых грунтов для проектирования дорожных одежд в районах формирования Северного широтного пояса экономического развития, с учётом особенностей природно-климатических и инженерно-геологических условий избыточно увлажнённых территорий Западной Сибири.

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

1. Оптимизировать методику определения величины среднемесячного испарения с поверхности дорожного полотна и уточнить методику определения продолжительности периодов осеннего влагонакопления и промерзания дорожных конструкций, в развитие ранее предложенного проф. И.А. Золотарём метода прогнозирования расчётной влажности глинистых грунтов рабочего слоя земляного полотна.

2. Провести комплекс экспериментальных исследований, включая мониторинг сезонного изменения влажности грунтов рабочего слоя земляного полотна, на сети эксплуатируемых автомобильных дорог, направленных на установление фактических значений физико-механических свойств глинистых грунтов и их состава.

3. Установить эмпирические зависимости изменения значений прочностных и деформационных характеристик наиболее распространённых в избыточно увлажнённых районах Западной Сибири разновидностей глинистых грунтов земляного полотна от их относительной влажности. Определить зависимость коэффициента влагопроводности глинистых грунтов от их влажности и плотности.

4. Уточнить расчётные значения влажности, модуля упругости, угла внутреннего трения и удельного сцепления глинистых грунтов земляного полотна, применяемые при проектировании дорожных одежд для перспективных в экономическом развитии районов Западно-Сибирского региона.

**Объект исследования** – глинистые грунты рабочего слоя земляного полотна автомобильных дорог, расположенных в районах Западной Сибири, характеризующихся избыточным увлажнением грунтов.

**Предмет исследования** – массообменные свойства (коэффициент влагопроводности) и физико-механические свойства (влажность, прочность, деформируемость) глинистых грунтов рабочего слоя земляного полотна автомобильных дорог, ранее разработанный проф. И.А. Золотарём метод прогнозирования влажности глинистых грунтов земляного полотна и способы обос-

нования расчётных значений их характеристик прочности и деформируемости для проектирования нежестких дорожных одежд.

**Научная новизна** заключается в следующем:

1. Оптимизирована методика определения величины среднемесячного испарения с поверхности дорожного полотна за счёт сокращения числа операций, связанных с вводом дополнительных параметров путём прямого численного интегрирования трансцендентного уравнения. Уточнена методика определения продолжительности периодов осеннего влагонакопления и промерзания дорожных конструкций, за счёт применения теплотехнических расчётов при определении сроков их окончания и начала соответственно.

2. Установлена совокупность эмпирических регрессионных зависимостей, предназначенных для определения значений прочностных и деформационных характеристик пылеватых супесей и пылеватых суглинков. Отличия от ранее приведённых в работах В.Н. Ефименко и С.В. Ефименко, обусловлены увеличением объёма выборок за счёт результатов полевых и лабораторных исследований выполненных лично автором. Это позволило повысить достоверность аппроксимации экспериментальных данных, выражаемую квадратом множественного коэффициента корреляции. Выявлено уравнение регрессии, позволяющее определять коэффициент влагопроводности пылеватых суглинков в зависимости от их влажности и плотности.

3. Предложены расчётные значения влажности, модуля упругости, угла внутреннего трения и удельного сцепления глинистых грунтов земляного полотна, которые нормированы по дорожным районам перспективных в экономическом развитии территорий Западно-Сибирского региона.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Представленные в диссертации теоретические положения по развитию модели прогнозирования влажности глинистых грунтов земляного полотна на участках автомобильных дорог с близким залеганием уровня грунтовых вод, вносят вклад в развитие научных представлений в области расчёта и регулирования водно-теплового режима дорожных конструкций.

Сведения, полученные в ходе исследований, применяются в курсовом и дипломном проектировании при подготовке бакалавров, специалистов и магистров в ФГБОУ ВО ТГАСУ.

С применением результатов исследований разработаны СТО 11.2015 «Расчётные значения характеристик глинистых грунтов земляного полотна для проектирования по условиям прочности и морозоустойчивости нежестких дорожных одежд автомобильных дорог Кузбасса» (утверждён приказом № 74 от 22.07.2015 г. Дирекции автодорог Кузбасса – Кемерово, 2015) и СТО

УАД ТО 10-2015 «Расчётные значения характеристик глинистых грунтов земляного полотна для проектирования по условиям прочности и морозоустойчивости нежестких дорожных одежд автомобильных дорог Томской области» (утверждён приказом № 150-П от 21.12.2015 г. ГКУ ТО Управление автомобильных дорог Томской области – Томск, 2015).

Результаты исследований нашли применение при проектировании вновь строящихся и реконструируемых автомобильных дорог: «Могильный Мыс – Парабель – Каргасок» на участке км 30 – км 45; «Камаевка – Асино – Первомайское» на участке км 9 – км 12, а также при строительстве подходов к мостам через реки Ташма на автомобильной дороге «Томск – Мариинск» и Сильга на участке автомобильной дороги «Каргасок – Средний Васюган».

В Томском проектно-изыскательском институте транспортного строительства с привлечением, представленных в диссертации результатов исследования разработаны проекты на капитальный ремонт ул. Советской (от пр. Кирова до ул. Нахимова) и пр. Ленина (от ул. Нахимова до пл. Ленина) в г. Томске, а также проект обоснования инвестиций на строительство автомобильной дороги «Томск – Тайга» в Томской и Кемеровской областях.

**Методология и методы исследования.** В основу методологии исследования положена совокупность теоритических и эмпирических методов научного исследования, способствующая достижению поставленной цели и решению сформулированных задач.

Теоретические методы исследования включают анализ, синтез, сравнение и моделирование знаний в области изучения водно-теплого режима дорожных конструкций автомобильных дорог и математических моделей, описывающих изменение свойств изучаемых объектов.

Среди эмпирических методов, применявшихся при выполнении полевых работ на сети автомобильных дорог Западно-Сибирского региона и лабораторных исследований, следует отметить «методы отслеживания объекта», к которым относятся обследование и мониторинг, а также «преобразующие» – эксперимент и «изучения состояния объекта исследования во времени» – прогнозирование.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Оптимизированная методика определения величины среднемесячного испарения с поверхности дорожного полотна и уточнённая методика определения продолжительности периодов осеннего влагонакопления и промерзания дорожных конструкций.

2. Эмпирические регрессионные зависимости, характеризующие изменение значений прочностных и деформационных характеристик пылеватых

суглинков и пылеватых супесей земляного полотна от их относительной влажности. Зависимость изменения коэффициента влагопроводности пылеватых супесей от влажности и плотности.

3. Расчётные значения влажности, прочности и деформируемости глинистых грунтов земляного полотна, применяемые при проектировании нежестких дорожных одежд автомобильных дорог по условию прочности, для дорожных районов, выделенных на территории Западной Сибири.

**Степень достоверности и апробация работы.** Достоверность основных результатов теоретических и экспериментальных исследований, представленных в работе, обеспечена необходимым объёмом натурных измерений, выполненных с применением аттестованных приборов и оборудования, а также обработкой результатов наблюдений методами математической статистики.

Достоверность результатов прогнозирования влажности грунтов рабочего слоя земляного полотна, установленных с применением развитого метода, ранее разработанного проф. И.А. Золотарём, подтверждена их сопоставление с результатами сезонного мониторинга влажности грунтов на опытном участке автомобильной дороги.

Материалы диссертации доложены и обсуждены на семинарах, конференциях и симпозиумах: Международной научно-практической конференции, посвящённой 80-летию Сибирского государственного университета путей сообщения (г. Новосибирск, 2013); 59-й и 61-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых учёных (г. Томск, 2013 и 2015); XI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) «Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика» (г. Пермь, 2013); XI, XII и XIII Международной конференции студентов и молодых учёных «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2014–2016); Международной научно-практической конференции «Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики» (г. Омск, 2014); I и III Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Молодёжь, наука, технологии: новые идеи и перспективы» (г. Томск, 2014, 2016); Всероссийской конференции с международным участием, посвящённой 85-летию со дня рождения профессора Г.М. Рогова (г. Томск, 2015); VIII и IX Международной научно-технической конференции в рамках года науки Россия – ЕС «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке» (г. Новосибирск, 2015–2016); II Всероссийской научной конференции молодых учёных с международным участием «Перспективные материалы в технике и строи-



тельстве (ПМТС-2015) (г. Томск, 2015); Втором Международном симпозиуме по проблемам земляного полотна в холодных регионах (TranSoilCold-2015) (г. Новосибирск, 2015); научных межкафедральных семинарах на базе Томского государственного архитектурно-строительного университета (г. Томск, 2013–2017).

**Личный вклад автора состоит:**

1. В развитии метода прогнозирования влажности глинистых грунтах земляного полотна автомобильных дорог, ранее предложенного проф. И.А. Золотарём.

2. В выполнении комплекса полевых работ на территории исследования и лабораторных испытаний, направленных на установление фактических значений характеристик прочности и деформируемости, состава и свойств глинистых грунтов.

3. В установлении эмпирических регрессионных зависимостей модуля упругости, угла внутреннего трения, удельного сцепления пылеватых суглинков и пылеватых супесей от их относительной влажности, а также определении влияния влажности и плотности пылеватого суглинка на его коэффициент влагопроводности.

4. В обосновании расчётных значений влажности, характеристик прочности и деформируемости глинистых грунтов рабочего слоя земляного полотна для районов избыточного увлажнения Западной Сибири.

**Публикации и изобретения.** По результатам исследования опубликовано 12 научных работ, в том числе 6 публикаций в ведущих научных рецензируемых изданиях, включённых в Перечень ВАК при Минобрнауки РФ. 3 программы для ЭВМ и 1 база данных зарегистрированы в федеральной службе по интеллектуальной собственности.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и 5 приложений. Объём работы 166 стр., в том числе 24 таблицы и 35 рисунков. Список литературы включает 236 наименований российских и зарубежных источников.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, степень её разработанности, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, приведены объект и предмет исследования, научная новизна, показаны теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов работы, указан личный вклад автора.

**В первой главе** обобщены этапы развития норм проектирования нежестких дорожных одежд в части дифференциации расчётных значений характеристик грунтов, показаны особенности формирования состава и свойств глинистых грунтов на территории Западной Сибири. Выполнен анализ методов прогнозирования влажности грунтов земляного полотна и определения их коэффициента влагопроводности, рассмотрены подходы к обоснованию прочностных и деформационных характеристик грунтов рабочего слоя земляного полотна автомобильных дорог.

Исследования, на основе которых развивались нормы проектирования дорожных одежд, в основном проведены в европейской части страны. При этом значения относительной влажности грунтов земляного полотна, в зависимости от которой назначают их механические свойства (прочностные и деформационные характеристики), разработчики норм дифференцировали по дорожно-климатическим зонам (ДКЗ) и подзонам. Такой подход является достаточно укрупнённым, поскольку каждая ДКЗ, особенно вторая, имея значительную протяжённость с Запада на Восток, объединяет административно-территориальные образования европейской и азиатской частей России, имеющих существенные различия по комплексу природно-климатических и инженерно-геологических условий.

Различия состава и свойств глинистых грунтов европейской и азиатской частей России обусловлены их генезисом, возрастом пород и условиями залегания. В то же время однообразие минерального состава отложений, развитых в пределах Западной Сибири, определяет их близкий гранулометрический состав и достаточно сходные физико-механические свойства. Это свидетельствует о том, что закономерности изменения механических свойств глинистых грунтов от их относительной влажности, установленные по результатам экспериментальных исследований на территории нескольких административных образований Западно-Сибирского региона, затем могут быть распространены на прилегающие территории.

Для прогноза влагонакопления в грунтах рабочего слоя земляного полотна автомобильных дорог в районах Западной Сибири, характеризующихся глубоким сезонным промерзанием избыточно увлажнённых грунтов, принят метод проф. И.А. Золотаря. При этом считаем, что методики определения величины среднемесячного испарения с поверхности дорожного полотна и назначение продолжительности периодов осеннего влагонакопления и промерзания дорожных конструкций требуют развития. Также для прогноза влагонакопления необходимы дополнительные сведения о численных значениях коэффициента влагопроводности грунтов земляного полотна ( $K_{вл}$ ).

Учитывая, что значения прочностных и деформационных характеристик глинистых грунтов земляного полотна, приведённые в ОДН 218.046–01, характерны для условий европейской части Российской Федерации, их уточнение для проектирования дорожных одежд в условиях, например, Западной Сибири следует выполнять с учётом регионального научно-практического опыта.

Исходя из вышеизложенного сформулированы цель и задачи исследования, для решения которых на базе системного подхода определена структура исследования (рисунок 1).

**Во второй главе** рассмотрены теоретические положения о прогнозировании влагонакопления в глинистых грунтах земляного полотна на участках дорог с близким залеганием уровня грунтовых вод (УГВ) (2-й и 3-й типы местности по характеру и степени увлажнения) и глубоким залеганием УГВ (1-й тип местности).

Для прогнозирования расчётной влажности грунтов рабочего слоя земляного полотна ( $W_{\text{рас}}$ ) на участках дорог с близким залеганием УГВ принят метод, разработанный проф. И.А. Золотарём. При этом в методе оптимизирована методика определения величины среднемесячного испарения с поверхности дорожного полотна за счёт исключения дополнительных операций, связанных с вводом дополнительной гипотезы для решения уравнения трансцендентного вида.

Также в методе уточнена схема установления срока окончания периода осеннего влагонакопления путём определения температуры воздуха, соответствующей началу промерзания глинистого грунта в пограничной зоне земляное полотно – дорожная одежда по формуле, полученной преобразованием уравнения для теплотехнических расчётов дорожных конструкций, ранее установленной проф. В.М. Сиденко, и зависимости В.И. Фёдорова для определения температуры льдообразования в глинистых грунтах.

Предложенные решения реализованы в виде программ для ЭВМ (свидетельства № 2014612694, № 2014615458, № 2014617069).

В качестве базового метода для прогнозирования  $W_{\text{рас}}$  на участках дорог, расположенных в условиях с глубоким залеганием УГВ, принят метод, разработанный проф. В.Н. Ефименко. Его применение позволяет учитывать температурно-влажностный режим отдельных дорожных районов, выделенных на территории исследования, а точность подтверждена результатами полевых и лабораторных исследований, выполненных на территории Западной Сибири.

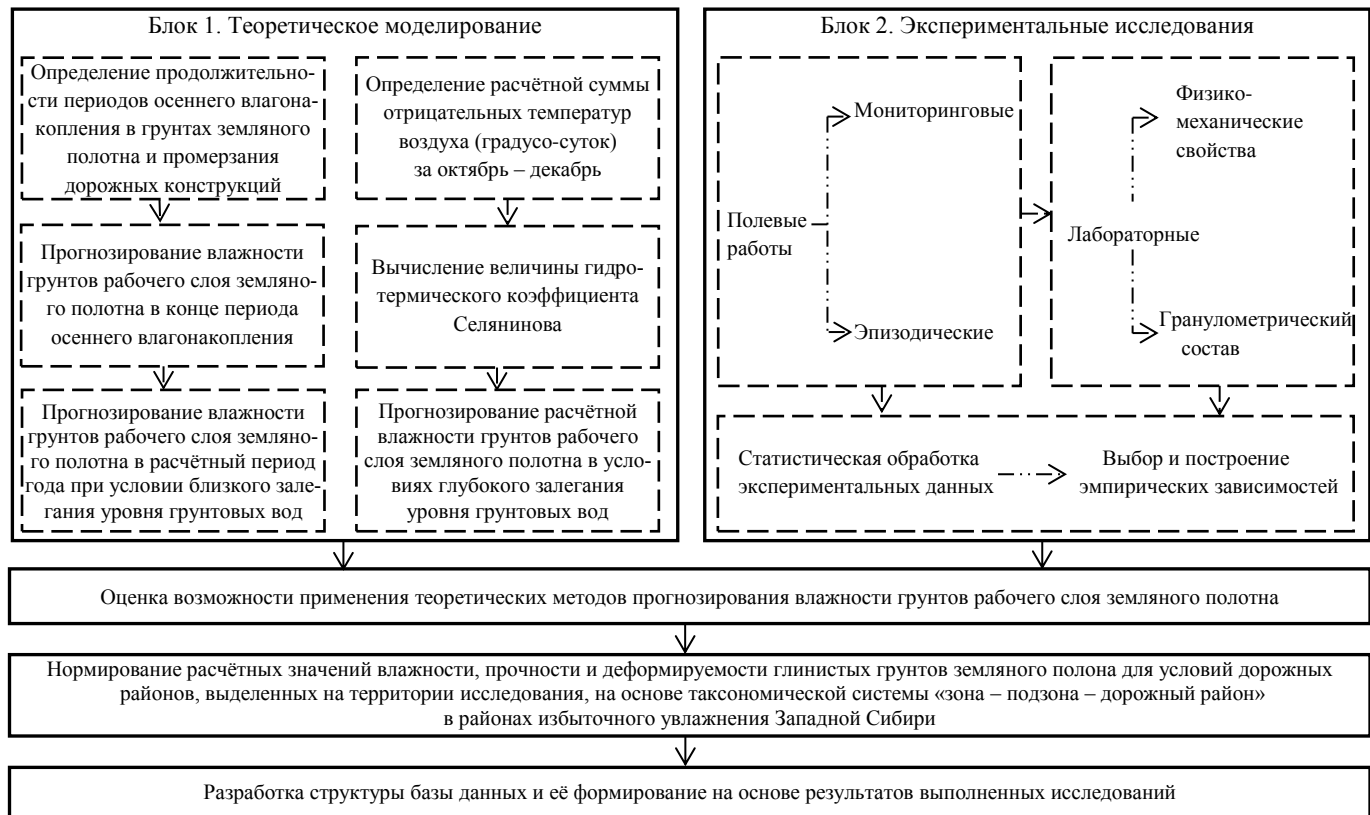


Рисунок 1 – Структурная схема исследования

В третьей главе рассмотрены вопросы организации и проведения экспериментальных исследований состава и свойств глинистых грунтов, включая мониторинг сезонного изменения влажности грунтов рабочего слоя земляного полотна, на сети эксплуатируемых автомобильных дорог Западной Сибири (в пределах II ДКЗ).

Состав экспериментальных исследований включал комплекс полевых и лабораторных работ (рисунок 2).



Рисунок 2 – Состав комплекса экспериментальных исследований

При выборе участков автомобильных дорог исходили из следующих условий: наличие архивных документов, характеризующих проектные решения; наличие действующей гидрометеостанции вблизи участка дороги, предназначенного для организации эпизодических и мониторинговых постов; соответствие участка дороги нормам проектирования, в которых отражены основные требования к конструктивно-технологическим решениям в условиях II ДКЗ; посты для наблюдений должны располагаться на характерных для района исследования участках дорог, с характерными признаками геокомплекса; дорожная одежда и земляное полотно на постах наблюдения должны быть представлены конструкциями и материалами, которые имеют наибольшее распространение в районе исследования.

С учётом вышеизложенных требований на участке автомобильной дороги

«Каргала – Бакчар» (км 128+000 – км 137+000) в течение трёх годовых циклов водно-теплового режима, в период с 2011 по 2014 гг., был выполнен мониторинг сезонных изменений влажности грунтов рабочего слоя земляного полотна, позволивший накопить статистический материал для сопоставления экспериментальных и прогнозируемых значений. В этот же период на сети автомобильных дорог, расположенных в пределах границ II ДКЗ, в том числе в районах Северного широтного пояса экономического развития, организован и выполнен комплекс эпизодических полевых работ, направленных на установление фактических значений физико-механических свойств глинистых грунтов и их состава.

**В четвёртой главе** дана оценка метеорологических элементов климата в период мониторинга сезонного изменения влажности грунтов рабочего слоя земляного полотна, отражён анализ результатов экспериментальных исследований состава и свойств глинистых грунтов, обоснована возможность прогнозирования влажности грунтов рабочего слоя земляного полотна.

Метеорологические факторы, оказывающие влияние на увлажнение грунтов рабочего слоя земляного полотна, представлены двумя группами факторов – прямые (атмосферные осадки) и косвенные (средние месячные значения балла общей облачности, температуры и влажности воздуха).

Для сопоставления результатов инструментальных наблюдений, выполненных на метеостанции Бакчар, с многолетними среднемесячными значениями метеорологических факторов были вычислены их средние абсолютные отклонения ( $\Delta$ ). Считали, что величина  $\Delta$ , находящаяся в пределах величины среднеквадратичного отклонения элемента ( $\sigma$ ), является нормальной, т. е. в период наблюдений не происходило аномалий.

Оценив годовой ход абсолютных отклонений метеорологических факторов (рисунки 3–4) выявлено, что в группе прямых 94 %, а в группе косвенных 98 % рядов наблюдений находятся в пределах от  $-2\sigma$  до  $+2\sigma$ , что указывает на слабую аномалию периода наблюдений. Поэтому при прогнозировании влагонакопления с применением ранее рассмотренных методов можно оперировать многолетними среднемесячными значениями метеорологических элементов.

Преобладающей разновидностью грунтов земляного полотна обследованных автомобильных дорог являются пылеватые суглинки, доля которых составляет 71 % от общего количества отобранных проб. Пылеватые супеси распространены меньше – 29 %.

Определены фактические интервалы варьирования значений физических свойств грунтов, отобранных в ходе полевых работ (таблица 1).

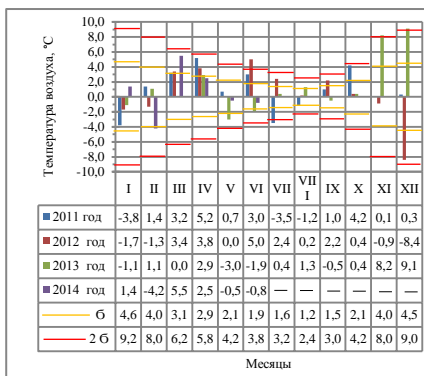
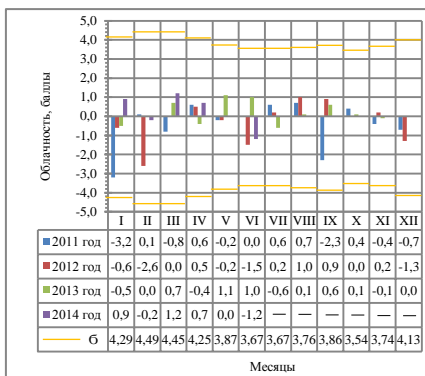


Рисунок 3 – Годовой ход абсолютных отклонений среднего месячного балла общей облачности от многолетней климатической нормы

Рисунок 4 – Годовой ход абсолютных отклонений средней месячной температуры воздуха от многолетней климатической нормы

Таблица 1 – Интервалы варьирования фактических значений физических свойств, испытанных в лабораторных условиях глинистых грунтов

Разновидность грунта	Плотность, г/см <sup>3</sup>			Пористость $n$ , %	Коэффициент пористости, $e$	Полная влагоемкость $W_{\text{пв}}$ , %	Пластичность, д. ед.			Показатель текучести, $I_L$
	частиц грунта, $\rho_s$	влажного грунта, $\rho$	сухого грунта, $\rho_d$				Влажность грунта на границе текучести, $W_L$	Влажность грунта на границе раскатывания, $W_P$	Число пластичности, $I_P$	
Пылеватые суглинки	2,58–2,72	1,71–2,20	1,31–1,98	40,1–87,0	0,416–1,053	15,46–39,20	0,26–0,47	0,17–0,34	0,07–0,17	$I_L < 0$ $0 \leq I_L \leq 0,20$
Пылеватые супеси	2,62–2,71	1,75–2,26	1,56–1,98	37,0–73,7	0,443–0,737	16,77–27,20	0,18–0,27	0,14–0,21	0,02–0,06	$I_L < 0$

Установленные в полевых (модули упругости суглинков пылеватых  $E_{\text{сг}}$  и супесей пылеватых  $E_{\text{сп}}$ ) и лабораторных (угол внутреннего трения суглинков  $\varphi_{\text{сг}}$  и супесей  $\varphi_{\text{сп}}$ , удельное сцепление суглинков  $C_{\text{сг}}$  и супесей  $C_{\text{сп}}$ ) условиях значения механических свойств глинистых грунтов техногенной структуры имеют интервалы варьирования, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Интервалы варьирования фактических значений механических свойств глинистых грунтов, испытанных в полевых и лабораторных условиях

Разновидность грунта	Прочностные и деформационные характеристики грунтов		
	Модуль упругости $E$ , МПа	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град	Удельное сцепление $C$ , МПа
Пылеватые суглинки	15–70	8°12'–41°00'	0,046–0,154
Пылеватые супеси	24–170	16°36'–34°10'	0,035–0,193

Для вычисления нормативных значений характеристик грунтов все результаты испытаний подвергали статистической обработке по ГОСТ 20522.

По результатам предварительного статистического анализа около 5 % экспериментально полученных значений были выбракованы. Построенные по оставшимся значениям характеристик грунтов графики, например для модуля упругости пылеватых суглинков и пылеватых супесей, имеют следующий вид (рисунки 5, 6).

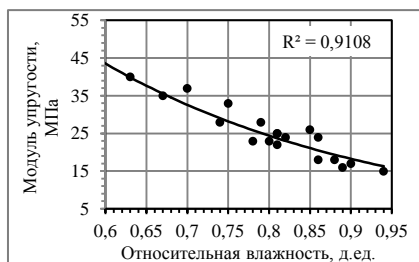


Рисунок 5 – График зависимости модуля упругости суглинков пылеватых от относительной влажности

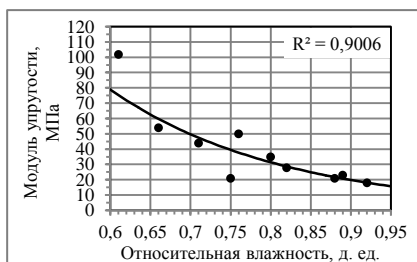


Рисунок 6 – График зависимости модуля упругости супесей пылеватых от относительной влажности

Эмпирические регрессионные зависимости модуля упругости глинистых грунтов от относительной влажности имеют следующий вид:

– для пылеватых суглинков

$$E_{сг} = 246,53 \cdot e^{-2,892 \cdot W_{от}}, \quad (1)$$

– для пылеватых супесей

$$E_{сп} = 1247 \cdot e^{-4,603 \cdot W_{от}}. \quad (2)$$

Эмпирические регрессионные зависимости изменения угла внутреннего трения глинистых грунтов от относительной влажности имеют следующий вид:

– для пылеватых суглинков

$$\varphi_{сг} = 85,214 \cdot e^{-2,187 \cdot W_{от}}, \quad (3)$$

– для пылеватых супесей

$$\varphi_{сп} = 55,703 \cdot e^{-1,121 \cdot W_{от}}. \quad (4)$$



Эмпирические регрессионные зависимости изменения удельного сцепления глинистых грунтов от относительной влажности имеют следующий вид:

– для пылеватых суглинков

$$C_{ст} = 0,6 \cdot e^{-3,762 \cdot W_{от}}, \quad (5)$$

– для пылеватых супесей

$$C_{сп} = 0,4235 \cdot e^{-3,57 \cdot W_{от}}. \quad (6)$$

Отклонения, установленных по этим зависимостям значений характеристик грунтов от величин, представленных в ОДН 218.046-01 в среднем достигают 40 %.

Высокие значения квадрата множественного коэффициента корреляции  $R^2$  свидетельствуют о возможности применения регрессионных зависимостей (1) – (6) при нормировании значений прочностных и деформационных характеристик грунтов для районов формирования Северного широтного пояса.

Исследования влияния влажности и плотности на  $K_{вл}$  выполнены на примере суглинка пылеватого. Для достижения максимальной точности измерений при наименьшем количестве проведённых опытов и сохранении статистической достоверности сведений была выбрана модель полного факторного эксперимента ротatableльного планирования второго порядка (таблица 3).

Таблица 3 – Экспериментальные факторы и интервалы их варьирования

Факторы	Единица измерения	Код фактора	Интервал варьирования	Уровни и плечи звёздных точек				
				-1,414	-1	0	+1	+1,414
Влажность грунта	%	$x_1$	2	12,2	13	15	17	17,8
Плотность скелета грунта	г/см <sup>3</sup>	$x_2$	0,1	1,51	1,55	1,65	1,75	1,79

Оценка адекватности модели показала, что при 5% уровне значимости значение критерия Фишера, принятое по таблице, превышает его расчётное значение ( $F = 2,60 < F_{0,05}^T = 2,68$ ). Следовательно, полученная модель с достаточной точностью описывает зависимость рассматриваемых характеристик и имеет следующий вид

$$K_{вл} = 14,68 - 2,23 \frac{W-15}{2} - 13,07 \frac{\rho_s-1,65}{0,1} + 0,46 \frac{W-15}{2} \cdot \frac{\rho_s-1,65}{0,1} - 0,185 \left( \frac{W-15}{2} \right)^2 \cdot \left( \frac{\rho_s-1,65}{0,1} \right)^2. \quad (7)$$

Анализ уравнения регрессии (7) и построенной по нему поверхности отклика (рисунок 7) показал, что наибольшее влияние на коэффициент влагопроводности оказывает плотность грунта.

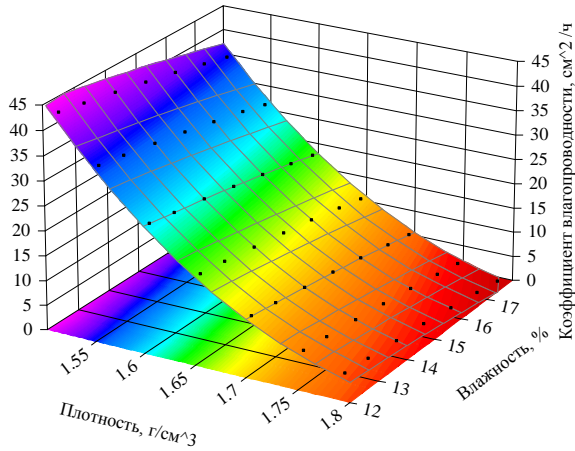


Рисунок 7 – График поверхности отклика функции

Относительное отклонение прогнозируемой влажности от измеренной на систематических постах наблюдения на величину более 10 % составляет всего 4,2 %, до 10% – 95,8 %, до 5% – 37,5 % от общего числа расчётных случаев, что указывает на возможность применения развитого метода проф. И.А. Золотаря для прогнозирования  $W_{рас}$ .

**В пятой главе** приведены рекомендуемые расчётные значения характеристик глинистых грунтов рабочего слоя земляного полотна, предложения по формированию информационной базы данных, показаны основы разработки региональных типовых конструкций нежестких дорожных одежд и обоснована экономическая эффективность рекомендаций.

Для удобства практического применения рекомендуемые расчётные значения характеристик глинистых грунтов представлены табличными формами двух видов (таблицы 4, 5).

Таблица 4 – Расчётные значения характеристик влажности, прочности и деформируемости глинистых грунтов рабочего слоя земляного полотна для проектирования дорожных одежд на территории Тюменской области (при условии глубокого залегания УГВ)

Индекс дорожного района	Наименования административных пунктов на территории дорожного района	Расчётные значения характеристик пылеватых супесей и пылеватых суглинков			
		Расчётная относительная влажность $W_{рас}$ , д. ед.	Модуль упругости $E_{гр}$ , МПа	Угол внутреннего трения $\varphi_{гр}$ , град.	Удельное сцепление $C_{гр}$ , МПа
П.Р.2	Тобольск	0,77	22	16	0,019
П.Р.5	Уват, Демьянское	0,84	21	12	0,048

Таблица 5 – Фрагмент таблицы с расчётными значениями характеристик глинистых грунтов рабочего слоя земляного полотна для дорожного района с индексом П.Р.1 на территории Томской области (для условий близкого залегания УГВ)

Индекс дорожного района	Наименования административных пунктов на территории дорожного района	Величина коэффициента влагопроводности	Возвышение поверхности земляного полотна над уровнем грунтовых вод	Расчётные значения характеристик влажности, прочности и деформируемости глинистых разновидностей грунтов рабочего слоя земляного полотна									
				Суглинок пылеватый			Супесь пылеватая						
				Расчётная относительная влажность $W_{рас}$ , д. ед.	Модуль упругости $E_{сг}$ , МПа	Угол внутреннего трения $\varphi_{сг}$ , град	Удельное сцепление $C_{сг}$ , МПа	Расчётная относительная влажность $W_{рас}$ , д. ед.	Модуль упругости $E_{сп}$ , МПа	Угол внутреннего трения $\varphi_{сп}$ , град	Удельное сцепление $C_{сп}$ , МПа		
П.Р.1	Александровское, Каргасок, Напас, Нарым, Дружный	2,0	0,5	0,5	0,89	13	10,5	0,017	0,96	24	21		
			1,0	1,0	0,83	18	12	0,022	0,90	30	22		
			1,5	1,5	0,76	26	15	0,030	0,82	40	23		
			2,0	2,0	0,73	31	16	0,034	0,77	49	24		
			2,5	2,5	0,72	33	16	0,036	0,75	52	25		
		3,0	0,5	0,5	0,94	10	9	0,013	-	-	-	-	
			1,0	1,0	0,97	8	8,50	0,012	0,94	26	21,5	23	
			1,5	1,5	0,80	21	13	0,025	0,85	36	23	24	
			2,0	2,0	0,76	26	14	0,030	0,80	44	24	25	
		4,0	2,5	2,5	0,75	28	15	0,031	0,77	49	24	25	
			0,5	0,5	0,98	9	8	0,011	-	-	-	-	
			1,0	1,0	0,91	11	10	0,015	0,97	2	21	22	
			1,5	1,5	0,83	17	12	0,022	0,88	32	22	24	
			2,0	2,0	0,79	22	13	0,026	0,82	40	24	24	
		5,0	2,5	2,5	0,77	25	14	0,029	0,80	43	24	24	
			1,0	1,0	0,94	9	9	0,013	-	-	-	-	
			1,5	1,5	0,85	16	11	0,020	0,90	30	22	23	
			2,0	2,0	0,81	20	13	0,024	0,84	37	23	24	
		6,0	2,5	2,5	0,80	21	13	0,025	0,82	40	24	24	
			1,0	1,0	0,97	8	8,50	0,012	-	-	-	-	
			1,5	1,5	0,88	13	10	0,018	0,93	27	21	23	
			2,0	2,0	0,84	17	12	0,021	0,86	35	23	23	
					2,5	2,5	0,82	19	13	0,023	0,84	37	23

Предложена структура информационной базы для проектирования дорожных одежд с учётом регионального научно-практического опыта, основанная на реляционной модели данных. Формат данных в базе представлен тремя категориями: числовой, текстовый и графический. Систематизация всех сведений выполняется по трём группам показателей: заимствованных из справочной литературы, установленных с применением методов математического моделирования, обобщающих результаты экспериментальных исследований (полевые и лабораторные работы). Информационная база, разработанная для Омской области (№ 2016620320), зарегистрирована в федеральной службе по интеллектуальной собственности.

На основе данных информационной базы, разработанной для территории Томской области, сведений о наличии дорожно-строительных материалов, а также рекомендаций ОДН 218.046–01 предложен альбом конструкций дорожных одежд капитального типа для строительства и реконструкции автомобильных дорог III категории, включающий 52 конструкции дорожных одежд.

Экономический эффект от внедрения рекомендуемых расчётных значений характеристик прочности и деформируемости глинистых грунтов земляного полотна, рассчитанный по приведённым строительным и эксплуатационным затратам в базисном уровне цен 2001 года составил 275 734 рублей на 1 км автомобильной дороги или 2 580 870 рублей в уровне цен I квартала 2017 г.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Основные научные результаты и практические рекомендации представлены в следующих выводах:

1. Оптимизирована методика определения величины среднемесячного испарения с поверхности дорожного полотна за счёт прямого численного интегрирования уравнения трансцендентного вида, что позволило сократить количество операций, связанных с вводом дополнительных параметров, и повысить точность решения в среднем на 10 %. В отличие от ранее применявшегося способа определения сроков окончания периода осеннего влагонакопления, предложен новый способ их установления по температуре воздуха, при которой начинается промерзание глинистого грунта пограничной зоны земляное полотно – дорожная одежда. Продолжительность периода осеннего влагонакопления, вычисленная, например, для территории Омского района Омской области увеличилась на одну декаду месяца. При этом относительное отклонение значений расчётной влажности грунтов земляного по-

лотна, вычисленных прогнозом с применением развитого метода проф. И.А. Золотаря и фактически установленных на мониторинговых постах на величину до 5 % составляет 37,5 %, до 10 % – 95,8 % и более 10 % – всего 4,2 % от общего числа расчётных случаев. Предложенные решения реализованы в виде программ для ЭВМ с использованием интегрированной среды Code::Blocks и компилятора GNU Fortran Compiler (свидетельства № 2014612694, № 2014615458, № 2014617069).

2. Выполнен мониторинг сезонного изменения влажности грунтов рабочего слоя земляного полотна на участке автомобильной дороги «Каргала – Бакчар» (км 128+000 – км 137+000), проводившийся на четырёх постах наблюдения, характеризуемых 2 и 3 схемами увлажнения, в течение трёх годовых циклов (с 2011 по 2014 гг.) водно-теплого режима. В этот же период на сети автомобильных дорог Алтайского края, Кемеровской, Курганской, Новосибирской, Омской, Томской, Тюменской областей и Ханты-Мансийского автономного округа (в пределах границ II ДКЗ) организован и выполнен комплекс эпизодических полевых работ, позволивший установить нормативные значения физико-механических свойств глинистых грунтов и их состав. Осуществлено визуальное и инструментальное обследование около 50 участков автомобильных дорог. Проведено более 40 статических штамповых испытаний грунтов рабочего слоя земляного полотна и отборов монолитов грунтов техногенной структуры. Выполнены лабораторные исследования около 300 образцов и монолитов грунтов, отобранных во время проведения полевых работ.

3. Установлен комплекс эмпирических регрессионных зависимостей, предназначенных для определения значений прочностных и деформационных характеристик пылеватых супесей и пылеватых суглинков. Зависимости имеют отличия от ранее приведённых в работах В.Н. Ефименко и С.В. Ефименко, которые обусловлены увеличением объёма выборок за счёт результатов полевых и лабораторных исследований, выполненных автором. Это позволило повысить достоверность аппроксимации экспериментальных данных до значений для суглинков пылеватых –  $R_{E_{cr}}^2 = 0,9108$ ,  $R_{\varphi_{cr}}^2 = 0,9168$ ,  $R_{C_{cr}}^2 = 0,9005$ , для супесей пылеватых –  $R_{E_{cn}}^2 = 0,9006$ ,  $R_{\varphi_{cn}}^2 = 0,8048$ ,  $R_{C_{cn}}^2 = 0,8619$ , что указывает на возможность их применения при определении значений механических свойств глинистых грунтов для выделенных на территории исследования дорожных районов. Установлено, что наибольшее влияние на коэффициент влагопроводности оказывает плотность грунта. При достижении значений, равных максимальной плотности и оптимальной

влажности глинистого грунта,  $K_{вл}$  имеет минимальные значения и стремится к нулю. Так, при плотности образца грунта 1,79 г/см<sup>3</sup> и влажности 17,8 % величина коэффициента влагопроводности составила 0,03 см<sup>2</sup>/ч.

4. Для территории Северного широтного пояса экономического развития Западно-Сибирского региона, характеризуемого избыточным увлажнением, обоснован и уточнён комплекс расчётных значений характеристик влажности, прочности и деформируемости глинистых грунтов, применяемых при проектировании дорожных одежд. Для удобства практического применения значения характеристик, назначенные по установленным эмпирическим регрессионным зависимостям, представлены в табличных формах. При этом, например, относительное отклонение модуля упругости установленного по результатам исследований при относительной влажности 0,70 д. ед. от значения, приведённого в ОДН 218.046-01, составляет 26 %. Внедрение результатов исследования позволит получить экономический эффект, величина которого в базисном уровне цен 2001 г. составит 275 734 руб. на 1 км автомобильной дороги, а в уровне цен I квартала 2017г. – 2 580 870 руб.

**Дальнейшие научные исследования** будут направлены на развитие направления применения интеллектуальных систем, основанных на тестовых методах распознавания образов и средствах когнитивной графики для решения различного рода задач при проектировании автомобильных дорог.

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

**Публикации в ведущих научных рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:**

1. Ефименко, В.Н. К обоснованию территориального распространения границы II – III дорожно-климатических зон в Западно-Сибирском регионе / В.Н. Ефименко, С.В. Ефименко, **А.В. Сухоруков**, Т.А. Кожухарь // Вестник ТГАСУ. – 2014. – № 5. – С. 133–142.

2. Ефименко, В.Н. Назначение расчётных характеристик грунтов земляного полотна для расчёта дорожных одежд / В.Н. Ефименко, С.В. Ефименко, **А.В. Сухоруков** // Вестник КузГТУ. – 2015. – № 3. – С.124–130.

3. Ефименко, С.В. Обоснование расчётных значений характеристик глинистых грунтов Западно-Сибирского региона / С.В. Ефименко, **А.В. Сухоруков**, В.Н. Ефименко // Известия вузов. Строительство. – 2015. – № 7. – С. 69–77.

4. **Сухоруков, А.В.** Территориальное нормирование значений характеристик прочности и деформируемости глинистых грунтов / А.В. Сухоруков // Вестник ТГАСУ. – 2015. – № 5. – С. 193–205.

5. Ефименко, С.В. Стандартизация расчётных значений характеристик глинистых грунтов Кузбасса для обеспечения качества проектирования автомобильных дорог / С.В. Ефименко, В.Н. Ефименко, М.В. Бадина, **А.В. Сухоруков**, В.С. Чурилин, А.О. Афиногенов // Вестник ТГАСУ. – 2015. – № 5. – С. 173–183.

6. **Сухоруков, А.В.** Обоснование региональных норм проектирования дорожных одежд с учётом изменчивости геоконструкций территорий / А.В. Сухоруков // Вестник ТГАСУ. – 2016. – № 4. – С. 159–169.

**Статьи в научных журналах, сборниках научных трудов и материалов научно-практических конференций:**

7. Ефименко, С.В. Уточнение схемы расчёта величины испарения с поверхности грунтовых оснований автомобильных дорог при формировании информационно-аналитической базы для прогнозирования их влажности / С.В. Ефименко, **А.В. Сухоруков**, В.Н. Ефименко // Транспорт и дороги Казахстана. – 2013. – № 4 (54). – С. 21–24.

8. **Сухоруков, А.В.** К обоснованию периода осеннего влагонакопления при прогнозировании влажности грунтов земляного полотна автомобильных дорог Западно-Сибирского региона / А.В. Сухоруков // Техника и технологии дорожного хозяйства. – 2014. – №1 (27). – С. 21–25.

9. Efimenko, V.N. Accounting for natural-climatic conditions in the design of roads in western Siberia / V.N. Efimenko, S.V. Efimenko, **A.V. Sukhorukov** // Sciences in Cold and Arid Regions. – 2015. – Volume 7. – Issue 4. – Pp. 307–315.

10. Efimenko, V.N. Technology for Assignment of Predicted Behavior of Subgrade Soils in the Design of Road Pavements / V.N. Efimenko, S.V. Efimenko, **A.V. Sukhorukov** // Key Engineering Materials. – 2016 – Vol. 683. – Pp. 250–255.

11. Efimenko, V.N. Peculiarities of strength and deformability properties of clay soils in districts of Western Siberia / V.N. Efimenko, S.V. Efimenko, **A.V. Sukhorukov** // Advanced Materials in Technology and Construction. – 2016. – Vol. 1698. – 070020.

12. **Сухоруков, А.В.** Экспериментальные исследования коэффициента влагопроводности глинистых грунтов / А.В. Сухоруков, М.Ю. Калинин // Сборник трудов XIII Международной конференции студентов и молодых учёных «Перспективы развития фундаментальных наук» [Электронный ресурс] / под ред. И.А. Курзиной, Г.А. Вороновой. – Томск: Изд-во НИТПУ, 2016. – С. 58–60. – Режим доступа: [http://science-persp.tpu.ru/Arch/Proceedings\\_2016\\_vol\\_6.pdf](http://science-persp.tpu.ru/Arch/Proceedings_2016_vol_6.pdf)

### **Свидетельства на программы для электронных вычислительных машин и базу данных:**

13. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2016620320. Российская Федерация. Показатели элементов геокомплекса Омской области для назначения расчётных характеристик глинистых грунтов, применяемых при проектировании дорожных одежд / С.В. Ефименко, М.В. Бадина, **А.В. Сухоруков**, В.С. Чурилин ; правообладатель ТГАСУ ; заявл. 11.01.2016 ; опубл. 10.03.2016.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014612694. Российская Федерация. Определение величины испарения с поверхности грунтового основания / С.В. Ефименко, **А.В. Сухоруков**, Д.Н. Черепанов, С.П. Батуев; правообладатель ТГАСУ ; заявл. 09.01.14 ; опубл. 05.03.14.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014615458. Российская Федерация. Определение продолжительности периодов осеннего влагонакопления и промерзания дорожных конструкций / С.В. Ефименко, **А.В. Сухоруков**, Д.Н. Черепанов, С.П. Батуев ; правообладатель ТГАСУ ; заявл. 07.04.2014; опубл. 27.05.2014.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617069. Российская Федерация. Определение осенней влажности глинистых грунтов рабочего слоя земляного полотна автомобильных дорог / С.В. Ефименко, **А.В. Сухоруков**, С.П. Батуев ; правообладатель ТГАСУ ; заявл. 20.05.2014; опубл. 10.07.2014.

#### **Сухоруков Алексей Владимирович**

Обоснование региональных расчётных значений характеристик глинистых грунтов для проектирования дорожных одежд в условиях Западной Сибири

#### **АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Специальность 05.23.11 – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

Подписано в печать «28» апреля 2017 г.

Формат 60x84/ 16. Бумага офсет. Гарнитура Таймс, печать офсет.

Уч.-изд.л. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ № 77.

Издательство ФГБОУ ВО ТГАСУ,

634003, г. Томск, пл. Соляная, 2