

На правах рукописи



Лунёв Александр Александрович

**ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЁТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЗОЛОШЛАКОВЫХ СМЕСЕЙ
ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Омск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)».

Научный руководитель: Сиротюк Виктор Владимирович, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Кулижников Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор, Федеральное автономное учреждение «Российский дорожный научно-исследовательский институт», начальник управления методов проектирования автомобильных дорог

Сухоруков Алексей Владимирович, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский Государственный Архитектурно-Строительный Университет», доцент кафедры «Автомобильных дорог»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», ФГБОУ ВО «ПНИПУ»

Защита диссертации состоится 17 октября 2019 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета ВАК РФ Д 212.250.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» по адресу: 644080, г. Омск, пр. Мира, 5, ауд. 3124. Тел.: 8(3812) 65-03-23, e-mail: bobrova.tv@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» и на сайте университета по адресу: <https://sibadi.org/about/units/institut-magistrature-i-aspirantury/studies/dissertations/62135/>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять в диссертационный совет по адресу: 644080, г. Омск, пр. Мира, 5. Тел. 8 (3812) 65-03-23, e-mail: bobrova.tv@gmail.com

Автореферат разослан «02» сентября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

д-р техн. наук, проф.



Боброва Татьяна Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Подавляющее большинство тепловых электростанций (ТЭС) в Сибирском и Дальневосточном федеральных округах и некоторые ТЭС в Европейской части России используют в качестве топлива угли. В соответствии с Энергетической стратегией России на период до 2030 г., утверждённой распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р, эта тенденция сохранится на ближайшие десятилетия. При сжигании каждой тонны угля образуется от 10 до 50% золошлаковых отходов (ЗШО), включающих тонкодисперсную золу-унос и золошлаковую смесь (ЗШС). На территории РФ уже накоплено почти 1,6 млрд т ЗШС, а к 2030 г., по оценкам экспертов Интер РАО ЕЭС, их количество достигнет 2,0 млрд т. Только в г. Омске накоплено 76 млн т ЗШС, и ежегодно эта цифра возрастает ещё на 1,5 млн т. Основным способом утилизации ЗШС в России является захоронение в мощных гидротехнических сооружениях – золоотвалах. Отвалы расположены вблизи каждого крупного города и занимают сотни гектаров пригородной территории, усугубляя их экологические проблемы.

Наряду с экологической проблемой в мегаполисах обостряется и другая проблема. Возрастающие объёмы дорожного, промышленного и гражданского строительства требуют изыскания сотен миллионов кубометров грунтов для сооружения земляного полотна, планировочных насыпей и т.п. Под карьеры часто выделяются участки с переувлажнёнными глинистыми грунтами, использование которых вызывает повышение энерго- и трудозатрат строительства и увеличивает его стоимость. Это, в первую очередь, связано с истощением резервов в процессе развития городов и высокой стоимостью пригородных земель.

В развитых и некоторых развивающихся странах (Китай, Индия) эффективно утилизируется от 55 до 100% ЗШО. В РФ общая доля утилизации ЗШО пока не превышает 10%. Согласно многочисленным исследованиям использование ЗШО возможно во многих отраслях промышленности. Но наиболее перспективным считается крупнотоннажное использование ЗШС для сооружения насыпей, поскольку даёт возможность решать обе проблемы, упомянутые выше.

В работах предшественников отражены исследования, подтверждающие возможность возведения насыпей автомобильных дорог из ЗШС. Главным препятствием, сдерживающим полномасштабное применение ЗШС, является недостаточная изученность их физико-механических свойств, прочностных и деформационных характеристик этого техногенного грунта для проектирования инженерных сооружений.

Разработанный в СибАДИ Всероссийский нормативно-методический документ ОДМ 218.2.031-2013 «Методические рекомендации по применению золы-уноса и золошлаковых смесей от сжигания угля на тепловых электростанциях в дорожном строительстве» и ряд региональных нормативов требуют дополнений. Необходимо уточнить приведённые там значения прочностных и деформационных параметров. Коэффициент Пуассона ЗШС ранее не определялся. Кроме того, достоверно неизвестно, как влияет влажность, степень уплотнения и число циклов нагружения на эти параметры. Не обобщены данные об изменении механических свойств ЗШС в течение срока службы грунтовых сооружений. Поэтому определение достоверных значений расчётных параметров механических свойств является актуальной задачей, требующей решения.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами изучения механических свойств ЗШС и их применения в дорожной отрасли в России занимались: М.В. Балюра, Н.И. Барац, Э.М. Добров, П.Ю. Дьяконов, Е.В. Иванов, В.И. Крутов, А.М. Кулижников, В.А. Меленьтьев, В.П. Никитин, В.Г. Пантеелев, Е.И. Путилин, В.В. Сиротюк, В.В. Фурсов, В.С. Цветков. За рубежом схожие исследования выполняли: G. Baykala, G.F. Brendel, R.A. Collins, R.J. Collins, J.M. DeSouza, A.M. DiGioia, A. Edinçlilerb, A. Ghiya, A. Ghosh, P. E. Glogowski, D.H. Gray, K. Gwizdala, A. Haleema, H.W. Huang, B. Indraratna, R.S. Jakka, S. Khuranaa, B. Kim, S. Kumarc, D.W. Lamb, Y. K. Lin, S. Luthrab, B. Mannana, J. P. Martin, P.S. Mukherjee, M.B. Nadaf, W.L. Nuzzo, R. Ossowski, R. Padam, S. K. Pal, A. P. Panda, N.S. Pandian, M. Prezzi, J. E. Roberts, A. Saygilia, A.K. Sinha, S. R. Singh, L. Srivastava, D. Sushovan, S.K. Tiwari, G. Vesmawala, K. Zabielska-Adamska и многие другие. Несмотря на широкий круг специалистов, занимавшихся вопросами изучения свойств ЗШС, большинство исследований имеют ограниченный характер.

Из последних крупных исследований следует выделить диссертацию Е.В. Иванова на тему «Обоснование применения золошлаковых смесей для строительства земляного полотна с учётом особенностей водно-теплового режима» (2014).

Основная идея работы состоит в том, что ЗШС являются разновидностью техногенных грунтов, обладающих особыми механическими свойствами, поэтому при расчётах дорожных конструкций на прочность и устойчивость нельзя напрямую применять значения расчетных параметров и математические модели прогнозирования напряжённо-деформированного состояния земляного полотна, полученные ранее для природных грунтов.

Объект исследования: земляное полотно автомобильной дороги, построенное из золошлаковой смеси.

Предмет исследования: закономерности изменения значений параметров механических характеристик ЗШС для проектирования насыпей земляного полотна автомобильных дорог, а также процессы, происходящие в теле этих насыпей из ЗШС при воздействии внешних нагрузок.

Цель диссертационной работы: повышение эффективности проектирования земляного полотна из золошлаковых смесей с учетом особенностей механических свойств этих техногенных грунтов и изменения этих свойств в жизненном цикле автомобильных дорог.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ отечественных и зарубежных научных исследований в области изучения механических свойств ЗШС и их применения для устройства насыпей земляного полотна автомобильных дорог.

2. Теоретически исследовать особенности формирования напряжённого состояния грунтовых массивов из ЗШС и их связь с параметрами механических характеристик этих техногенных грунтов.

3. Экспериментально определить значения параметров механических характеристик ЗШС в зависимости от состояния массива, воздействия природных факторов, транспортных нагрузок и сопоставить теоретические результаты моделирования напряженного состояния от действия внешней нагрузки с экспериментальными данными.

4. Осуществить опытно-производственную проверку результатов исследований.

5. Оценить экологическую безопасность и экономическую эффективность рекомендуемых конструктивно-технологических решений при использовании ЗШС для строительства земляного полотна.

6. Уточнить значения расчетных параметров механических характеристик для проектирования земляного полотна автомобильных и городских дорог из ЗШС и доработать конструктивно-технологические решения насыпей из ЗШС (поперечные профили), предлагаемые ранее разработанной нормативной документацией.

Методология и методы исследования для решения поставленных задач включают: литературный и патентный поиск, анализ и обобщение, теоретические исследования и физические эксперименты; системный подход при изучении физико-механических свойств ЗШС; теорию планирования эксперимента, опытное строительство и обследование, технико-экономическую оценку результатов исследования; математическое моделирование и регрессионный анализ. Используются следующие программные комплексы: *MATLAB (CurveFitting), Geo5, Z-soil, Plaxis 2D, IndorCAD, Госстройсмета*.

Научная новизна работы. Модифицирована предложенная *Олсоном* математическая модель формирования напряжённого состояния, возникающего в грунте земляного полотна от действия транспортной нагрузки, путем учета особенностей структуры золошлаковых смесей, их плотности, влажности, собственного веса дорожной конструкции и характера приложения транспортной нагрузки.

Обоснованы значения расчётных параметров механических характеристик ЗШС, необходимых для оценки прочности и устойчивости земляного полотна с учётом:

- изменений их плотности и влажности в жизненном цикле дорог;
- многократного динамического воздействия транспортных средств;
- неоднородности гранулометрического состава этих техногенных грунтов в отвалах.

Установлены математические зависимости, отражающие связи между модулем упругости, полученным по методу штамповых испытаний и рычажного пресса, секущим модулем упругости, полученным из трехосных испытаний, компрессионным модулем деформации и калифорнийским числом несущей способности.

Теоретическая значимость работы заключается в получении новых знаний, позволяющих достоверно прогнозировать значения прочностных и деформационных параметров ЗШС в зависимости от их плотности, влажности и содержания шлаковой фракции, числа приложения расчётных нагрузок, а также процессы формирования НДС в насыпях из этого техногенного грунта.

Практическая значимость работы. Обоснованы расчётные значения характеристик прочности и деформируемости золошлаковых смесей, позволяющие осуществлять конструирование и расчёт дорожных конструкций на прочность и устойчивость (с требуемым уровнем надёжности).

Рекомендованы конструктивно-технологические решения для сооружения земляного полотна автомобильных дорог разных технических категорий из ЗШС на всех типах местности по условиям увлажнения.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель формирования напряжённого состояния, возникающего в насыпях из ЗШС под действием транспортной нагрузки и собственного веса дорожной конструкции, учитывающая особенности структуры золошлаков, степень уплотнения этого техногенного грунта и характер приложения нагрузки.

2. Математические зависимости характеристик прочности и деформируемости ЗШС от следующих факторов: влажность; плотность; содержание шлаковой фракции; количества многократных воздействий транспорта.

3. Результаты экспериментальных исследований закономерностей изменения характеристик прочности и деформируемости ЗШС.

4. Алгоритм расчета коэффициента неоднородности механических характеристик ЗШС, требуемого для учёта неоднородности этого техногенного грунта в золоотвалах.

5. Математические зависимости отражающие связи между модулем упругости полученным по методам штамповых испытаний и рычажного пресса, секущим модулем упругости, полученным из трехосных испытаний, компрессионным модулем деформации и калифорнийским числом несущей способности.

6. Конструктивно-технологические решения для земляного полотна автомобильных дорог из ЗШС.

Степень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается методологической базой исследований, основанной на фундаментальных теоретических положениях; соблюдением основных принципов физического и математического моделирования; достаточным объёмом экспериментальных данных, полученных с использованием приборов и оборудования, прошедших поверку. Результаты исследования докладывались и получили положительные отзывы на 15 научных конференциях различного уровня.

Личный вклад соискателя заключается в определении цели и задач исследования, выполнении теоретических и экспериментальных исследований, участии в проектировании, строительстве и обследовании опытного участка и двух опытно-производственных объектов, анализе и обобщении полученных результатов, написании заключения и выводов, разработке рекомендаций по проектированию и строительству земляного полотна автомобильных дорог из ЗШС, уточняющих и дополняющих действующие нормативно-методические документы.

Апробация работы. Материалы исследования доложены, обсуждены и получили положительные отзывы на следующих конференциях и семинарах: 75-я студенческая научно-техническая конференция 20-30 апреля 2015 г., Омск, СибАДИ; 1-й Международный научный форум молодых учёных «Наука будущего – наука молодым» 28.09-2.10.15 г., Севастополь; Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы науки и техники глазами молодых учёных». 8-9 февраля 2016 г., Омск, СибАДИ; XL Региональная студенческая научно-практическая конференция «Молодежь третьего тысячелетия»; III Всероссийская студенческая научная конференция с международным участием «Студент: наука, профессия, жизнь»; 76-я студенческая научно-техническая конференция 17-19 апреля 2016 г., Омск, СибАДИ; Семинар «Применение наилучших доступных технологий в энергосбережении и строительстве на примере предприятий Омской области» в рамках VI специализированной выставки «Стройиндустрия Сибири» 2016 г.; VII Международная научно-техническая конференция ПАО «Омскнефтехимпроект» «Инженерное дело: взгляд в будущее», 2016 г., Омск; Региональная научно-практическая конференция «Применение отходов производителей тепловой и электрической энергии в дорожно-строительной отрасли» 6 декабря 2017 г., Новосибирск; Международная

научно-практическая конференция «Актуальные проблемы науки и техники глазами молодых учёных», февраль 2017 г.; Работа презентована в финале федерального конкурса «Моя страна – моя Россия» 24-27 июня 2017 г.; Международная научно-практическая конференция «Инновационные факторы развития транспорта. Теория и практика», 19-20 октября 2017 г., Новосибирск; Международная выставка «100 идей для СНГ», 11-13 апреля 2018 г., Минск. Результаты работы обсуждались на многочисленных заседаниях рабочей группы по использованию ЗШО в рамках работы кластера утилизации ЗШС в г. Омске; International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2018) 26–28 September 2018, South Ural State University, Russian Federation.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 26 работ, в том числе: восемь статей в журналах из списка ВАК (две работы опубликованы в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus и одна в WoS), 17 статей, входящих в перечень РИНЦ, один патент на изобретение и две депонированные рукописи.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Результаты исследования изложены на 179 страницах основного текста, включающего 87 рисунков, 39 таблиц, библиографический список включает 211 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности темы диссертационной работы, изложены цель и основные задачи исследований, сформулированы научная новизна и практическая значимость.

В первой главе рассмотрены вопросы образования, складирования и накопления ЗШС тепловых электростанций. Приведена основная информация о ЗШС как продуктах комплексного термического преобразования горных пород при сжигании твёрдого топлива, их особенностях по сравнению с природными грунтами. Установлено, что на большинстве угольных ТЭС в РФ и за рубежом образуются низкокальциевые, кислые и сверхкислые золошлаки (по классификации ОДМ 218.2.031-2013). Эти ЗШС и использованы нами для основной части экспериментальных исследований.

Во второй главе проанализированы математические решения для прогнозирования напряжённого состояния в массиве грунта под действием внешней нагрузки. При этом определены модели, которые предусматривают изменение механизма формирования напряженного состояния в грунтах различной структуры, в соответствии с опытами *Берингера, Сантамарина, Кларка и Таданага*.

Среди таких решений проанализированы методики *И.И. Кандаурова, М. Хара, Р.Олсона, В.Г. Пискунова, Г.К. Клейна, С.А. Матвеева* (модифицированное решение) для прогнозирования напряженного состояния. При теоретическом моделировании были выведены зависимости, связывающие параметры распределительной среды (*Фрелиха, Кандаурова, Хара*) с параметрами механических свойств грунта (углом внутреннего трения и CBR).

Оценка теоретических решений осуществлена путём проведения экспериментальных исследований по определению давлений, создаваемых жёстким ме-

таллическим штампом по глубине массива. Для этого на разной глубине в массиве ЗШС устанавливали несколько месдоз по оси штампа и прикладывали давление от 50 до 200 кПа. Размещение оборудования приведено на схеме (рисунок 1).

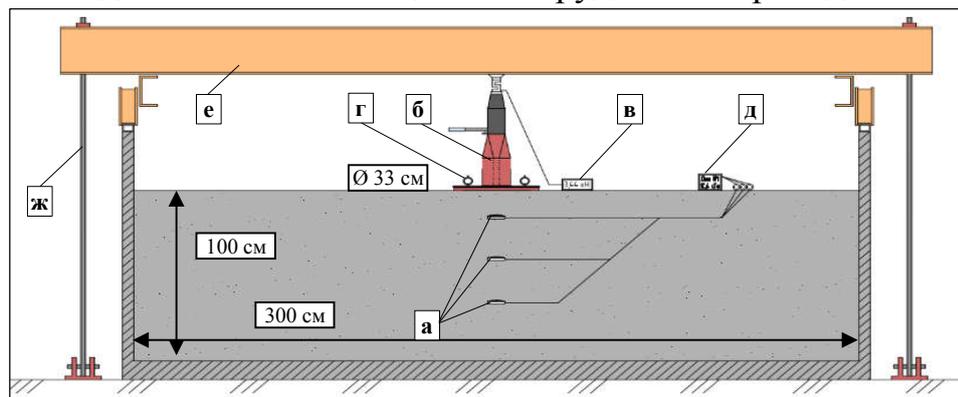


Рисунок 1 – Схема размещения оборудования; а – датчики давления; б – пресс-штамп; в – датчик силы; г – измеритель регулятор; д – индикаторы перемещений; е – упорная система; ж – анкерная тяга

Проведены испытания для оценки распределения давления в массиве ЗШС: с разной относительной влажностью (от 0,4 до 1,0) при коэффициенте уплотнения 0,95; с разным коэффициентом уплотнения (от 0,85 до 1,00) при оптимальной влажности. Эксперименты показали:

- ни одна из известных математических зависимостей для определения параметров распределительной способности среды через параметры механических свойств ЗШС не позволила описать экспериментально полученные значения;
- во всех испытаниях с разной влажностью, но одинаковой плотностью ЗШС не отмечены изменения в напряжённом состоянии;
- наибольшую точность показал подход *Олсона*, использующий параметры *Фрелиха* (ошибка аппроксимации при описании опытных данных составила 3,2%).

Попытки описать результаты экспериментов другими решениями (*Матвеев*, *Клейн*, *Пискунов*) показали ошибки существенно выше (от 14 до 25%). Наиболее близкие результаты к решению *Олсона* дало описание данных по теории *Кандаурова*, при использовании формулы *Г.И. Покровского* (ошибка аппроксимации 7,5%).

По критерию наименьшей ошибки аппроксимации осуществлён подбор параметра *Фрелиха* для описания распределения напряжений в массиве при каждом из исследованных значений коэффициента уплотнения ЗШС. Графически результаты сравнения представлены на рисунке 2.

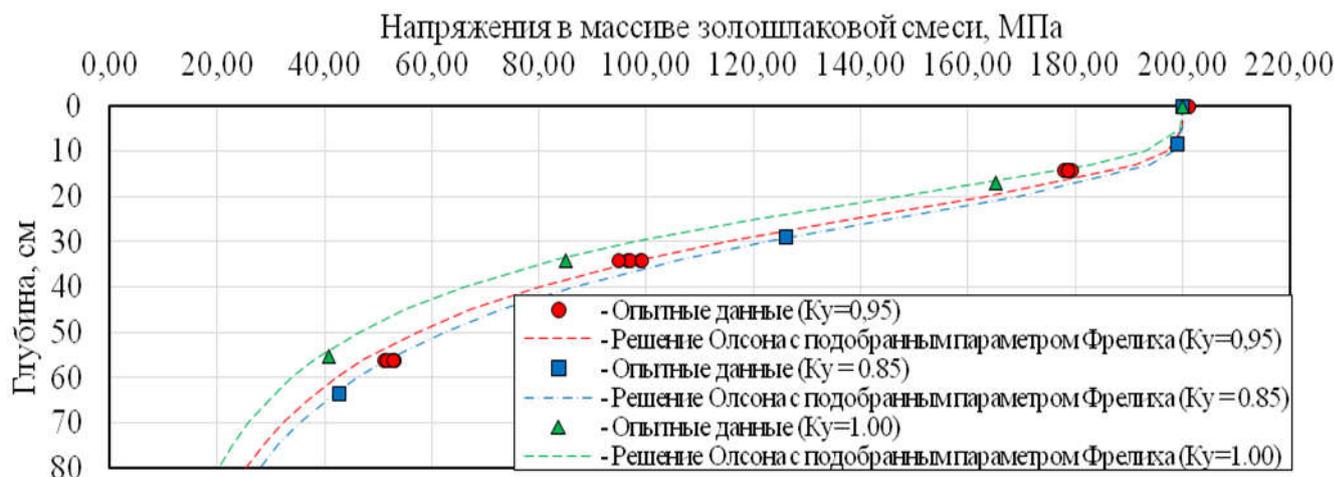


Рисунок 2 – Графики результатов второго цикла экспериментов и решения *Олсона*

В то же время была обнаружена чётко выраженная корреляция между коэффициентом уплотнения ЗШС и параметром Фрелиха, что позволило эмпирически связать коэффициент распределительной среды Фрелиха со степенью уплотнения.

Отличия формирования напряжённого состояния в условиях статики и динамики вызвало необходимость изучения особенностей динамических свойств среды. Для анализа динамических свойств среды использовался анализатор спектра модели ZET 017-U8 и пьезоэлектрические акселерометры ВС – 111 производства фирмы ZETLAB.

На подготовленном массиве ЗШС с уложенными датчиками проводили серию экспериментов (рисунок 3) для оценки действия однократной ударной нагрузки с использованием прибора динамического нагружения с диаметром штампа 30 см. Нагрузка прилагалась за счёт энергии падающего груза.

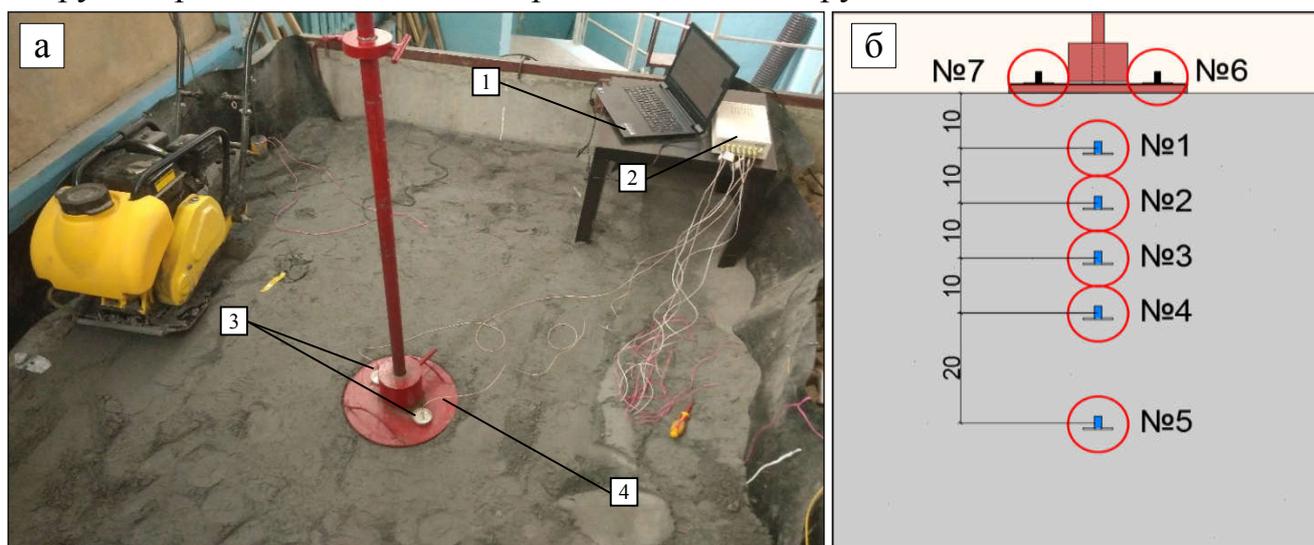


Рисунок 3 – Динамические испытания на действие однократной ударной нагрузки: а – размещение оборудования; б – схема расположения датчиков; 1 – ноутбук для управления п.2; 2 – анализатор спектра ZET 017-U8; 3 – акселерометры ВС – 111; 4 – прибор динамического нагружения.

Результаты экспериментов показали (рисунок 4), что напряжения при динамическом нагружении описываются теорией Фрелиха при подборе параметра с ошибкой аппроксимации 2,7%.

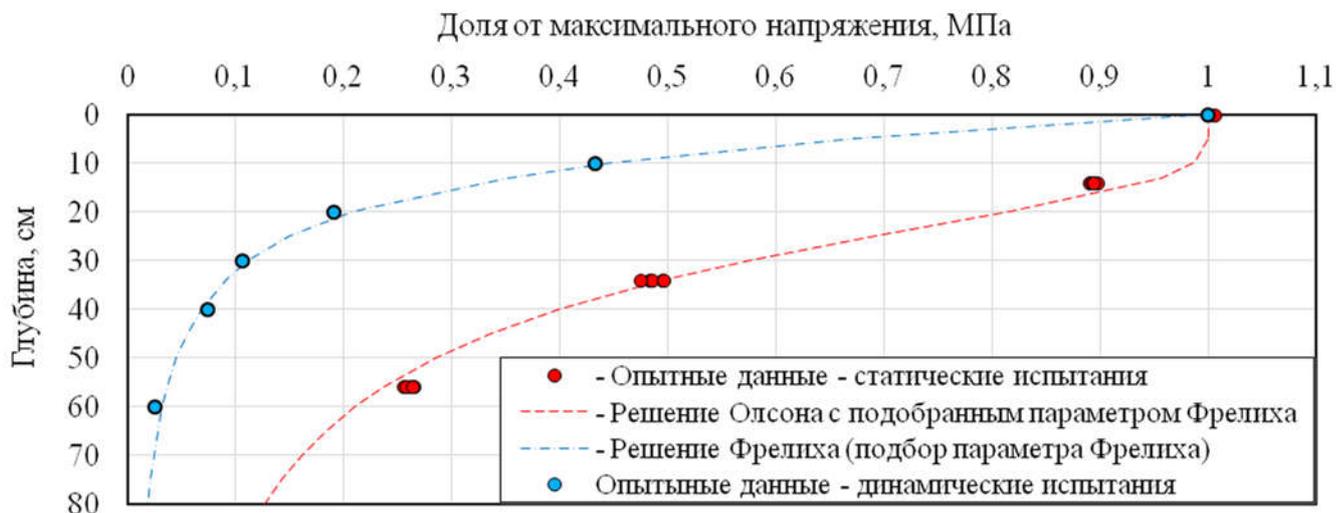


Рисунок 4 – Графики затухания напряжений от динамической и статической нагрузок

Экспериментально-теоретические исследования позволили установить математические модели, адекватно объясняющие особенности формирования напряжённого состояния в насыпи из ЗШС, а также впервые описать механизм влияния структуры ЗШС (плотности и влажности) и характера приложения нагрузки на распределение напряжений в массиве этого техногенного грунта.

Параметр среды *Фрелиха* был впервые связан с параметрами структуры ЗШС (плотности и влажности) и характером приложения нагрузки (параметром динамичности нагрузки), что позволило модифицировать решение *Олсона* для прогнозирования напряжённого состояния в массиве грунтов.

Общие уравнения, полученные нами для прогнозирования напряжённого состояния в насыпи из ЗШС различной структуры, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Уравнения для определения главных напряжений в массиве из ЗШС при действии нагрузки от штампа и веса вышележащих слоев (с учётом характера приложения нагрузки)

Название компонента тензора	Формула для определения соответствующего компонента тензора
Вертикальное нормальное напряжение, кПа	$\sigma_1 = \gamma_{cp} \cdot z + p \left[1 - \frac{\left(\frac{z}{R}\right)^{(14K_y - 6,8)/d}}{\left(1 + \left(\frac{z}{R}\right)^2\right)^{(14K_y - 6,8)/2d}} \right]$
Горизонтальные нормальные напряжения, кПа	$\sigma_3 = \gamma_{cp} \cdot z \cdot \frac{1+2\cdot\mu}{2} + p \left[\left(\frac{1+2\cdot\mu}{2}\right) - (1+\mu) \cdot \left[1 + \left(\frac{R}{z}\right)^2 \right]^{\frac{(14K_y - 6,8)}{3d}} + \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \left(\frac{R}{z}\right)^2 \right]^{-(14K_y - 6,8)/d} \right]$
<p>Примечания: 1. p – величина давления по подошве круглого штампа, МПа; μ – коэффициент Пуассона. d – параметр динамичности нагрузки, равный 1 для условий статики и 6,5 для динамики; γ_{cp} – средний удельный вес слоев дорожной конструкции лежащих выше точки в которой определяются напряжения, МН/м³; R – расстояние от точки приложения силы до точки, в которой определяется напряжение, м; z – глубина точки по оси штампа в которой определяется напряжение, м; K_y – коэффициент уплотнения.</p> <p>2. Граничные условия для уравнений назначены исходя из условий эксплуатации земляного полотна в жизненном цикле автомобильной дороги. Модели достоверны для уплотненной механическим способом ЗШС с коэффициентами уплотнения от 0,85 до 1,05 и при относительной влажности от 0,3 до 1,0.</p>	

В третьей главе представлены результаты исследований по изменению прочностных и деформационных характеристик ЗШС при разной влажности, плотности, зерновом составе этого техногенного грунта в результате циклических нагружений, моделирующих транспортные нагрузки в дорожной конструкции.

Для определения механических характеристик ЗШС в работе применены следующие методы испытаний: прямого одноплоскостного среза грунтов в консолидировано-дренированных условиях; компрессионного сжатия; определения модуля упругости материала на рычажном прессе; модуля деформации в приборе трёхосного сжатия; определения штамповыми испытаниями; определения CBR. Часть оборудования изображена на рисунке 5.

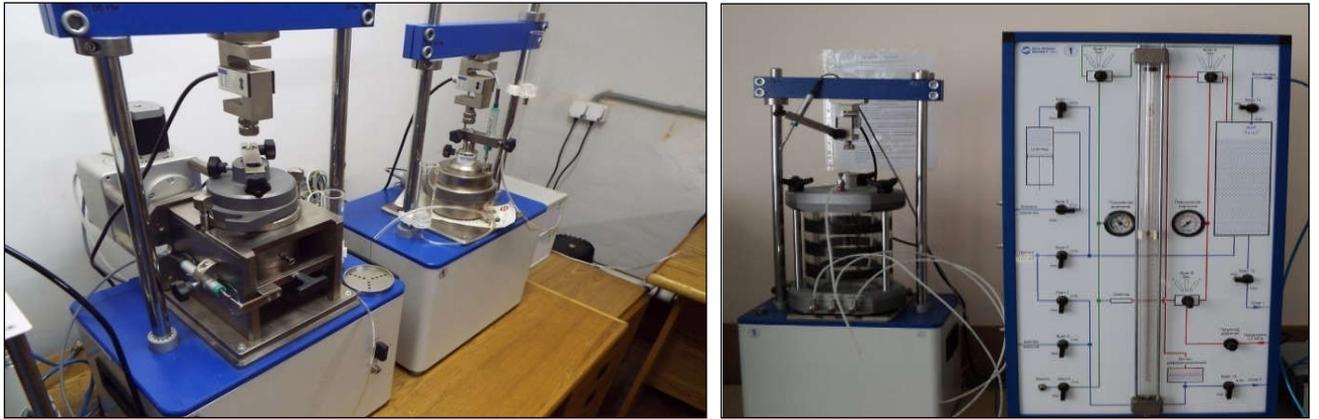


Рисунок 5 – Лабораторный комплекс АСИС для испытания грунтов: слева – приборы компрессионного сжатия и прямого среза; справа – прибор трехосного сжатия

Исследования проводились на образцах нарушенной структуры при разной плотности (K_y от 0,90 до 1,05) и влажности ЗШС (от 0,25 до 1,00 относительной влажности), различном содержании частиц шлаковой фракции (от 0 до 100%) в её составе.

По результатам исследований, выполненных с использованием математического планирования экспериментов, и корреляционно-регрессионного анализа были получены уравнения регрессии для прогнозирования значений характеристик прочности ЗШС при различных значениях плотности и влажности (таблица 2).

Таблица 2 – Уравнения регрессии для прогнозирования характеристик прочности ЗШС

Уравнение регрессии	R^2
Удельное сцепление c , кПа	
$c = (P_{10} \cdot K_y + P_{20} \cdot K_y^2 + P_{30} \cdot K_y^3 + P_{01} \cdot W + P_{02} \cdot W^2 + P_{03} \cdot W^3 + P_{11} \cdot W \cdot K_y + P_{21} \cdot K_y^2 \cdot W + P_{12} \cdot K_y \cdot W^2 + P_{00}) \cdot C_n$ $P_{00} = -397,5; P_{10} = 1172; P_{01} = -13,35; P_{11} = 71,07; P_{20} = -1164; P_{02} = -25,93;$ $P_{30} = 386,7; P_{03} = 11,11; P_{21} = -38,43; P_{12} = -0,7386$	0,95
Угол внутреннего трения φ , град	
$\varphi = P_{10} \cdot K_y + P_{20} \cdot K_y^2 + P_{30} \cdot K_y^3 + P_{01} \cdot W + P_{02} \cdot W^2 + P_{03} \cdot W^3 + P_{11} \cdot W \cdot K_y + P_{21} \cdot K_y^2 \cdot W + P_{12} \cdot K_y \cdot W^2 + P_{00} + \varphi_n$ $P_{00} = 749,5; P_{10} = -246,9; P_{01} = -2167; P_{11} = 55,49; P_{20} = 338,6; P_{02} = 2135;$ $P_{30} = -133,2; P_{03} = -693,3; P_{21} = -80,19; P_{12} = 38,62$	0,98

Примечание. 1. C_n – удельное сцепление при оптимальной влажности и коэффициенте уплотнения 1,0, кПа; φ_n – угол внутреннего трения при оптимальной влажности и коэффициенте уплотнения 1,00, град; P_{ij} – коэффициенты уравнения регрессии; K_y – коэффициент уплотнения; W – отношение влажности к полной влагоемкости (относительная влажность).

2. Полученные уравнения адекватны для земляного полотна из ЗШС, уплотнённого механическим способом до коэффициента уплотнения от 0,85 до 1,05, при относительной влажности от 0,3 до 1,0.

Аналогично определены уравнения регрессии для установления характеристик деформируемости ЗШС при различных значениях плотности и влажности (таблица 3).

Таблица 3 – Уравнения регрессии для прогнозирования характеристик деформируемости ЗШС

Уравнение регрессии	R ²
Штамповый модуль упругости E , МПа	
$E = (P_{10} \cdot K_y + P_{20} \cdot K_y^2 + P_{01} \cdot W + P_{02} \cdot W^2 + P_{11} \cdot W \cdot K_y + P_{00}) \cdot E_{cm}$ $P_{00} = 0,7532; P_{10} = -2,499; P_{01} = -0,4265; P_{11} = -0,05681; P_{20} = 3,300; P_{02} = -0,03244$	0,99
Коэффициент Пуассона μ	
$\mu = 0,704 \cdot K_y - 0,538$	0,99
Примечание. 1. E_{cm} – модуль упругости при оптимальной влажности и коэффициенте уплотнения 1,0, МПа; K_y – коэффициент уплотнения; W – отношение влажности к полной влагоемкости (относительная влажность); 2. Полученные уравнения адекватны для земляного полотна из ЗШС, уплотнённого механическим способом до коэффициента уплотнения от 0,85 до 1,05, при относительной влажности от 0,3 до 1,0.	

На подавляющем большинстве ТЭС зола-унос и топливный шлак смешиваются в багерных насосных и в виде пульпы транспортируются на золоотвалы. По мере поступления пульпы к осветительному колодцу ЗШС фракционируется по плотности и зерновому составу: вблизи выпусков остаются крупные фракции ЗШС, далее откладывается более мелкая часть.

Поэтому гранулометрический состав и механические свойства ЗШС по простиранию на поле золоотвала не однородны, однако, достоверных данных о степени неоднородности ЗШС и влиянии этой неоднородности на механические свойства этого техногенного грунта нами не обнаружено.

Вследствие этого был проведён отбор проб и анализ изменения гранулометрического состава по длине намыва, что позволило установить математическую зависимость распределения шлаковых частиц (свыше 0,1 мм):

$$Ш = П_w \cdot e^{-2.32 \frac{l}{L}}, \quad (1)$$

где $Ш$ – содержание шлака в точке по длине намыва, в долях от единицы;

$П_w$ – содержание шлака в месте выпуска пульпы, в долях от единицы;

e – число Эйлера;

l – расстояние от выпуска пульпы до точки определения содержания шлака, м;

L – расстояние от выпуска пульпы до водоприёмного колодца, м.

Выбор для анализа частиц диаметром свыше 0,1 мм связан с использованием такого подхода в исследованиях *Prezzi, Kumar, Tiwary* и др. При этом нами установлены корреляционные зависимости между значениями параметров механических свойств и содержанием частиц крупнее 0,1 мм (таблица 4).

По классификации ОДМ 218.2.031-2013, плотным считается шлак, получаемый при удалении из котла в виде расплава, а пористым – при твёрдом шлакоудалении. При разделении на средне- и мелкозернистые смеси за основу взят вышеуказанный ОДМ. Разделение на «слабосвязные» и «связные» принято нами условно: к типу «слабосвязная» относится ЗШС с удельным сцеплением менее 15 кПа.

Таблица 4 – Зависимости механических свойств ЗШС от содержания шлака (частиц более 0,1 мм)

Название параметра	Тип ЗШС	Уравнение	R ²
Угол внутреннего трения	Мелкозернистая	$\varphi_m = \varphi_3 \cdot (1 + 0,218 \cdot Ш)$	0,95
	Среднезернистая	$\varphi_c = \varphi_3 \cdot (1 + 0,290 \cdot Ш)$	0,97
где φ_m – угол внутреннего трения мелкозернистой ЗШС с примесью шлака, град; φ_c – угол внутреннего трения среднезернистой ЗШС с примесью шлака, град; φ_3 – угол внутреннего трения ЗШС без примеси шлака, град; Ш – содержание шлаковой фракции (частиц размером более 0,1 мм) в долях единицы			
Удельное сцепление	Мелкозернистая малосвязная	$c_{mm} = c_3 \cdot (1 + 0,01 \cdot c_3) \cdot 6 \cdot Ш$	0,81
	Мелкозернистая связная	$c_{mc} = c_3 \cdot (1 - 0,01 \cdot c_3) \cdot 6 \cdot Ш$	0,82
	Среднезернистая малосвязная	$c_{cm} = 0$	-
	Среднезернистая связная	$c_{cc} = c_3 \cdot (1 - Ш)$	0,85
где c_{mm} – удельное сцепление мелкозернистой малосвязанной ЗШС с примесью шлака, кПа; c_{mc} – удельное сцепление мелкозернистой связной ЗШС с примесью шлака, кПа; c_{cm} – удельное сцепление среднезернистой малосвязанной ЗШС с примесью шлака, кПа; c_{cc} – удельное сцепление среднезернистой связной ЗШС с примесью шлака, кПа; c_3 – удельное сцепление ЗШС без примеси шлака, кПа			
Штамповый модуль упругости	Мелкозернистая с пористым шлаком	$E_{mn} = E_n \cdot (1 - 0,74 \cdot Ш)$	0,89
	Среднезернистая с пористым шлаком	$E_{cn} = E_n \cdot (1 - 0,64 \cdot Ш)$	0,96
	ЗШС с плотным шлаком	$E_n = E_n \cdot (1 + 1,96 \cdot Ш)$	0,94
где E_{mn} – модуль упругости мелкозернистой ЗШС с примесью пористого шлака, МПа; E_{cn} – модуль упругости среднезернистой ЗШС с примесью пористого шлака, МПа; E_n – модуль упругости ЗШС с примесью плотного шлака, МПа; E_n – модуль упругости ЗШС без примеси шлака, МПа			

Анализ зависимости (1) и формул в таблице 4 позволил определить коэффициент неоднородности механических характеристик $K_{нмх}$ ЗШС на картах намыва для исследуемых параметров (удельного сцепления, угла внутреннего трения, модуля упругости):

$$K_{нмх} = \left(1 - \left| \frac{f(Ш_1) - f(Ш_2)}{f(0,5 \cdot Ш_1 + 0,5 \cdot Ш_2)} \right| \right)^{-1} \quad (2)$$

где $f(Ш_1)$ – значения параметра, в начале разрабатываемой карты намыва;

$f(Ш_2)$ – значения параметра, в конце разрабатываемой карты намыва;

$f(Ш_1-Ш_2)$ – значения параметра в середине разрабатываемой карты намыва.

Кроме общих зависимостей изменения параметров механических свойств, при изменении влажности, плотности, содержания шлака результаты исследований позволили вывести зависимости между деформационными параметрами мелкозернистых ЗШС (таблица 5).

Аналогичные зависимости получены *W. Heukelom* и *C.R. Foster* и др. для природных грунтов, однако наши исследования показали, что они непригодны для ЗШС.

Таблица 5 – Формулы связи между характеристиками деформируемости ЗШС

Название параметра	Модуль упругости		Компрессионный модуль деформации
	лабораторный	штамповый	
Модуль упругости лабораторный	-	$E_{\text{Лаб}} = 0,72 \cdot E_{\text{Нам}}^{1,22}$	$E_{\text{Лаб}} = 0,093 \cdot E_{\text{Комп}}^{1,99}$
Модуль упругости штамповый	$E_{\text{Нам}} = 1,31 \cdot E_{\text{Лаб}}^{0,82}$	-	$E_{\text{Нам}} = 0,187 \cdot E_{\text{Комп}}^{1,63}$
Компрессионный модуль деформации	$E_{\text{Комп}} = 3,29 \cdot E_{\text{Лаб}}^{0,503}$	$E_{\text{Комп}} = 1,82 \cdot E_{\text{Нам}}^{0,614}$	-
CBR	$\text{CBR} = 0,67 \cdot E_{\text{Лаб}}^{0,73}$	$\text{CBR} = 0,52 \cdot E_{\text{Нам}}^{0,891}$	$\text{CBR} = 0,117 \cdot E_{\text{Комп}}^{1,45}$
Модуль упругости секущий	$E_{\text{Сек}} = 3,24 \cdot E_{\text{Лаб}}^{0,353}$	$E_{\text{Сек}} = 2,89 \cdot E_{\text{Нам}}^{0,431}$	$E_{\text{Сек}} = 1,4 \cdot E_{\text{Комп}}^{0,7}$

Примечание. 1. Полученные уравнения адекватны для ЗШС, уплотнённой механическим способом до коэффициента уплотнения от 0,85 до 1,05, при относительной влажности от 0,3 до 1,0.

Нами не обнаружено опубликованных результатов исследований по влиянию многократной циклической нагрузки, моделирующих воздействие транспортных средств, на показатели механических свойств ЗШС.

При исследованиях влияния циклической (транспортной) нагрузки она выбиралась как максимальная, возникающая на поверхности земляного полотна со стороны дорожной одежды при движении грузового транспортного средства. Циклы нагружения велись аналогично экспериментам А.С. Пилипенко как наиболее отвечающие современным условиям. Для исследования изготовлено специальное устройство циклического нагружения, обеспечивающее приложение нагрузки с частотой 1 Гц и давлением 200 кПа, представленное на рисунке 6.

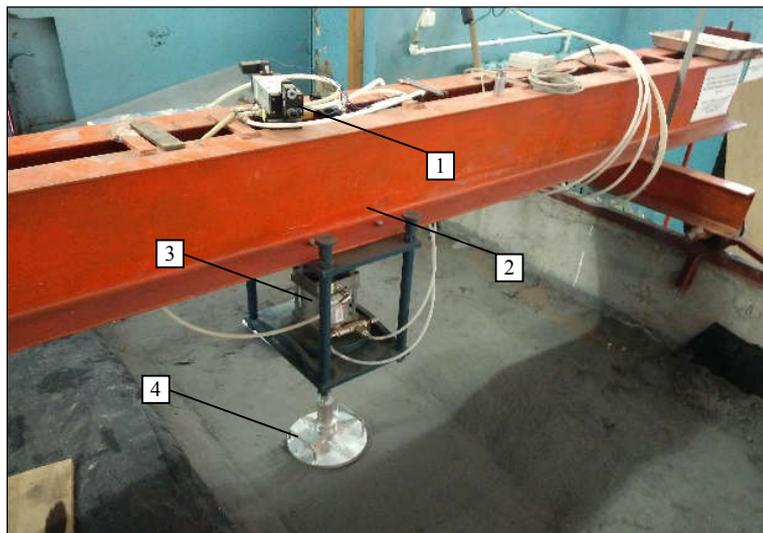


Рисунок 6 – Установка для исследований по оценке влияния циклической (транспортной) нагрузки на свойства ЗШС: 1 – управляющий блок; 2 – статичная балка; 3 – нагружающий цилиндр; 4 – штамп (Ø 25 см).

Результаты проведённых исследований позволили вывести закономерности, описывающие изменения прочностных характеристик ЗШС под воздействием циклических нагрузок в зависимости от структуры материала, характеризующейся его плотностью, выраженной через коэффициент уплотнения (таблица 6).

Проведённые исследования не выявили снижения прочностных показателей ЗШС после различного числа приложений расчётной нагрузки (от 1 до 10^6 раз). При этом наблюдалось только постепенное уплотнение верхней части земляного полотна из данного техногенного грунта.

Таблица 6 – Зависимости, характеризующие прочностные показатели ЗШС после воздействия циклических нагрузок

Уравнение регрессии	R ²
Удельное сцепление, с, кПа	
$c = [(-0,4561 \cdot K_y + 0,41) \cdot \ln(N) + 1] \cdot c_{cm}$	0,97
Угол внутреннего трения φ , град	
$\varphi = [(-0,115 \cdot K_y + 0,10) \cdot \ln(N) + 1] \cdot \varphi_{cm}$	0,98

Примечание. 1. K_y – коэффициент уплотнения; N – число приложений расчетной нагрузки, шт.; c_{cm} – статическое удельное сцепление, кПа; φ_{cm} – статический угол внутреннего трения, град
2. Полученные уравнения адекватны для земляного полотна из ЗШС, уплотнённого механическим способом до коэффициента уплотнения от 0,85 до 1,05, при числе приложений расчётной нагрузки (от 1 до 10⁶ раз).

В четвертой главе рассмотрены вопросы конструктивно-технологических решений для автомобильных дорог с земляным полотном из ЗШС.

Для создания типовых проектных решений применительно к ЗШС проведено конструирование поперечных профилей земляного полотна и их моделирование с использованием метода конечных элементов (*Plaxis 2D*, *Z-Soil*, *Geo5*), а также методов предельного равновесия (*Феллениуса-Петерсена*, *Шахунянца*, *Бишона*). В расчётах генерация напряжений производилась с учётом особенностей формирования напряжённого состояния, установленных в главе 2, а для получения параметров ЗШС в моделях были использованы полученные нами уравнения регрессии.

На первом этапе проводился пластический анализ конструкции, после чего вёлся расчёт устойчивости земляного полотна с использованием *shear reduction method*. Модель сетки конечных элементов и изополя сдвигающих напряжений для одной из конструкций приведена на рисунке 7.

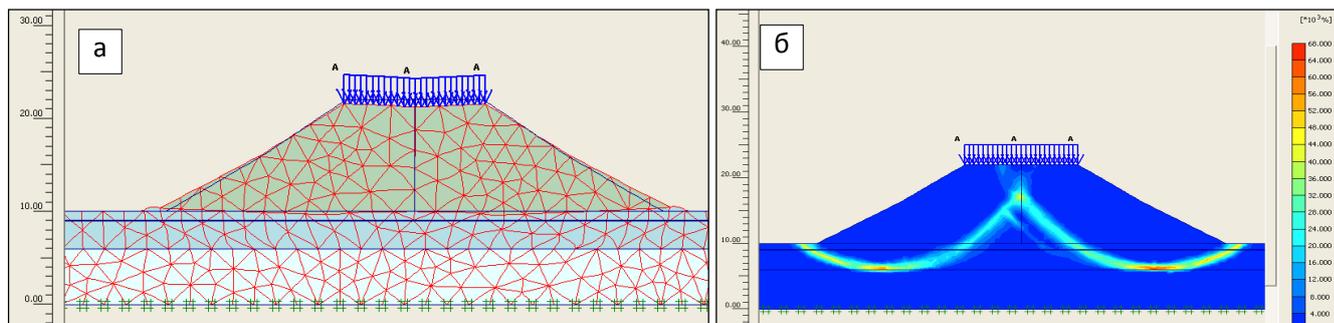


Рисунок 7 – Модель насыпи из ЗШС высотой 12 м:

а – сетка конечных элементов насыпи; б – изополе сдвигающих напряжений.

Анализ устойчивости конструкций показал, что ЗШС можно использовать как грунтовый материал для сооружения насыпей автомобильных дорог до 12 м высотой на участках с первым и вторым типом местности по условиям увлажнения с заложением откосов, так и для природных (глинистых и песчаных) грунтов. На третьем типе местности по условиям увлажнения рекомендуются мероприятия по защите рабочего слоя земляного полотна от переувлажнения. При этом следует иметь в виду, что высота капиллярного поднятия влаги в этом техногенном грунте не превышает 1,2 м.

В случае проектирования земляного полотна с насыпями высотой свыше 12 м их устойчивость требуется дополнительно обосновывать (в соответствии с требованиями СП 34.13330.2012).

Предлагаемые конструктивные решения были апробированы сначала на опытно-экспериментальном участке земляного полотна из ЗШС. На этом участке в период с 2010 по 2018 гг. проводили опытные исследования процессов формирования водно-теплового режима, оценки несущей способности земляного полотна статическими и динамическими методами, в том числе и при разной влажности. Испытывали разные варианты укрепления откосов. На графиках (рисунок 8) представлено сравнение результатов лабораторных и натуральных испытаний ЗШС.

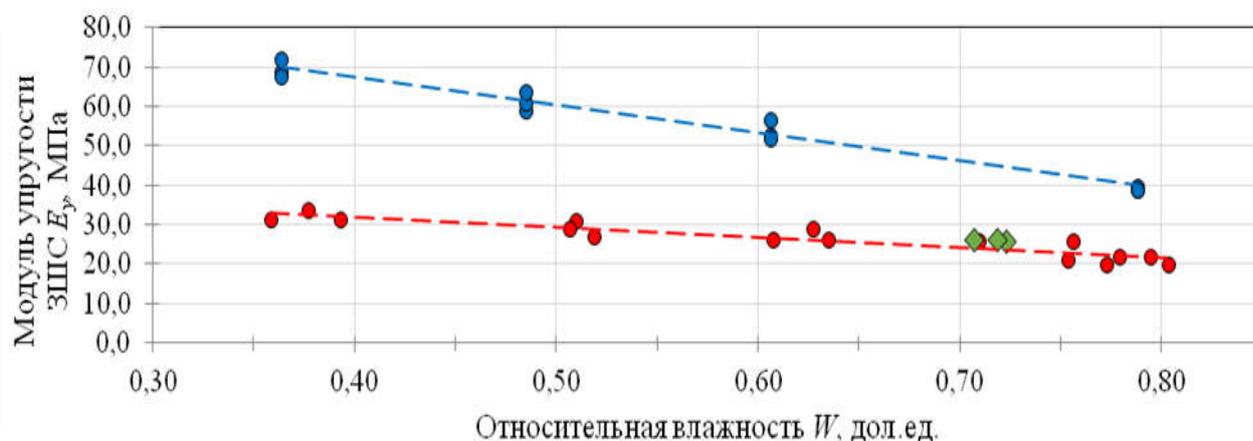


Рисунок 8 – Изменение модуля упругости от влажности ЗШС:

- – значения модуля упругости ЗШС на опытном участке при разной влажности (2017);
- ◆ – то же при первом испытании насыпи из ЗШС (в 2010);
- – значения модуля упругости ЗШС при разной влажности, полученные в лабораторных условиях.

Результаты исследований были апробированы на двух крупных объектах транспортной инфраструктуры. Первый – транспортная развязка в двух уровнях, расположенная на пересечении дороги I технической категории с высотой насыпи до 15 м и железнодорожных путей на 87 км перегона Михнево – Жилево Московской железной дороги в Ступинском районе (рисунок 9а; 12.01.2016 г. развязка сдана в эксплуатацию).



Рисунок 9 – Фотографии объектов с земляным полотном из ЗШС: а – развязка с насыпью из ЗШС Каширской ГРЭС-4; б – развязка с насыпью из ЗШС Дзержинской ТЭЦ-22

Второй уникальный проект с земляным полотном из ЗШС был сдан в эксплуатацию в январе 2018 г. Это транспортная развязка, расположенная на пересечении Лыткаринского шоссе и магистрали М-5 «Урал» в Люберецком районе Московской области (см. рисунок 9б).

Для сооружения насыпей на каждом из этих объектов использовано от 500 до 700 тыс. м³ ЗШС. Оба указанных объекта успешно эксплуатируются со значительными транспортными нагрузками. На них нет дефектов, вызванных низким качеством земляного полотна.

В пятой главе проведен анализ экологических аспектов применения ЗШС для строительства и экономическая оценка использования этого техногенного грунта для возведения земляного полотна.

Для экологической оценки были исследованы пробы ЗШС, отобранные из отвалов восьми ТЭС (Каширской ГРЭС-4, Дзержинской ТЭЦ-22, омских ТЭЦ-4 и ТЭЦ-5, Беловской ГРЭС, Кемеровской ГРЭС, Иркутской ТЭЦ-10, Ново-Иркутской ТЭЦ). Исследования, выполненные по ГОСТ 30108, показали, все ЗШС относятся к I классу по удельной эффективной активности природных радионуклидов и могут применяться в строительстве без ограничений.

Испытания вышеуказанных проб ЗШС выполнены также и в соответствии с Санитарными правилами СП 2.1.7.1386. На основании Федерального закона «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» от 30 марта 1999 г. № 52-ФЗ все пробы ЗШО относятся к V классу опасности по воздействию на окружающую природную среду и могут без специальных мероприятий или ограничений применяться в строительстве.

Экспериментально на опытном участке установлено, что ЗШС могут быть средой для роста травяных культур даже в случае посева их на неудобренный слой. Лучшие результаты дают травосмеси на основе овсяницы (*Festuca*) и горца птичьего (*Polygonum aviculare*).

По результатам опытно-производственного строительства опровергнуто заблуждение о недопустимом пылении ЗШС при возведении земляного полотна. Тем не менее при длительной транспортировке ЗШС в жаркую погоду целесообразно использовать тенты для укрытия насыпного груза в кузовах автосамосвалов и применять для предотвращения пылимости специальные составы.

Вышеприведённые заключения подтверждаются опытом европейских стран в области утилизации ЗШС в строительной отрасли.

Комплексный экономический эффект от рациональной многотоннажной утилизации ЗШО для сооружения земляного полотна автомобильных и городских дорог (в виде планировочных насыпей) имеет веерную схему: увеличиваются сроки эксплуатации существующих золоотвалов ТЭС (стоимость реконструкции не менее 1 – 2 млрд руб.); уменьшаются площади изъятия ценных пригородных земель под карьеры; уменьшаются затраты (500 – 800 руб. за т) и «экологические» платежи (60 – 100 млн руб. в год) ТЭС за утилизацию ЗШО, что может снизить тарифы на энергетические ресурсы; ЗШО ТЭС ухудшают экологическую ситуацию в крупных городах, а с этим фактором связано качество и продолжительность жизни населения.

Комплексный (веерный) эколого-экономический ущерб от ЗШО ТЭС оценить в рамках данной диссертационной работы не представляется возможным. Поэтому условием, определяющим экономически целесообразное применение ЗШС, принято равенство приведенных затрат на сооружение единицы длины зем-

ляного полотна автомобильной дороги при использовании традиционных природных грунтов и нового материала (техногенного грунта – ЗШС).

Для укрупненного сравнения приняты три вида грунтов для сооружения земляного полотна: ЗШС из отвала ТЭС; глинистый природный грунт; песчаный природный грунт (часто используют для земляного полотна в Московской области, иногда и других регионах). При сравнении учтены отличия видов и объёмов работ, некоторых технологических процессов, особенности ценообразования при использовании для земляного полотна разных грунтов. Основой для расчётов послужили единичные расценки ФЕР в редакции 2017 г. и ФССЦпг 81-01-2001 в редакции 2016 г.

Исходя из вышеуказанных предпосылок, построен график для ориентировочного определения рациональной дальности возки ЗШС для сооружения земляного полотна по сравнению с природным глинистым грунтом и песком (рис. 10).

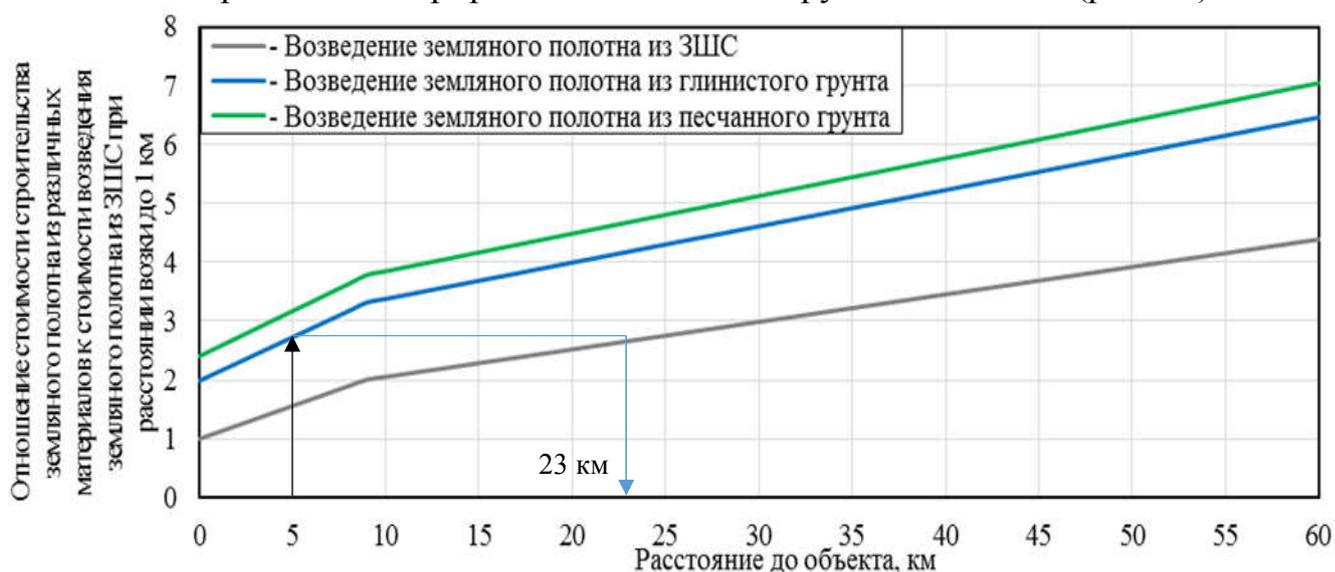


Рисунок 10 – Пример графической зависимости для определения рациональной дальности возки при сооружении земляного полотна из ЗШС

Экономическая оценка показала возможность снижения стоимости земляного полотна при использовании ЗШС даже в условиях отсутствия льгот и содействия со стороны ТЭС. Величина этого экономического эффекта и рациональная дальность возки ЗШС всецело зависят от конкретных условий строительства и экологической политики в данном регионе. Поэтому рациональная дальность возки золошлаковых смесей для сооружения земляного полотна может составлять от 20 до 50 км.

Заключение

1. Анализ отечественных и зарубежных научных исследований в области изучения механических свойств ЗШС для их использования при проектировании дорожных конструкций показал недостаточную проработку этого вопроса. Отсутствуют полномасштабные комплексные исследования золошлаковых материалов, позволяющие обоснованно назначать показатели механических характеристик для проектирования насыпей из этих техногенных грунтов.

2. Экспериментальные проверки показали, что результаты теоретических исследований и математические модели формирования напряжённого состояния, применяемые для проектирования грунтовых сооружений, в той или иной мере отражают поведение только природных грунтов. Формулы Олсона, являющиеся разновидностью записи более общего решения Фрелиха можно применять для прогнозирования напряжённого состояния в грунтовых массивах из ЗШС только с учётом полученных нами закономерностей изменений параметров механических характеристик этих техногенных грунтов.

В результате исследований была модернизирована предложенная *Олсоном* математическая модель формирования напряжённого состояния, возникающего в грунте земляного полотна от действия транспортной нагрузки. Модернизация выполнена путем учета структурных особенностей золошлаковой смеси, её плотности, влияния собственного веса дорожной конструкции и характера приложения транспортной нагрузки. Полученная модель адекватно отражает результаты опытной проверки.

3. Впервые экспериментально установлены закономерности влияния на прочностные и деформационные характеристики ЗШС следующих факторов: влажности и плотности этого материала; содержания шлаковой фракции (неоднородности этих техногенных грунтов в золоотвалах); числа кратковременных циклических нагрузок от действия транспортных средств.

Определены значения коэффициента Пуассона, калифорнийского числа несущей способности ЗШС при различной степени уплотнения и влажности этого техногенного грунта. Выведены математические зависимости, отражающие связи между модулем упругости, полученным по методу штамповых испытаний и методом рычажного пресса, секущим модулем упругости, полученным из трехосных испытаний, компрессионным модулем деформации и калифорнийским числом несущей способности.

Экспериментально определённые закономерности позволили вывести уравнения регрессии, пригодные для прогнозирования значений параметров механических характеристик ЗШС в условиях реальной эксплуатации насыпей земляного полотна.

4. На основании полученных данных разработаны конструктивно-технологические решения для проектирования насыпей земляного полотна из ЗШС.

5. Результаты экспериментально-теоретических исследований и предложенные конструктивно-технологические решения прошли опытно-производственную проверку на двух крупных объектах (транспортных развязках с насыпями из ЗШС высотой до 15 м в Московской области).

6. Оценки экологической безопасности применения ЗШС показали, все исследованные пробы относятся к I классу по удельной эффективной активности природных радионуклидов и к V классу опасности по воздействию на окружающую природную среду и могут без специальных мероприятий или ограничений применяться в строительстве. Кроме этого установлена пригодность ЗШС для роста травы на откосных частях земляного полотна. Выполнена оценка пылеуноса золошлаков.

7. В рамках экономической оценки применения рекомендуемых конструктивно-технологических решений определены рациональные дальности возки ЗШС для сооружения земляного полотна, предложен соответствующий график. При этом учтены различия в технологии строительства земляного полотна из ЗШС и природных грунтов.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

В рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК (Scopus):

1. **Лунёв, А.А.** Сопоставление методов оценки устойчивости высокой насыпи из золошлаковой смеси / А.А. Лунёв, В.В. Сиротюк, Н.С. Безделов // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – Омск, 2016. – Вып. 5 (51). – С. 123 – 131.

2. **Лунёв, А.А.** Экспериментальные исследования прочностных характеристик золошлаковой смеси / А.А. Лунёв, В.В. Сиротюк, Н.И. Барац // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – Омск, 2016. – Вып. 6 (52). – С. 118 – 126.

3. **Лунёв, А.А.** Влияние влажности на несущую способность земляного полотна из золошлаковой смеси / А.А. Лунёв, В.В. Сиротюк // Вестник белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2017. – Вып. 12. – С. 14 – 20.

4. **Лунёв, А.А.** Результат определения несущей способности железобетонных свай в массиве из золошлаковой смеси / А.А. Лунёв, В.В. Сиротюк, Е.В. Иванов // Вестник белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2017. – Вып. 2. – С. 85 – 89.

5. **Лунёв, А.А.** Результаты исследований деформационных характеристик золошлаковых смесей / А.А. Лунёв, В.В. Сиротюк, Е.В. Иванов // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – Омск, 2017. – Вып. 1 (53). – С. 103 – 110.

6. **Лунёв, А.А.** Сопоставление деформационных параметров золошлаковой смеси, полученных в лабораторных и натуральных условиях / А.А. Лунёв, В.В. Сиротюк // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – Томск, 2019. Вып. (2). С. 215 – 227.

7. Sirotyuk, V.V. Strength and deformation characteristics of ash and slag mixture / V.V. Sirotyuk, **A.A. Lunev** // Magazine of civil engineering – Saint-Petersburg, 2017. – Vol. 6 (74). – С. 3 – 16. (*Scopus, WoS*)

8. **Lunev A.** Plate load test of base taken from coal ash and slag mixture in experimental tray and on experimental section of embankment / **A. Lunev V.**, Sirotyuk // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 451, conference 2018. (*Scopus*)

В сборниках материалов конференций и других изданиях:

9. **Лунёв, А.А.** Некоторые экологические аспекты использования золошлаковых материалов в дорожном строительстве / А.А. Лунёв, Е.А. Беззубова // Сборник : материалы Международной научно-практической конференции студентов и аспирантов «Казанские научные чтения студентов и аспирантов-2013» имени В.Г. Тимирязова (20 декабря 2013 г.). – Казань : Познание, 2013. – С. 540.

10. **Лунёв, А.А.** Экологические аспекты применения золошлаков в дорожном строительстве / А.А. Лунёв, Е.В. Иванов // Сборник : материалы Международной научно-практической конференции «Молодёжь и научно-технический прогресс в дорожной отрасли юга России». – Волгоград : ВолГАСУ, 2014. – С. 382 – 386.

11. **Лунёв, А.А.** Применение золошлаковых смесей для вертикальных планировок и строительства городских дорог [Электронный ресурс] / А.А. Лунёв, В.В. Сиротюк // Техника и технологии строительства; научно-практический сетевой электронный журнал. – Омск: СибАДИ. – 1(1). – 2015. Режим доступа <http://ttc.sibadi.org/>.

12. **Лунёв, А.А.** Применение ЗШО для вертикальной планировки территорий и дорожного строительства на примере левобережной части г. Омска : – сборник тезисов участников форума «Наука будущего – наука молодых». – Севастополь, 2015. – Том 2. – С. 267 – 268.

13. **Лунёв, А.А.** Исследования деформационных характеристик золошлаковых смесей в приборах трёхосного сжатия / А.А. Лунёв, В.В. Сиротюк // Техника и технологии строительства : научно-практический сетевой электронный журнал. – Омск : СибАДИ. – 2016. – № 4(8). Режим доступа <http://ttc.sibadi.org/>.

14. Сиротюк, В.В. Обоснование устойчивости откосов высоких насыпей из золошлаковых смесей / В.В. Сиротюк, **А.А. Лунёв**, Е.В. Иванов, Г.М. Левашов // Техника и технологии строительства : научно - практический сетевой электронный журнал. – Омск : СибАДИ. – 2016. – № 1(5). Режим доступа <http://ttc.sibadi.org/>.

15. Сиротюк, В.В. Золошлаковая смесь для земляного полотна / В.В. Сиротюк, **А.А. Лунев**, Е.В. Иванов // Автомобильные дороги : ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М. – № 6(1015) – 2016. – С.72 – 79.

16. **Лунёв, А.А.** The problems of bottom ash utilization // Сборник : материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники глазами молодых учёных», Омск, 8-9 февраля 2016 г. – Омск : СибАДИ, 2016. – С. 979 – 83.

17. **Лунёв, А.А.** Вопросы экологической безопасности применения золошлаков для вертикальной планировки территорий и дорожного строительства / **А.А. Лунёв, В.В. Сиротюк** // Сборник: Инженерное дело: Взгляд в будущее : материалы VII Международной научно-технической конференции ПАО «ОМСКНЕФТЕХИМПРОЕКТ». – Омск, 2016. – С. 69 – 72.

18. Сиротюк, В.В. Обоснование устойчивости откосов высоких насыпей из золошлаковых смесей / В.В. Сиротюк, **А.А. Лунёв**, Е.В. Иванов, Г.М. Левашов // Сборник : материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники глазами молодых учёных», Омск, 8-9 февраля 2016 г. – Омск : СибАДИ, 2016. – С. 13 – 20.

19. **Лунёв, А.А.** Применение метода конечных элементов для проектирования насыпей из золошлаковых смесей / А.А. Лунёв, В.В. Сиротюк // Техника и технологии строительства: научно-практический сетевой электронный журнал. – Омск : СибАДИ – 2016. – № 2(6). Режим доступа <http://ttc.sibadi.org/>.

20. **Лунёв, А.А.** Использование отходов теплоэнергетики для сооружения насыпей земляного полотна автомобильных дорог / А.А. Лунёв // Сборник : материалы Международной научно-практической конференции «Инновационные факторы развития транспорта» (19 – 20 ноября 2017 г.). – Новосибирск : Издательство СГУПС, 2017. – С. 32 – 33.

21. **Лунёв, А.А.** Несущая способность насыпи из золошлаковой смеси / А.А. Лунёв, В.В. Сиротюк // Строительство : новые технологии – новое оборудование. – 2018. – № 10. – С. 26 – 32.

22. Булхаирова, С.И. Формирование травяного покрова на откосных частях насыпи из золошлаковой смеси / С.И. Булхаирова, В.В. Кузнецова, **А.А. Лунёв**, В.В. Сиротюк // Материалы III Международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожный комплексы: проблемы, перспективы, инновации», 29-30 ноября 2018 г. – Омск : СибАДИ. – С. 219 – 223.

23. **Лунёв, А.А.** Применение "ARDUINO" и совместимых компонентов для определения влажности грунтов / А.А. Лунёв, Е.Н. Алькаев, Д.В. Тюскляйнен, Д.Н. Ложников // Материалы III Международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожный комплексы: проблемы, перспективы, инновации», 29-30 ноября 2018 г. – Омск : СибАДИ. – С. 243 – 246.

Патент:

24. Способ формирования набережных с использованием пульпы золошлаковых отходов. / **Лунёв А.А.**, Сиротюк В.В.; заявитель и патентообладатель СибАДИ; № 2614236; заявка 16.11.2015, опубл. 23.03.2017.

Депонированные рукописи:

25. Госконтракт РФФИ № 16-48-550508 p_a. Выполнение экспериментальных исследований по определению физико-механических характеристик золошлаковых смесей и построение математической модели, описывающей её поведение под нагрузкой: отчёт по НИР, РФФИ. № гос.рег. АААА-А16-116053010076-8. Науч. рук. В.В. Сиротюк, отв. исп. **А.А. Лунёв**. – Омск : СибАДИ, 2016. –113 с.

26. Госконтракт РФФИ № 16-48-550508 p_a. Разработка математической модели для прогнозирования деформаций и разрушений в насыпях из золошлаковых смесей тепловых электростанций г. Омска : отчёт по НИР, РФФИ. № гос.рег. АААА-А16-116053010076-8. Науч. рук. В.В. Сиротюк, отв. исп. **А.А. Лунёв**. – Омск: СибАДИ, 2017. – 97 с.

Лунёв Александр Александрович

**ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЁТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЗОЛОШЛАКОВЫХ СМЕСЕЙ
ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано к печати _____ 2019

Формат 60x90 1/16. Бумага писчая.

Оперативный способ печати.

Усл. п. л.1,0

Тираж 120 экз. Заказ № _____

Отпечатано в отделе ОП ИПК СибАДИ

644080, г. Омск, пр. Мира, 5